



UNICAMP

Faculdade de Engenharia Química

Desenvolvimento de Processos Químicos

Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos

Modelagem Multifásica Euleriana-Euleriana para Simulação Numérica de Ciclones

Autor: Atilano Antônio Vegini

Orientador: Prof. Dr. Milton Mori

Co-Orientador: Prof. Dr. Henry França Meier

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

CAMPINAS – SP

Julho de 2007

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

V527m Vegini, Atilano Antônio
Modelagem multifásica Euleriana-Euleriana para
simulação numérica de ciclones / Atilano Antônio
Vegini.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Milton Mori.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Ciclone. 2. Fluidodinâmica computacional. 3.
Método dos volumes finitos. 4. escoamento
multifásico. I. Mori, Milton. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química. III. Título.

Título em Inglês: Eulerian-Eulerian approach for numerical
simulation of cyclones

Palavras-chave em Inglês: Cyclone, CFD, Finite volume method,
Multiphase flow, Eulerian model

Área de concentração: Desenvolvimento de processos químicos

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Paulo Laranjeira da Cunha Laje, Waldir Pedro
Martignoni, Marco Aurélio Cremasco, Maria das
Graças Enrique da Silva

Data da defesa: 27/07/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado sob o Título “*Modelagem Multifásica Euleriana-Euleriana para Simulação Numérica de Ciclones*”, defendida por Atilano Antônio Vegini e aprovada em 27 de julho de 2007, em Campinas, pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr Milton Mori

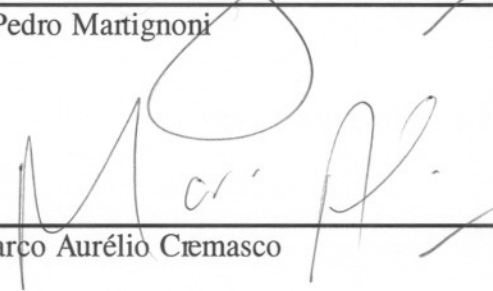
Orientador



Prof. Dr Paulo Laranjeira da Cunha Lage



Dr Waldir Pedro Martignoni



Prof. Dr Marco Aurélio Cremasco



Profa. Dra Maria das Graças Enrique da Silva

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Atilano Antônio Vegini e aprovada pela comissão julgadora em 27 de Julho de 2007.

Milton Mori

Prof. Dr Milton Mori

Orientador

Dedicatória

Dedico este trabalho à memória de meu pai.

Para minha esposa Carolina e meus filhos, pelo incentivo.

À minha mãe e meus irmãos, pelo carinho.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a DEUS pela sua benção e proteção em todos os momentos da minha vida.

A minha esposa Carolina pela ajuda nas correções de ortografia e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Milton Mori, pelo apoio ao longo de todos esses anos. Muito obrigado pelas oportunidades e confiança depositadas em minha pessoa, desde o início do mestrado até o momento.

Ao meu amigo e co-orientador, Prof. Henry França Meier, que ao longo desses anos me ajudou de uma forma imensurável no desenvolvimento deste trabalho.

À FURB e aos professores do departamento de Engenharia Química que sempre apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Dirceu, Rodrigo e Vinícius pela ajuda ao longo desta caminhada.

À Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP pela oportunidade da realização deste trabalho.

Aos vários colegas, amigos e amigas da FURB e UNICAMP que me ajudaram em vários momentos no desenvolvimento deste trabalho. Não vou arriscar a citar nomes, pois tenho medo de esquecer alguém e tornar este agradecimento uma página de arrependimento. Muito obrigado a todos vocês que mesmo não mencionados contribuíram para a realização deste trabalho.

O único modo de evitar os erros
é adquirindo experiência,
mas a única maneira de adquirir
experiência é cometendo erros.
(Autor desconhecido)

O que sabemos é uma gota,
o que ignoramos é um oceano.
(Isaac Newton)

Ninguém é tão grande
que não possa apreender,
nem tão pequeno
que não possa ensinar.
(Autor desconhecido)

Resumo

Neste trabalho é apresentado o código computacional CYCLO, programa desenvolvido especificamente para prever o escoamento multifásico em ciclones. Os ciclones são equipamentos utilizados na indústria, principalmente, para a separação de material particulado de correntes gasosas. Desde o início da industrialização até a atualidade, os ciclones são investigados cientificamente na tentativa de elucidar o real funcionamento deste complexo sistema de escoamento que ocorre no interior destes equipamentos. Com o avanço computacional, as modernas técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD), têm se mostrado capaz de auxiliar nas investigações científicas sobre os ciclones. O código CYCLO, é um destes programas baseado nas técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD). Consiste de um modelo multifásico num referencial euleriano, e composto de equações diferenciais parciais que são resolvidas numericamente através da aplicação do método dos volumes finitos, com acoplamento pressão-velocidade e malha numérica deslocada. A hipótese de simetria no eixo é assumida, tornando possível a utilização de um modelo 3D-Simétrico em coordenadas cilíndricas. O código CYCLO torna possível a utilização de até três fases sólidas, cada uma caracterizada por seu tamanho de partícula, massa específica e fração volumétrica. O escoamento da fase sólida é considerado invíscido e a transferência de quantidade de movimento interfase predito pela adoção de um modelo de força de arraste. Para representar o comportamento anisotrópico dos tensores de Reynolds na fase gasosa, é utilizado um modelo de turbulência híbrido composto por uma combinação do modelo $k-\epsilon$ padrão para os componentes radiais e axiais do tensor de Reynolds, e, para os componentes tangenciais por intermédio da teoria do comprimento de mistura de Prandtl. Os objetivos deste trabalho vão desde a verificação e validação do código CYCLO com seu modelo multifásico euleriano-euleriano e todas suas 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 apresentado a utilização do código na análise e projeto de ciclones industriais.

Palavras Chaves:

Ciclone, CFD, Método dos volumes finitos, Escoamento multifásico, Modelo euleriano.

Abstract

In this work it is presented the computational code CYCLO, which is a program developed specifically to predict the dynamic behavior of the gas-solid flow in cyclones. The cyclones have been used extensively in many industries for a long time for separating the particles from gaseous streams. Since the beginning of the industrialization until the present time, the cyclones are investigated scientifically in order to elucidate the real functioning of this complex flow behavior inside of these equipments. With the computational advance, the modern techniques of the computational fluid dynamics (CFD), has been capable to assist in the scientific inquiries concerning cyclones. The CYCLO code is one of these programs based on computational fluid dynamics (CFD) techniques. The program consists of a multiphase flow model based on the Eulerian-Eulerian approach and it is composed of several partial differential equations, which are solved using the finite volume method with pressure-velocity coupling and staggered grids. The axial symmetry hypothesis is assumed, which makes possible to apply the 3D symmetric model in cylindrical coordinate. The CYCLO code makes possible the use of up to three solid phases, each one represented by a particle diameter, density and specific volumetric fraction. The solid-phase flow is considered inviscid and drag forces between phases are responsible for the gas-solid interaction. To represent an anisotropic behavior of the Reynolds stress in the gas phase, it is used a hybrid model composed of the combination of the $(k-\epsilon)$ standard model for the radial and axial components and Prandtl's longitudinal mixing model for the tangential components. The purpose of the present study is to verify and validate the model used by the CYCLO code and to show practical applications of the use of CFD techniques. In order to verify and validate the code, numerical results were compared with experimental data for gas and gas-solid flows. As practical examples of application of CFD techniques, the code was used to the analysis and design of industrial cyclones.

Keywords:

Cyclone, CFD, Finite volume method, Multiphase flow, Eulerian model

Sumário

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

- 1.1 Motivação pelo Tema 1
- 1.2 Objetivos e Escopo do Presente Trabalho 3

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ciclones 5
- 2.2 Avaliação do Desempenho e Projeto de Ciclones 7
- 2.3 Simulação Numérica 11
- 2.4 Utilização das Técnicas de CFD em Ciclones 14

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA E PROCEDIMENTO NUMÉRICO

- 3.1 Modelagem Matemática 17
 - 3.1.1 Equações da conservação 20
 - 3.1.2 Equações constitutivas 21
- 3.2 Procedimento Numérico 37
 - 3.2.1 Equação geral de discretização 37
 - 3.2.2 Esquemas de interpolação 40
 - 3.2.3 Acoplamento pressão-velocidade 42
 - 3.2.4 Resolução do sistema de equações 43
 - 3.2.5 Fatores de relaxação 46
 - 3.2.6 Malha numérica 47

CAPÍTULO 4

O CÓDIGO CYCLO

- 4.1 Estrutura do Código 51

CAPÍTULO 5	
ESTUDOS DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	60
5.1 Estudo de Caso 01 – Sistema Monofásico	60
5.1.1 Métodos numéricos	62
5.1.2 Malha numérica	63
5.1.3 Comparação dos resultados	64
5.2 Estudo de Caso 02 – Sistema Multifásico	70
5.2.1 Estratégia de solução	73
5.2.2 Malha numérica	74
5.2.3 Tratamento da fase sólida	77
5.2.4 Comparação dos resultados	80
5.3 Ampliação de Escala (“scale-up”) em Ciclones	88
5.3.1 Resultados obtidos	90
CAPÍTULO 6	
AVALIAÇÃO DE CICLONES INDUSTRIAIS	95
6.1 Avaliação de Torre de Ciclones	95
6.1.1 Configurações geométricas e condições de operação dos ciclones	96
6.1.2 Malha numérica	99
6.1.3 Resultados obtidos	100
6.2 Avaliação do Desempenho de Ciclones	107
6.2.1 Configurações geométricas e condições de operação dos ciclones	108
6.2.2 Malha numérica	110
6.2.3 Resultados obtidos	112
CAPÍTULO 7	
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	119
7.1 Principais Conclusões	119
7.2 Sugestões para os Próximos Trabalhos	120

CAPÍTULO 8	
PUBLICAÇÕES	121
8.1 Artigos Completos Publicados em Periódicos	121
8.2 Trabalhos Completos em Anais de Eventos	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

Lista de Figuras

Figura 2.1	Ciclone e suas características fenomenológicas	6
Figura 2.2	Desenho esquemático de um ciclone e suas relações geométricas	9
Figura 2.3	Eficiência de coleta	10
Figura 3.1	Desenho esquemático de um ciclone	29
Figura 3.2	Ilustração da transformação da entrada assimétrica para uma entrada simétrica	32
Figura 3.3	Representação de um volume de controle genérico	38
Figura 3.4	Ilustração em linhas e colunas do domínio de cálculo	44
Figura 3.5	Ilustração da malha numérica deslocada	48
Figura 3.6	Volumes e pontos deslocados da malha deslocada	49
Figura 4.1	Planilha Malha_pdr	52
Figura 4.2	Arquivo para geração da malha numérica	53
Figura 4.3	Arquivo das propriedades do gás	54
Figura 4.4a	Arquivo de dados para a simulação (a)	55
Figura 4.4b	Arquivo de dados para a simulação (b)	56
Figura 4.4c	Arquivo de dados para a simulação (c)	57
Figura 4.5	Montagem da malha numérica	58
Figura 4.6	Tela de acompanhamento do código CYCLO (gás)	59
Figura 4.7	Tela de acompanhamento do código CYCLO (gás/sólido)	59
Figura 5.1	Geometria do ciclone utilizado na simulação numérica – Caso 01	61
Figura 5.2	Malha numérica: CYCLO (a), CFX 4.4 (b)	63
Figura 5.3	Perfil de velocidade tangencial ao longo do raio 13 cm a partir do topo do ciclone	66
Figura 5.4	Perfil de velocidade axial ao longo do raio 13 cm a partir	

	do topo do ciclone	67
Figura 5.5	Mapas de pressão: (a) CYCLO, (b) CFX 4.4	68
Figura 5.6	Mapas de velocidade tangencial: (a) CYCLO (b) CFX 4.4	70
Figura 5.7	Diagrama esquemático da geometria dos ciclones: (a) CTSI e (b) CSSI	71
Figura 5.8	Geometria do ciclone utilizado na simulação numérica	72
Figura 5.9	Tamanho das malhas verificadas	75
Figura 5.10	Perda de carga em função do tamanho da malha	76
Figura 5.11	Fração volumétrica em função do diâmetro: modelo bifásico	80
Figura 5.12	Fração volumétrica em função do diâmetro: modelo tetrafásico	80
Figura 5.13	Eficiência global de coleta em função da velocidade de entrada	81
Figura 5.14	Eficiência de coleta - Ventrada = 11,99 m/s	83
Figura 5.15	Eficiência de coleta - Ventrada = 16,04 m/s	83
Figura 5.16	Eficiência de coleta - Ventrada = 20,18 m/s	84
Figura 5.17	Eficiência de coleta - Ventrada = 23,85 m/s	84
Figura 5.18	Perda de carga em função da velocidade de entrada	85
Figura 5.19	Mapa da fração volumétrica da fase sólida 1 ($d_p = 12,42 \mu\text{m}$)	86
Figura 5.20	Mapa da fração volumétrica da fase sólida 2 ($d_p = 5,97 \mu\text{m}$)	87
Figura 5.21	Mapa da fração volumétrica da fase sólida 3 ($d_p = 2,7 \mu\text{m}$)	87
Figura 5.22	Desenho esquemático dos ciclones C1a, C1b, C1c e C1d	89
Figura 5.23	Perda de carga dos ciclones	91
Figura 5.24	Eficiência de coleta dos ciclones	92
Figura 5.25	Mapas de velocidade tangencial: Ciclones C1a, C1b e C1d	93
Figura 5.26	Mapas de pressão: Ciclones C1a, C1b e C1d	93
Figura 5.27	Mapas de fração volumétrica: Ciclones C1a, C1b e C1d	94

Figura 6.1	Torre de ciclones	96
Figura 6.2	Malha numérica	99
Figura 6.3	Eficiência de coleta – Corrente A	101
Figura 6.4	Eficiência de coleta – Corrente B	101
Figura 6.5	Perda de carga em função do diâmetro da partícula - Corrente A	102
Figura 6.6	Perda de carga em função do diâmetro da partícula - Corrente B	103
Figura 6.7	Perfil de velocidade tangencial para o ciclone C1A	103
Figura 6.8	Perfil de velocidade tangencial para o ciclone C1B	104
Figura 6.9	Perda de carga (média) – Corrente A	105
Figura 6.10	Perda de carga (média) – Corrente B	105
Figura 6.11	Definição das dimensões dos ciclones	108
Figura 6.12	Malha numérica dos ciclones C1 e C2	111
Figura 6.13	Eficiência de coleta para os ciclones C1 e C2	113
Figura 6.14	Perda de carga - Ciclone C1	113
Figura 6.15	Perda de carga - Ciclone C2	114
Figura 6.16	Mapas de velocidade tangencial (m/s)	115
Figura 6.17	Mapas de velocidade axial (m/s)	116
Figura 6.18	Mapas de pressão (mBar)	117
Figura 6.19	Mapas de fração volumétrica (%)	117

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Constantes do modelo k- ϵ	26
Tabela 3.2	Definições geométricas dos ciclones	30
Tabela 5.1	Condições de operação – Caso 01	62
Tabela 5.2	Dimensões do ciclone em mm	71
Tabela 5.3	Condições de operação	73
Tabela 5.4	Tempo computacional em função do tamanho da malha	76
Tabela 5.5	Reconstituição dos dados de distribuição de tamanhos das partículas	78
Tabela 5.6	Definição do diâmetro da partícula e fração volumétrica	78
Tabela 5.7	Condições de operação	88
Tabela 5.8	Dimensões dos ciclones	90
Tabela 6.1	Dimensões dos ciclones	97
Tabela 6.2	Condições de operação – Corrente A	98
Tabela 6.3	Condições de operação – Corrente B	98
Tabela 6.4	Reconstituição dos dados de distribuição do tamanho das partículas	98
Tabela 6.5	Dimensões dos ciclones	109
Tabela 6.6	Condições de operação	109
Tabela 6.7	Propriedades da fase gasosa e sólida considerada neste estudo	110

Nomenclatura

Letras Latinas

a	coeficiente da equação de discretização
B	coeficiente de interface
b	fonte de massa e parâmetro geométrico
D	tensor taxa de deformação
D	diâmetro
d	diâmetro da partícula
E	rugosidade da parede
F	força resistiva
f	fração volumétrica
G	geração de energia cinética turbulenta
g	campo gravitacional
h	taxa de transferência de calor
k	energia cinética turbulenta
L	comprimento
l	comprimento de mistura
P	ponto central do volume de controle
p	pressão
Q	fluxo volumétrico
q	taxa de transferência de calor
r	coordenada radial
S	termo fonte
T	temperatura
T	tensor tensão
t	tempo
u	velocidade radial
V	volume
v	vetor velocidade

v	velocidade tangencial
w	velocidade axial
y	distância normal as paredes
z	coordenada axial

Letras Gregas

α	coeficiente que define o esquema de interpolação nos termos convectivos
β	coeficiente que define o esquema de interpolação nos termos difusivos
β	coeficiente de interface
ε	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
ϕ	propriedade escalar genérica e esfericidade
κ	constante de Karman
λ	coeficiente de relaxação
μ	viscosidade dinâmica
π	número pi
θ	coordenada tangencial
ρ	massa específica
σ	constante do modelo de turbulência
τ	tempo adimensional

Superscritos

T	indica operação matricial de transposição
T	tensor tensão
ef	valor efetivo
t	propriedade turbulenta
ε	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
k	energia cinética turbulenta

Subscritos

c	relativo a seção cilíndrica do ciclone
co	relativo a seção cônica do ciclone
l	relativo ao tubo de saída de sólido
h	relativo ao diâmetro hidráulico
res	resistiva
r	direção radial
z	direção axial
θ	direção tangencial
ref	referência
en	relativo a entrada do ciclone
s	fase sólida
g	fase gasosa
p	partícula
2D	bidimensional
3D	tridimensional
N	relativo ao ponto situado ao norte do ponto P
n	relativo a face norte do volume de controle
S	relativo ao ponto situado ao sul do ponto P
s	relativo a face sul do volume de controle ou ao tubo de saída de gás
E	relativo ao ponto situado a leste do ponto P
e	relativo a face leste do volume de controle
W	relativo ao ponto situado ao oeste do ponto P
w	relativo a face oeste do volume de controle ou representa proximidade as paredes
P	relativo ao ponto P da malha

Abreviações

CFD	“Computational Fluid Dynamics” ou Fluidodinâmica Computacional
MVF	método dos volumes finitos

SIMPLE algoritmo de acoplamento pressão-velocidade
SIMPLEC algoritmo de acoplamento pressão-velocidade
SIMPLER algoritmo de acoplamento pressão-velocidade
EMB modelo Euleriano Monofásico Bidimensional
EEBB modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional
EELB modelo Euleriano-Euleriano-Lagrangeano Bidimensional
CDS esquema de interpolação
WUDS esquema de interpolação
QUICK esquema de interpolação
UPWIND esquema de interpolação
CYCLO denominação dada ao código CFD desenvolvido nesse trabalho
TDMA “TriDiagonal Matrix Algorithm” – método de solução iterativo de equações
FLUENT código CFD comercial
PHOENIX código CFD comercial
CFX código CFD comercial
FLOW3D código CFD comercial

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo são tecidas considerações sobre a motivação pela escolha do tema do trabalho, os objetivos a serem alcançados e a forma como este trabalho foi desenvolvido.

1.1 Motivação pelo Tema

Coletores centrífugos de pó ou ciclones representam uma das mais simples formas construtivas de equipamentos de processo, e um dos poucos equipamentos encontrados em simples e avançadas aplicações industriais. Por ser um equipamento de baixo custo de investimento, manutenção e de fácil adaptabilidade a uma grande faixa de aplicações, os ciclones são equipamentos seculares amplamente utilizados principalmente na separação de sólidos de uma corrente gasosa.

Antes da década de 1960, os métodos de otimização e projeto de “scale-up” de equipamentos eram empíricos, baseados em experimentos, intuição ou cálculos semi-empíricos, nos quais se utilizavam a similaridade das leis e testes de modelos. Estes métodos empíricos e semi-empíricos, devido a sua simplicidade, são ainda muito utilizados no projeto e avaliação de vários equipamentos utilizados na indústria química como, por exemplo, os ciclones. Estes modelos, devido a sua forte natureza empírica e limitadas faixas de aplicabilidade, geralmente particulares às situações em que foram coletados os dados experimentais, não podem ser aplicados amplamente em condições variáveis, limitando a utilização destes procedimentos em estudos de melhoria de desempenho destes equipamentos.

Já a simulação numérica, que começou inicialmente como uma ferramenta para a análise de problemas físicos em nível de investigação científica, é hoje, devido ao avanço na área computacional, uma ferramenta poderosa para a solução rigorosa de importantes problemas aplicados de engenharia. Com o avanço da simulação numérica, é atualmente possível simular o complexo escoamento multifásico dentro dos ciclones, e desta maneira obter, não apenas os parâmetros de desempenho (perda de carga e eficiência de coleta), mas também os detalhes do escoamento interno destes equipamentos.

Com o desenvolvimento da área da fluidodinâmica computacional (CFD), vários códigos computacionais foram desenvolvidos, como por exemplo: CFX; FLUENT; PHOENICS; FLOW3D, etc.. Estes códigos comerciais são utilizados no projeto e otimização de vários equipamentos utilizados na indústria química, inclusive para o projeto e a otimização de ciclones, substituindo desta maneira, a utilização dos métodos empíricos e semi-empíricos convencionais. Meier (1998), no seu trabalho de doutorado, 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. Na continuação desses estudos (Meier e Mori, 1998 e 1999), propuseram um modelo baseado na abordagem Euleriana-Euleriana, sendo a fase particulada considerada invíscida.

Assim sendo, a proposta deste trabalho é a continuação do desenvolvimento deste código computacional aplicado a simulação multifásica do escoamento em ciclones.

1.2 Objetivos e Escopo do Presente Trabalho

Como apresentado anteriormente, a proposta deste trabalho é a continuação do desenvolvimento do código computacional desenvolvido por Meier (1998), que é utilizado para a simulação multifásica do escoamento em ciclones. Na versão que será apresentada, o código é nomeado de CYCLO, e possui como diferencial a possibilidade de utilização de até três fases sólidas com tamanho de partícula, massa específica e fração volumétrica diferentes. Os objetivos deste trabalho vão desde a verificação e validação do código CYCLO, com seu modelo multifásico euleriano-euleriano e todas as suas 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 foram comparados aos valores experimentais para o escoamento monofásico e para o escoamento multifásico. Como exemplo de aplicação das técnicas de CFD, é apresentado a utilização do código na análise e projeto de ciclones industriais e na análise de desvios operacionais em processos industriais.

O trabalho desenvolvido durante esta tese foi organizado em capítulos com o objetivo de garantir maior clareza sobre os assuntos tratados. No Cap. 1 é apresentada a motivação pelo tema escolhido para desenvolver a tese de doutorado. O Cap. 2 apresenta de uma forma breve o material bibliográfico básico sobre ciclones, avaliação do desempenho e projeto de ciclones, simulação numérica, e a utilização das técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) no projeto e simulação destes equipamentos.

O Cap. 3 discorre sobre a modelagem matemática, na qual é apresentada a abordagem do modelo euleriano-euleriano com suas equações conservativas, hipóteses simplificadoras, as equações constitutivas para o acoplamento fluidodinâmico entre as fases e o modelo híbrido de turbulência. Apresentam-se também as condições iniciais, de contorno e propriedades geométricas. Neste capítulo é apresentada a formulação básica do método dos volumes finitos. Apresentam-se por exemplo, as equações discretizadas, os esquemas numéricos

de interpolação, os algoritmos de acoplamento pressão-velocidade, a técnica de solução segregada do sistema de equações e as características da malha numérica adotada.

O Cap. 4 é reservado para a apresentação da estrutura do código CYCLO, com seus arquivos para construção e geração da malha numérica, cálculo das propriedades termodinâmicas e de transporte do gás, condições operacionais e todas as informações peculiares ao método dos volumes finitos.

No Cap. 5 são apresentados estudos de casos utilizados para a validação do programa CYCLO. O primeiro deles, aplicado ao escoamento monofásico em ciclones, é validado com resultados experimentais e comparado com o código comercial CFX 4.4 da ANSYS. No outro estudo de caso, resultados experimentais do escoamento multifásico são utilizados para validar o modelo bifásico e tetrafásico. Neste capítulo também é apresentado um estudo de ampliação de escala (“scale-up”), em ciclones.

O Cap. 6 apresenta resultados práticos da utilização do código CYCLO na avaliação de ciclones de tamanho industrial. Dois exemplos de aplicação serão discutidos, sendo o primeiro a verificação do desempenho operacional e detecção de anomalias de uma torre de ciclones da indústria de cimento, e o segundo, a avaliação do desempenho de ciclones na separação de carvão e coque do ar, numa unidade industrial de moagem de combustível sólido.

O Cap. 7 traz as principais conclusões e sugestões resultantes deste trabalho.

No Cap. 8 são apresentadas as referências dos artigos publicados e em publicação, produzidos durante o desenvolvimento do trabalho desta tese de Doutorado.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O principal objetivo deste capítulo é apresentar de uma forma breve o vasto material bibliográfico sobre: ciclones, avaliação do desempenho e projeto de ciclones, simulação numérica e utilização das técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) no projeto e simulação destes equipamentos.

2.1 Ciclones

Coletores centrífugos de pó ou ciclones representam uma das mais simples formas construtivas de equipamento de processo, e um dos poucos equipamentos encontrados em simples e avançadas aplicações industriais. Por ser um equipamento de baixo custo de investimento, não possuir partes móveis (baixo custo de manutenção), e possuir fácil adaptabilidade a uma grande faixa de aplicações que vão de pressões de até 500 bar e temperaturas superiores a 1000 °C (Perry, 1997), os ciclones são amplamente utilizados como equipamento de separação gás-sólido e equipamento de troca térmica.

Como equipamento de troca térmica, cabe mencionar como exemplo a utilização de ciclones como pré-aquecedores e calcinadores da “farinha”, matéria-prima utilizada na indústria de cimento, composta por calcário, sílica e argila.

A Figura 2.1, sugerida por Ogawa (1997) e reproduzida por Meier (1998), apresenta esquematicamente o ciclone de fluxo reverso e suas características fenomenológicas. A corrente gás-sólido entra tangencialmente em alta velocidade (6 a 30 m/s) no topo do ciclone e inicia um escoamento giratório devido à forma do ciclone. As partículas são arremessadas contra a parede do cilindro devido à ação da força centrífuga e de inércia, deslizando até a saída no fundo do ciclone

(“Under-Flow”). O gás percorre duas espirais, uma externa descendente junto à parede e, perto do fundo do ciclone, ocorre reversão do escoamento que forma uma espiral interna ascendente de maior velocidade (Shepherd e Lapple, 1939). O gás sai pelo topo através do tubo de imersão (“Vortex-Finder”).

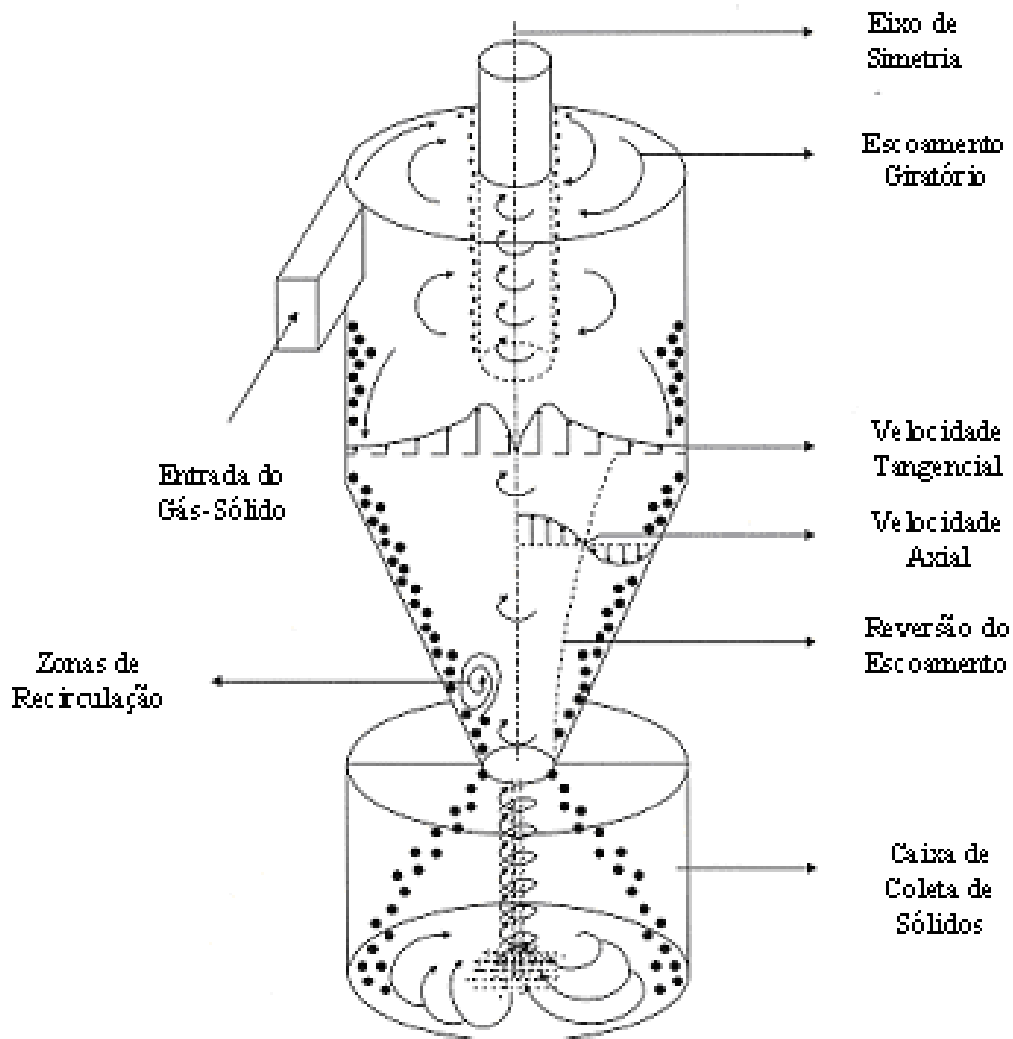


Figura 2.1 Ciclone e suas características fenomenológicas

De acordo com Othmer (1978) e Storch *et al.* (1979), os ciclones podem ser classificados de acordo com sua configuração geométrica (como por exemplo: entrada tangencial e descarga axial; entrada axial e descarga axial; entrada

tangencial e descarga periférica), ou conforme sua eficiência de coleta global (eficiência alta (98-99%), eficiência média (70-80%), e baixa eficiência (50%)). A configuração geométrica com entrada tangencial e descarga axial (Figura 2.1) é a forma mais utilizada nos ciclones, e por isso, esses equipamentos com esse formato são nomeados “ciclones convencionais”.

Os ciclones podem ser utilizados para a separação de partículas sólidas de líquidos ou gases e gotículas de gases. Os ciclones têm sido utilizados industrialmente há aproximadamente 120 anos conforme Othmer (1978), que relata que o primeiro ciclone utilizado para a separação de material particulado foi provavelmente construído no ano de 1885 pela empresa Knickerboker.

Os parâmetros mais importantes de um ciclone para qualquer tipo de separação é a eficiência global de coleta e a perda de carga (Storch *et al.*, 1979). A eficiência de coleta de um ciclone define a sua habilidade de capturar e separar o material particulado, enquanto a perda de carga representa a quantidade de energia que será necessária para fazer isso.

2.2 Avaliação do Desempenho e Projeto de Ciclones

Várias expressões empíricas e semi-empíricas têm sido propostas para a avaliação do desempenho e projeto de ciclones. Essas expressões geralmente são formuladas a partir dos resultados de experimentos e utilizadas para a determinação do desempenho do equipamento, isto é, a determinação da eficiência de coleta e a perda de carga.

Vários pesquisadores, ao longo de anos e até na atualidade, buscaram e buscam aumentar o conhecimento acerca do funcionamento dos ciclones, objetivando definir especificações de projeto e a determinação do desempenho destes equipamentos.

Cabe citar inicialmente o trabalho experimental desenvolvido por Shepherd e Lapple (1939), que estudaram a dinâmica no interior dos ciclones através da determinação de perfis de velocidade e a influência da geometria e carga de sólidos na perda de carga destes equipamentos.

Entre os vários modelos preditivos desenvolvidos para a determinação da eficiência de coleta dos ciclones pode-se citar o trabalho desenvolvido por pesquisadores como Lapple (1950), Stairmand (1951), Barth (1956), Leith e Licht (1972), Dietz (1981), Mothes e Löffler (1988) e Avci e Karagoz (2000).

Para o projeto de ciclones, várias propostas estão à disposição na literatura, sendo que um grupo delas baseia-se no conceito da definição do diâmetro de corte d' . Estes modelos são formulados a partir dos resultados de experimentos que permitem calcular o diâmetro de corte d' . A seguir, é apresentada a metodologia que utiliza a relação empírica de Rosin, Rammler e Intelmann (Walton, 1974), para o dimensionamento de ciclones industriais. Metodologias deste tipo também foram desenvolvidas por Stairmand (1951) e Barth (1956).

A Figura 2.2 apresenta um ciclone do tipo convencional (entrada tangencial e descarga axial) e suas dimensões em razão do diâmetro do cilindro. Para o ciclone do tipo apresentado na Figura 2.2, cujas dimensões guardam entre si as relações indicadas na figura, as seguintes relações empíricas de Rosin, Rammler e Intelmann (Walton, 1974) são válidas:

$$d' = \sqrt{\frac{9\mu_g b}{2\pi NV(\rho_p - \rho_g)}} \quad , \quad (2.1)$$

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu_g b}{\pi NV(\rho_p - \rho_g)}} \quad , \quad (2.2)$$

$$d_{\min} = \frac{d'}{\sqrt{2}}, \quad (2.3)$$

onde:

d' = diâmetro de corte do tamanho de partícula cuja eficiência de coleta é de 50% no ciclone considerado (cm);

d_{\min} = diâmetro da menor partícula coletada pelo ciclone (cm);

b = largura do duto de entrada do ciclone (cm);

μ_g = viscosidade do gás (poise);

N = número de voltas feitas pelo gás no interior do ciclone (igual a 5 para ciclones com as proporções apresentadas na Figura 2.2);

V = velocidade de entrada do gás no ciclone (cm/s) baseada na área $b \times L_e$;

ρ_p = massa específica das partículas (g/cm^3);

ρ_g = massa específica do gás (g/cm^3).

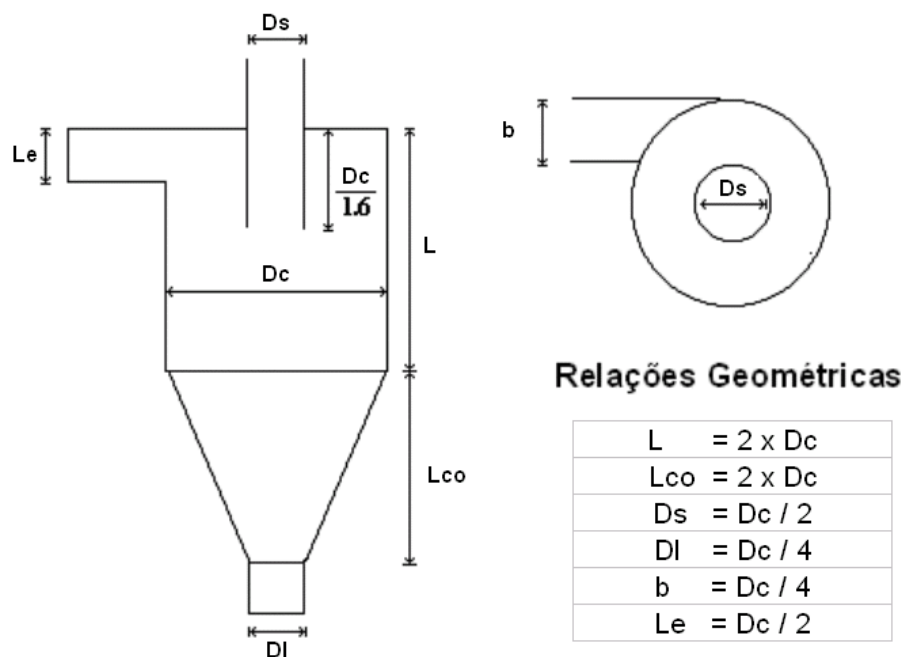


Figura 2.2 Desenho esquemático de um ciclone e suas relações geométricas

Na prática o que se especifica no projeto é a eficiência de separação desejada para partículas de um determinado tamanho. Com auxílio da Figura 2.3, que representa a eficiência de coleta de uma partícula de diâmetro d_p para os ciclones cujas dimensões guardam entre si as relações indicadas na Figura 2.2, e, estabelecido o percentual de coleta para as partículas de tamanho d_p , obtém-se o valor d_p/d' . Com o valor de d' conhecido, calcula-se através da equação (2.1) o valor de b . As demais medidas são calculadas a partir das relações geométricas apresentadas anteriormente. Trata-se de um procedimento iterativo, já que a velocidade V adotada inicialmente deverá ser a mesma resultante do valor calculado com as informações da área da seção de entrada ($b \times L_e$) e a vazão volumétrica dos gases.

A metodologia de projeto de ciclones anteriormente apresentada é desenvolvida em uma base experimental e, portanto, não se pode afirmar que o ciclone projetado possui o melhor desempenho para a aplicação específica necessária.

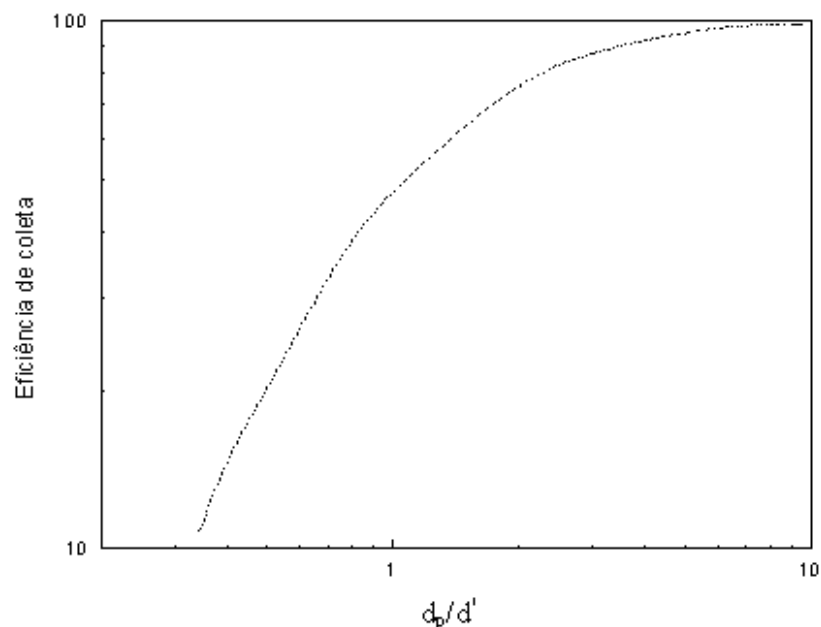


Figura 2.3 Eficiência de coleta

Com a criação do computador digital, diversos códigos computacionais foram desenvolvidos para auxiliar no projeto de novos ciclones. Estes programas utilizam a mesma base empírica e semi-empírica já mencionada anteriormente, mas facilitam o trabalho, pois conseguem acelerar a velocidade dos resultados, já que a maioria das metodologias empregadas utiliza processos iterativos para o projeto dos ciclones.

Um exemplo deste tipo de desenvolvimento é o “software” desenvolvido por Altmeyer *et al.* (2003), o qual permite calcular a eficiência do ciclone para determinada geometria ou determinar a geometria para desejada eficiência de coleta. Os cálculos podem ser realizados com quatro modelos diferentes: Barth (Bohnet, *et al.*, 1997), Leith e Licht (1972), Mothes e Löffler (1988) e Lorenz (1994). Os dois primeiros modelos são baseados no balanço de forças e os dois seguintes em uma combinação do balanço de forças e tempo de residência.

2.3 Simulação Numérica

O conhecimento e a compreensão dos princípios básicos da dinâmica dos fluidos são essenciais na otimização e no projeto dos equipamentos. Especificamente na Engenharia Química, equipamentos como ciclones, trocadores de calor, colunas de destilação, secadores, atomizadores, ventiladores, etc., podem ser otimizados e projetados com o auxílio da dinâmica dos fluidos.

Durante os séculos XVIII e XIX, significantes trabalhos foram realizados na tentativa de descrever matematicamente a dinâmica dos fluidos. Daniel Bernoulli (1700-1782) derivou as famosas equações de Bernoulli, e Leonhard Euler (1707-1783) propôs as equações de Euler, as quais descrevem a conservação de “momentum” para um fluido invíscido e a equação da conservação de massa. Dois outros pesquisadores também contribuíram para o entendimento da dinâmica dos fluidos, o francês Claude Louis Marie Henry Navier (1785-1836) e o irlandês

George Gabriel Stokes (1819-1903), que introduziram o conceito de viscosidade nas equações de Euler, resultando, então, nas famosas equações de Navier-Stokes. Estas equações diferenciais propostas há quase 200 anos são a base da dinâmica dos fluidos ou da moderna fluidodinâmica computacional (CFD).

A solução analítica das equações da dinâmica dos fluidos (equações de Navier-Stokes) sempre esteve associada a grandes dificuldades matemáticas. Através da teoria da camada limite proposta por Prandtl em 1904, foi possível simplificar estas equações num conjunto de equações diferenciais cuja solução analítica é possível para algumas situações em que a geometria é simples e o escoamento é laminar. Nos problemas práticos da Engenharia, os escoamentos são geralmente turbulentos, tornando difícil a solução analítica das equações.

A partir da década de 1940, com a criação do computador digital, iniciou-se o desenvolvimento dos métodos numéricos para a solução das equações de Navier-Stokes. A simulação numérica desenvolveu-se aceleradamente a partir da década de 1960, mas teve um impressionante desenvolvimento nos últimos anos (Maliska 1995, Lixing 1993).

De uma maneira simplista, a simulação numérica pode ser definida no campo da Engenharia Química como a simulação por computador das equações baseada nos princípios da fluidodinâmica computacional (CFD - “Computational Fluid Dynamics”) e na transferência de calor, que nada mais é do que a resolução das equações diferenciais parciais não-lineares de conservação de massa, “momentum”, energia, espécies e outras quantidades, através de procedimento numérico.

O procedimento da simulação numérica pode ser descrito pelas seguintes etapas (Lixing, 1993):

Estabelecimento das equações de conservação:

O primeiro passo na simulação numérica é estabelecer as equações de conservação, baseadas nos princípios da dinâmica dos fluidos, da transferência de calor e da transferência de massa. Sendo estas, por exemplo, a equação da continuidade, equação do “momentum”, equação da energia e equações das espécies. Estas, por sua vez, constituem um sistema de equações diferenciais

parciais não-lineares, as quais não podem ser resolvidas analiticamente, mas somente através dos métodos numéricos.

Fechamento do modelo:

Usualmente, as equações básicas não são um sistema fechado. Como por exemplo, no escoamento turbulento, as correlações dos termos de tensão turbulenta não são conhecidas. Para resolver este tipo de problema é necessário desenvolver modelos teóricos baseados nos conceitos físicos ou em alguma hipótese.

Especificação das condições de contorno:

Nesta etapa é necessário determinar o domínio computacional e especificar, de acordo com a geometria, as condições de contorno na entrada, saída, parede, superfícies livres (se existirem) e no eixo (simétrico ou não).

Obtenção das equações aproximadas:

Nos métodos numéricos, as equações diferenciais parciais podem ser discretizadas. Em muitos casos o método dos volumes finitos (MVF) é utilizado na modelagem dos fluxos. As equações em volumes finitos são obtidas partindo-se da equação diferencial na forma conservativa, integrando-a sobre o volume de controle, no espaço e no tempo. Para a avaliação das derivadas nas interfaces do volume de controle é necessário o uso das funções de interpolação (diferenças centrais, esquemas tipo upwind ou wuds, etc.).

Procedimento de solução:

Há vários procedimentos para a solução das equações discretizadas, os quais dependerão do tipo de formulação envolvida: escoamento compressível ou incompressível. Se a formulação for do tipo incompressível haverá um forte acoplamento entre a pressão e a velocidade dificultando a convergência. Neste tipo de problema, um dos primeiros métodos desenvolvidos foi o SIMPLE

(Patankar e Spalding 1972). Deste método derivaram muitos outros como o SIMPLER, SIMPLEC, etc.

Solução do sistema linear de equações:

Os métodos de solução podem ser classificados em diretos ou iterativos. Dos métodos iterativos o algoritmo de Thomas ou TDMA (“TriDiagonal Matrix Algorithm”) é o mais conhecido e o usualmente utilizado em conjunto com o método SIMPLE.

Desenvolvimento e compilação do código computacional:

O próximo passo é o desenvolvimento do código computacional que deverá contemplar todas as etapas acima descritas.

Comparação das previsões com os experimentos:

Após o programa ter sido exaustivamente testado, para eliminar todos os erros de programação, os resultados obtidos deverão ser comparados com medições experimentais.

2.4 Utilização das Técnicas de CFD em Ciclones

Atualmente, existe um grande número de publicações que utilizam as técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD) como ferramenta para a avaliação macroscópica e microscópica de diversos equipamentos utilizados na indústria em geral. Os ciclones também são alvos desta busca incessante de informações sobre o real funcionamento destes equipamentos. Esta descoberta deverá possibilitar a otimização e o projeto preciso destes equipamentos, que ainda nos dribla com sua tão complexa dinâmica.

Diversos trabalhos publicados apresentam uma revisão deste tópico, sendo utilizados neste trabalho como material de consulta para a compreensão da

evolução das técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD) os trabalhos de revisão desenvolvidos por Meier (1998), Peres (2002) e Bernardo (2005).

Esses pesquisadores, dentre outros (Hoekstra *et al.*, 1999) mencionam como marco inicial o estudo pioneiro realizado por Boysan *et al.* (1982), que desenvolveram um modelo capaz de prever, além do desempenho dos ciclones, isto é, a perda de carga e a eficiência de coleta, a dinâmica interna destes equipamentos através da determinação dos perfis de velocidade. Neste trabalho, os autores utilizaram uma abordagem euleriana para a fase gasosa e lagrangeana para a descrição da trajetória das partículas, resolvendo o modelo considerando as fases desacopladas, isto é, não há influência da fase dispersa (fase sólida) sobre a fase contínua (fase gasosa). Outra simplificação adotada pelos autores foi a consideração do modelo como sendo bidimensional com simetria no eixo, justificando esta adoção no fato de que o ganho resultante da redução do esforço computacional compensa a perda de precisão com o modelo adotado. O modelo de turbulência utilizado foi uma combinação dos tensores algébricos de Rotta (1951) e Rodi (1976) com o modelo κ - ϵ padrão (Launder e Spalding, 1974). O método numérico empregado foi o método dos volumes finitos.

Outros autores como Zhou e Soo (1990), Lixing (1993) e Madsen *et al.* (1994) também utilizaram a abordagem euleriana-lagrangeana sem acoplamento entre as fases e a simplificação do modelo para bidimensional como proposto por Boysan *et al.* (1982).

A partir do trabalho pioneiro de Boysan *et al.* (1982), diversos autores desenvolveram trabalhos utilizando as técnicas da fluidodinâmica computacional aplicada a ciclones. Cabe neste contexto, mencionar o trabalho realizado por Meier (1998) em sua tese de doutorado, que desenvolveu um código computacional específico para ciclones utilizando-se do método dos volumes finitos com acoplamento pressão-velocidade (fluido incompressível), e malha numérica deslocada para solução segregada das equações do modelo. O código possui um modelo geral que é particularizado a partir de hipóteses adicionais, dando origem a três modelos distintos. O primeiro é dedicado à simulação do escoamento monofásico (gás isento de partículas) – Modelo Euleriano Monofásico

Bidimensional (EMB). Os outros dois modelos tratam do escoamento gás-partículas, sendo um com abordagem euleriana – Modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional (EEBB), e o outro com abordagem lagrangeana – Modelo Euleriano-Euleriano-Lagrangeno Bidimensional (EELB). O modelo EEBB considera que as partículas podem ser caracterizadas como esféricas e com um diâmetro médio constante, e que o aglomerado de partículas se comporta como um fluido invíscido, permitindo desta maneira atribuir efeitos da fase sólida sobre a fase gasosa. Já com o modelo EELB torna-se possível a predição da trajetória das partículas em função do seu diâmetro e de sua posição inicial na entrada do ciclone, e desta forma predizer a eficiência de coleta do ciclone.

Meier e Mori (1998 e 1999), na continuação dos estudos sobre ciclones, propuseram um modelo baseado na abordagem Euleriana-Euleriana, sendo a fase particulada considerada invíscida. Para o modelo de turbulência, os autores apresentam um modelo híbrido composto de uma combinação do modelo $k\epsilon$ padrão para os componentes radiais e axiais do tensor de Reynolds, e, para os componentes tangenciais, por intermédio da teoria do comprimento de mistura de Prandtl. O escoamento da fase sólida foi considerado invíscido e a transferência de quantidade de movimento interfases foi predita pela adoção de um modelo constitutivo de força de arraste.

Diversos trabalhos com ciclones têm sido realizados utilizando-se códigos comerciais (Griffiths e Boysan, 1995; Cristea e Coghe, 1998; Nowakowski et al, 2000; Peres, 2002 e Bernardo, 2005). Os códigos comerciais baseados no método dos volumes finitos mais utilizados atualmente são o CFX, o FLUENT e o PHOENICS.

CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA E PROCEDIMENTO NUMÉRICO

Neste capítulo apresenta-se a abordagem matemática e a metodologia numérica utilizada no desenvolvimento de um modelo fluidodinâmico tridimensional simétrico para o escoamento gás-sólido turbulento em ciclones, que resultou na implementação de um código de fluidodinâmica computacional dedicado a predição do desempenho de ciclones, o código CYCLO.

3.1 Modelagem Matemática

O código CYCLO é o resultado da aprimoração de versões anteriores desenvolvidas por Meier (1998) em seu trabalho de doutorado sobre o desenvolvimento de um modelo geral para a simulação de ciclones. No desenvolvimento deste estudo, Meier (1998), propôs e estudou os modelos euleriano-euleriano e euleriano-euleriano-lagrangeano como uma forma de abordagem para representar o escoamento fluidodinâmico em ciclones. Os bons resultados obtidos com o modelo euleriano-euleriano (Meier, 1998) foram determinantes para que esta abordagem fosse assumida como padrão adotado no código computacional CYCLO.

Segundo Meier (1998), as principais hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos fluidodinâmicos multifásicos propostos na literatura (por exemplo: Boysan *et al.* (1982), Zhou and Soo (1990), Zhou (1993), Madsen *et al.* (1994) e Gidaspow (1994)), são a hipótese do contínuo e a interpenetrabilidade das fases.

No domínio do contínuo, todas as fases envolvidas são consideradas como matéria contínua, negligenciando-se todas as características moleculares da

matéria. A hipótese da interpenetrabilidade das fases complementa a hipótese do contínuo analisando as fases numa escala espacial um pouco acima da microscópica (mas ainda longe da macroscópica), de maneira que as fases possam ocupar o mesmo volume no espaço ao mesmo tempo, através da sua interpenetração. Isto confere a possibilidade de cada fase possuir suas próprias propriedades médias volumétricas de transporte como velocidade, temperatura, concentração e propriedades turbulentas num domínio espacial contínuo. Ou seja, as propriedades de transporte para todas as fases podem ser calculadas num mesmo ponto do espaço e ao mesmo tempo através de uma média volumétrica (Zhou, 1993).

Para as fases denominadas de particuladas, atribui-se um comportamento fluidodinâmico pela hipótese de que na presença de fases fluidas reais (líquidos e gases), as partículas apresentam características dinâmicas semelhantes àsquelas dos fluidos.

Sendo assim, as equações de conservação das propriedades de transporte das fases envolvidas podem ser escritas num referencial euleriano, na forma contínua integral ou diferencial. Termos adicionais de transferência de momentum interfases são incluídos para se efetuar o acoplamento entre as fases.

Com base nos argumentos apresentados anteriormente é que Meier (1998) desenvolveu uma proposta de modelagem fluidodinâmica multifásica adotada pelo código CYCLO e que será apresentada a seguir.

Como ponto de partida, consideremos a presença de dois tipos de fluidos: os fluidos reais e os fluidos hipotéticos. Os fluidos hipotéticos são aqueles que adquirem comportamento fluidodinâmico devido às interações físico-químicas com os fluidos reais. O modelo multifásico considera a existência de fluidos reais e fluidos hipotéticos que estabelecem entre si transferências de massa, de quantidade de movimento, e admitem sua interpenetrabilidade.

No modelo desenvolvido, a hipótese do contínuo e a interpenetrabilidade das fases é aceita e adotada. O fluido real, o fluido hipotético e os turbilhões provenientes do escoamento turbulento do fluido real possuem comportamento contínuo. As fases podem ocupar o mesmo volume do espaço e ao mesmo tempo,

de forma a possuir suas próprias propriedades de transporte no mesmo ponto do espaço e ao mesmo tempo.

O modelo multifásico euleriano-euleriano adotado pelo código CYCLO pressupõe ainda as seguintes hipóteses simplificadoras:

- três diferentes fases sólidas podem ser representadas cada uma por um tamanho de partícula, massa específica e fração volumétrica;
- o escoamento é diluído de forma que o tensor de Reynolds sobre a fase particulada possa ser negligenciado, conferindo dessa maneira, um escoamento do tipo invíscido para a fase sólida;
- não há interação partícula-partícula;
- a simetria no escoamento é alcançada rapidamente logo após a seção de entrada assimétrica (entrada em voluta ou tangencial), tornando possível a utilização de simetria no eixo e aplicação de um modelo 3D-Simétrico;
- a força gravitacional atua somente na direção axial do ciclone;
- o escoamento é considerado incompressível e isotérmico;
- a força de pressão atua somente sobre a fase gasosa;
- a turbulência na fase gasosa é anisotrópica e pode ser representado por um modelo de turbulência híbrido composto de uma combinação do modelo $k-\epsilon$ padrão para os componentes radiais e axiais do tensor de Reynolds, e, para os componentes tangenciais por intermédio da teoria do comprimento de mistura de Prandtl; e
- a transferência de quantidade de movimento gás-sólido é predita pela adoção de um modelo constitutivo de força de arraste.

3.1.1 Equações da conservação

As equações de transporte, conhecidas como equações médias temporais de Navier-Stokes, são utilizadas neste trabalho para representar o escoamento fluidodinâmico em ciclones. Contudo, nos escoamentos multifásicos, 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.

Em notação vetorial, sob o enfoque euleriano, as equações da conservação de massa e movimento, sob a decomposição de Reynolds podem ser escritas como segue:

- **Conservação da massa da fase gasosa**

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

- **Conservação da massa da fase sólida**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_{s1} \rho_{s1}) + \nabla \cdot (f_{s1} \rho_{s1} \mathbf{v}_{s1}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(f_{s2} \rho_{s2}) + \nabla \cdot (f_{s2} \rho_{s2} \mathbf{v}_{s2}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(f_{s3} \rho_{s3}) + \nabla \cdot (f_{s3} \rho_{s3} \mathbf{v}_{s3}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

- **Conservação da quantidade de movimento para a fase gasosa**

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -f_g \nabla \cdot (\mathbf{T}_g^{ef}) + f_g \rho_g \mathbf{g} - \nabla p + \sum_{i=1}^3 (\mathbf{F}_{res})_{g,si} \quad (3.3)$$

- **Conservação da quantidade de movimento para a fase sólida**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_{s1} \rho_{s1} \mathbf{v}_{s1}) + \nabla \cdot (f_{s1} \rho_{s1} \mathbf{v}_{s1} \mathbf{v}_{s1}) &= f_{s1} \rho_{s1} \mathbf{g} - (\mathbf{F}_{res})_{s1,g} \\ \frac{\partial}{\partial t}(f_{s2} \rho_{s2} \mathbf{v}_{s2}) + \nabla \cdot (f_{s2} \rho_{s2} \mathbf{v}_{s2} \mathbf{v}_{s2}) &= f_{s2} \rho_{s2} \mathbf{g} - (\mathbf{F}_{res})_{s2,g} \\ \frac{\partial}{\partial t}(f_{s3} \rho_{s3} \mathbf{v}_{s3}) + \nabla \cdot (f_{s3} \rho_{s3} \mathbf{v}_{s3} \mathbf{v}_{s3}) &= f_{s3} \rho_{s3} \mathbf{g} - (\mathbf{F}_{res})_{s3,g} \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.1.2 Equações constitutivas

Para o fechamento do modelo fluidodinâmico anteriormente descrito e resolução das equações, são necessárias algumas definições que são apresentadas e discutidas a seguir.

No modelo acima proposto, a pressão na fase particulada não foi considerada, pois o modelo não pressupõe as colisões partícula-partícula.

Modelo de turbulência

As equações anteriores podem ser resolvidas para os valores médios de velocidade e pressão somente quando o tensor tensão de Reynolds ou tensor turbulento (\mathbf{T}_g^{ef}) for modelado de alguma maneira. Este tensor turbulento relaciona as flutuações com as propriedades médias temporais.

Speziale (1991) apresenta uma ampla revisão dos modelos de turbulência traçando um perfil histórico do avanço nesta área.

A turbulência, passados muitos anos de pesquisas, ainda continua sendo um grande desafio para os pesquisadores, pois os escoamentos turbulentos são instáveis e contém flutuações que são dependentes do tempo e do espaço.

Muitos pesquisadores acreditam que a física básica da turbulência pode ser descrita pelas equações de Navier-Stokes, no entanto, as limitações tecnológicas (capacidade dos computadores), não permitem a resolução direta para escoamentos turbulentos complexos de interesse tecnológico.

Delineando-se o estado da arte do estudo da turbulência, pode-se partir dos trabalhos pioneiros de Osborne Reynolds em 1895, que estabeleceu os conceitos iniciais de escoamento turbulento, e os de Boussinesq em 1877 com a introdução do conceito de viscosidade turbulenta, passando por pesquisas que visaram o aprimoramento destes conceitos, tais como Prandtl, Von Karman, Rotta, e obtém-se em mais de um século de pesquisas o desenvolvimento de diversos modelos de turbulência.

Meier (1998) desenvolveu um modelo anisotrópico híbrido de turbulência a partir da combinação de um modelo de duas equações ($k-\epsilon$) com um modelo de zero equações (comprimento de mistura de Prandtl), similar aquele proposto por Duggins e Frith (1987), para representar o escoamento vorticial em ciclones. Este modelo é atualmente utilizado pelo código CYCLO 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. Esta idéia teve como fundamento a hipótese que os turbilhões, assim como as moléculas colidem e

trocam “momentum”. Para um fluido incompressível este conceito pode ser escrito como:

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

onde a taxa de deformação é dada por:

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

e a viscosidade efetiva é uma combinação da viscosidade molecular e turbulenta:

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

Na Equação (3.7), a viscosidade turbulenta, $\mu^{(t)}$, pode ser predita de forma anisotrópica através de uma combinação do modelo k- ϵ 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 turbilhonar dos componentes tangenciais pode ser escrito como segue:

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

onde o primeiro termo no lado direito da equação (3.8), $(\mu^{(t)})_{en}$, 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 $(\mu^{(t)})_{en}$ sugerida por Pericleous (1987) é:

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

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 programa como padrão.

Os componentes axiais e radiais da viscosidade turbulenta podem ser calculados pelo modelo k-ε 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 é necessário ainda duas equações adicionais de conservação, uma para k_g e outra para ϵ_g :

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

e

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

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

$$G_g = -\mathbf{T}_g^{(t)} : \nabla \mathbf{v}_g \quad (3.13)$$

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

Tabela 3.1 Constantes do modelo k-ε (Meier, 1998)

Constante	C_μ	C_1	C_2	σ^k	σ^ϵ
Valor	0,09	1,44	1,92	1,00	1,30

Maiores detalhes sobre os modelos podem ser encontrados em Launder e Spalding (1974), Speziale (1991) e Meier (1998).

Força de interação entre as fases (gás-sólido)

O modelo implementado no código CYCLO não considera a interação sólido-sólido, mas somente a interação gás-sólido.

Negligenciando-se as forças de colisão, as forças de interação ficam compostas somente pela força de arraste entre as fases (Gidaspow, 1994). Um modelo clássico para a força resistiva pode ser expresso da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{F}_{\text{res}})_{g,s1} &= (\mathbf{F}_{\text{res}})_{s1,g} = \beta_{g,s1} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s1}) = \beta_{s1,g} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s1}) \\
 (\mathbf{F}_{\text{res}})_{g,s2} &= (\mathbf{F}_{\text{res}})_{s2,g} = \beta_{g,s2} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s2}) = \beta_{s2,g} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s2}) \\
 (\mathbf{F}_{\text{res}})_{g,s3} &= (\mathbf{F}_{\text{res}})_{s3,g} = \beta_{g,s3} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s3}) = \beta_{s3,g} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s3})
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

onde $\beta_{g,s}$ é o coeficiente de interface entre a fase particulada e a fase gasosa e pode ser predito para escoamentos em fase densa ($f_g < 0,8$), ou seja, quando a fração volumétrica da fase gasosa é menor que 0,8, através da lei de Darcy (Gidaspow, 1994):

$$\begin{aligned}
\beta_{g,s1} &= 150\mu_g \left(\frac{f_{s1}}{f_g d_p \phi_p} \right)^2 + 1,75 \frac{\rho_g f_{s1} |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s1}|}{d_p \phi_p} \\
\beta_{g,s2} &= 150\mu_g \left(\frac{f_{s2}}{f_g d_p \phi_p} \right)^2 + 1,75 \frac{\rho_g f_{s2} |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s2}|}{d_p \phi_p} \\
\beta_{g,s3} &= 150\mu_g \left(\frac{f_{s3}}{f_g d_p \phi_p} \right)^2 + 1,75 \frac{\rho_g f_{s3} |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s3}|}{d_p \phi_p}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

na qual d_p é o diâmetro das partículas, ϕ_p é a esfericidade e $|\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|$ é o módulo da velocidade relativa entre as fases. Para escoamentos em fase diluída onde $f_g > 0,8$, um modelo proposto por Wen e Yu (Gidaspow, 1994), relaciona o coeficiente de interface com o coeficiente de arraste, C_D , da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\beta_{g,s1} &= \frac{3}{4} C_D \frac{f_g \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s1}| f_{s1}}{d_p \phi_p} \\
\beta_{g,s2} &= \frac{3}{4} C_D \frac{f_g \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s2}| f_{s2}}{d_p \phi_p} \\
\beta_{g,s3} &= \frac{3}{4} C_D \frac{f_g \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s3}| f_{s3}}{d_p \phi_p}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Na literatura há um grande número de correlações empíricas para o cálculo do coeficiente de arraste em função do número de Reynolds. Dentre as muitas correlações encontradas na literatura, faz-se uso daquela proposta por Coelho e Massarani (Massarani, 1997), válida para $Re_p < 50.000$ e $0,65 > \phi_p > 1$:

$$\begin{aligned}
C_{Dg,s1} &= \left[\left(\frac{24}{K_{1s1} Re_{ps1}} \right)^{0,85} - K_{2s1}^{0,85} \right]^{1,18} \\
C_{Dg,s2} &= \left[\left(\frac{24}{K_{1s2} Re_{ps2}} \right)^{0,85} - K_{2s2}^{0,85} \right]^{1,18} \\
C_{Dg,s3} &= \left[\left(\frac{24}{K_{1s3} Re_{ps3}} \right)^{0,85} - K_{2s3}^{0,85} \right]^{1,18}
\end{aligned} \tag{3.17}$$

onde:

$$\begin{aligned}
K_{1s1} &= 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi_{ps1}}{0,065} \right) \\
K_{1s2} &= 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi_{ps2}}{0,065} \right) \\
K_{1s3} &= 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi_{ps3}}{0,065} \right)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}
K_{2s1} &= 5,31 - 4,88 \phi_{ps1} \\
K_{2s2} &= 5,31 - 4,88 \phi_{ps2} \\
K_{2s3} &= 5,31 - 4,88 \phi_{ps3}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

e

$$\begin{aligned}
Re_{ps1} &= \frac{\rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{ps1}| d_{ps1}}{\mu_g} \\
Re_{ps2} &= \frac{\rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{ps2}| d_{ps2}}{\mu_g} \\
Re_{ps3} &= \frac{\rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{ps3}| d_{ps3}}{\mu_g}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Propriedades Geométricas

A Figura 3.1 ilustra esquematicamente a geometria utilizada pelo código CYCLO.

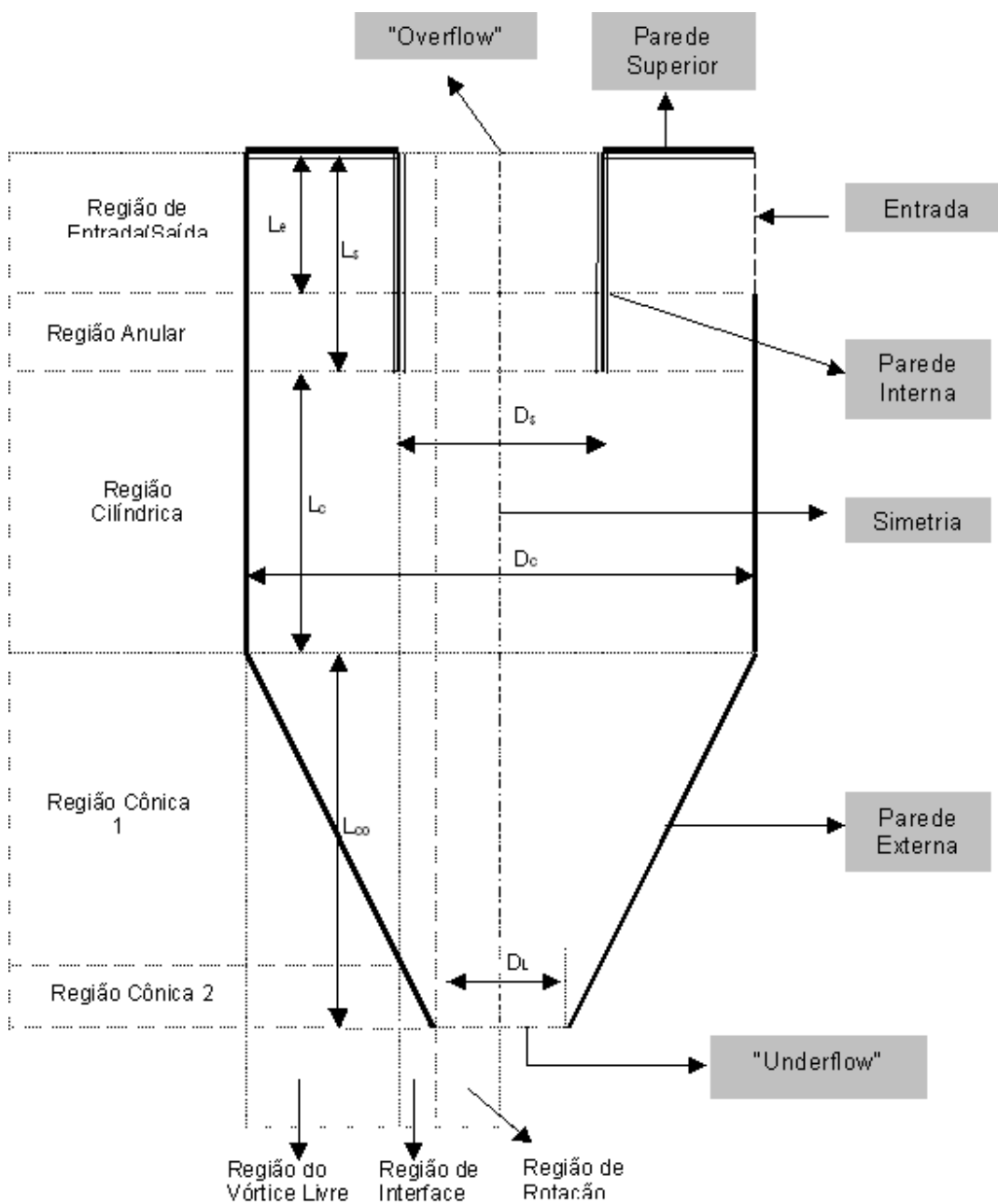


Figura 3.1 Desenho esquemático de um ciclone

Nesta figura (3.1) são indicadas as regiões que formarão os blocos na construção da malha numérica (borda esquerda e inferior), as fronteiras de aplicação das condições de contorno (borda direita e superior em destaque nas caixas de texto), e a nomenclatura utilizada para as grandezas necessárias para a especificação geométrica do equipamento.

A Tabela 3.2 resume e define as grandezas geométricas utilizadas pelo código computacional para os ciclones.

Tabela 3.2 Definições geométricas dos ciclones

Grandeza	Definição
L_e	Altura da seção retangular de entrada
L_s	Altura do tubo de saída superior do ciclone (“overflow”)
L_c	Altura da região cilíndrica do ciclone
L_{co}	Altura da região cônica do ciclone
D_s	Diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone (“overflow”)
D_c	Diâmetro do ciclone
D_L	Diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone (“underflow”)
b	Profundidade da seção retangular de entrada

Simetria na entrada do ciclone

Para se efetuar a transformação teórica da entrada essencialmente tridimensional assimétrica dos ciclones, para uma entrada tridimensional simétrica, Meier (1998) adotou a sugestão de diversos autores (Boysan *et al.*, 1982; Zhou e Soo, 1990; Dyakowski e Willians, 1993; Madsen *et al.*, 1994), que sugeriram a

transformação da seção quadrada da entrada em uma seção circunferencial simétrica.

A Figura 3.2 ilustra esta transformação.

Adotando-se a transformação, introduz-se um fluxo radial de massa, necessário para se satisfazer a equação de conservação da massa na entrada simétrica do ciclone.

Os componentes de velocidade na entrada do ciclone são calculados pelas expressões:

$$\begin{aligned} (u_g)_{en} &= \frac{Q_g}{(A_{3D.SIM})_{en} (f_g)_{en}} & (u_s)_{en} &= \frac{Q_s}{(A_{3D.SIM})_{en} (f_s)_{en}} \\ (v_g)_{en} &= \frac{Q_g}{(A_{3D.ASSIM})_{en} (f_g)_{en}} & (v_s)_{en} &= \frac{Q_s}{(A_{3D.ASSIM})_{en} (f_s)_{en}} \\ (w_g)_{en} &= 0 & (w_s)_{en} &= 0 \end{aligned} \quad \text{e} \quad (3.21)$$

onde:

$$\begin{aligned} (A_{3D.SIM})_{en} &= \pi D_c L_e \\ (A_{3D.ASSIM})_{en} &= b L_e \end{aligned} \quad (3.22)$$

com $(A_{3D.SIM})_{en}$ sendo a área da seção circunferência da entrada simétrica do ciclone e, $(A_{3D.ASSIM})_{en}$, a área da seção retangular da entrada assimétrica.

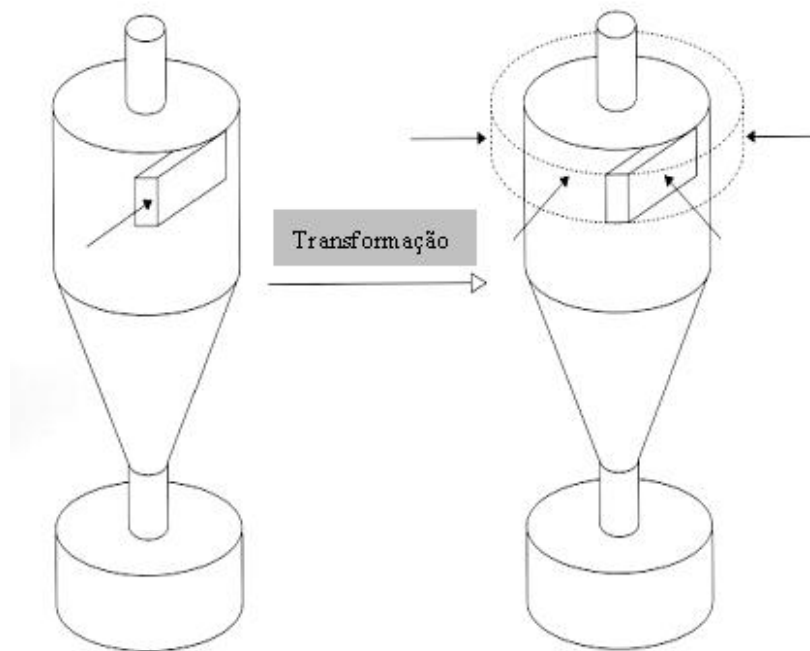


Figura 3.2 Ilustração da transformação da entrada assimétrica para uma entrada simétrica

Funções de parede

É notória na literatura a introdução no modelo fluidodinâmico de funções de caráter empírico, nas regiões próximas às superfícies sólidas (paredes), como uma forma de introduzir efeitos de natureza cisalhante, presentes naquelas regiões.

Para o modelo $k-\varepsilon$ é comum introduzir funções derivadas do perfil universal de velocidade de um fluido adjacente a parede, para o cálculo dos valores de k e ε naquelas regiões.

O modelo apresentado por Launder e Spalding (1974) é utilizado pelo código CYCLO e será apresentado a seguir.

$$\begin{aligned} (k_g)_w &= \frac{v_g^{*2}}{C_\mu^{1/2}} \\ (\varepsilon_g)_w &= \frac{(C_\mu^{1/2} (k_g)_w)^{3/2}}{\kappa y_w} \end{aligned} \quad (3.23)$$

com

$$|v_g| = \frac{v_g^*}{\kappa} \ln \left(\frac{E \bar{\rho}_g y_w v_g^*}{\mu_g^{(1)}} \right) \quad \text{e} \quad |v_g| = \sqrt{v_g^2} \quad (3.24)$$

Nas equações anteriores: o subscrito w indica uma posição próxima à parede; v_g^* é uma velocidade de atrito; κ é a constante de Karman ($\kappa=0,4$); y_w é a distância da parede até a posição imediatamente adjacente; e E representa a rugosidade da parede ($E=9,0$ para paredes lisas).

Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais utilizadas no código CYCLO para as simulações numéricas são as condições de partida do equipamento considerando o escoamento monofásico, onde todos os componentes de velocidade são considerados zero e o campo de pressão sendo a pressão atmosférica. Para o escoamento multifásico, os perfis do escoamento monofásico obtidos anteriormente em condições de regime permanente são utilizados como condições iniciais com entrada abrupta da fase sólida. Este tipo de condição inicial retrata a condição de “start-up” de ciclones na indústria.

A seguir apresentam-se três tipos de condições de contorno plausíveis para as fronteiras do ciclone apresentado na Figura 3.1.

Entrada

Para a entrada, adota-se o modelo de entrada bidimensional apresentado anteriormente para se caracterizar os componentes de velocidade resultantes da transformação 3-D assimétrica para 3-D simétrica.

Para as propriedades turbulentas, utilizando-se a mesma transformação usada para o componente tangencial de velocidade e expressões empíricas disponibilizadas na literatura (Dyakowski e Willians (1993), Madsen et al (1994)), tem-se:

$$\begin{aligned} (k_g)_{en} &= 0,005 (v_g)_{en}^2 \\ (\epsilon_g)_{en} &= \frac{C_\mu (k_g)_{en}^{3/2}}{\left(\frac{D_c - D_s}{2}\right)} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Parede externa, superior e interna

Nesta fronteira utilizam-se diferentes tipos de condições de contorno dependendo da variável a ser analisada.

Para as fases que se comportam como fluidos reais, condições de não-deslizamento (“No-Slip”) são aplicáveis:

$$u_g = v_g = w_g = 0 \quad . \quad (3.26)$$

Nos escoamentos giratórios de alta velocidade do tipo daqueles que ocorrem em ciclones, há um fenômeno conhecido por preservação da vorticidade que é garantido pela existência de uma região próxima a parede, onde o escoamento comporta-se como um escoamento em vórtice livre.

Para introduzir esses efeitos de parede no escoamento giratório adota-se no código CYCLO, para a velocidade tangencial próxima a parede (primeiro volume de controle), valores próximos da velocidade tangencial de entrada do ciclone.

Para as fases particuladas, a despeito do trabalho de Zhou e Soo (1991), uma condição de deslizamento livre (“Free-Slip”) é utilizada:

$$u_s = v_s = \frac{\partial w_s}{\partial r} = 0 \quad (3.27)$$

Para as grandezas turbulentas k_g e ε_g , condições de turbulência nula do tipo:

$$k_g = 0 \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial r} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial z} = 0$$

são aplicadas nas paredes. A condição para k é justificada pela condição de não deslizamento para os componentes de velocidade, e para ε , fisicamente representa uma condição de fronteira isolada à dissipação de turbulência.

Para as regiões imediatamente adjacentes às paredes, as funções de Launder e Spalding (1974) apresentadas anteriormente, são aplicadas para introduzir efeitos viscosos próximos às paredes. O procedimento utilizado para se definir a região de aplicação das funções de parede, consiste em considerar somente um ponto adjacente a parede, conforme sugerido por Elkain *et al.* (1994).

À fração volumétrica na parede impõe-se uma condição de fronteira impermeável à transferência de massa:

$$\frac{\partial f_g}{\partial r} = \frac{\partial f_s}{\partial r} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial f_g}{\partial z} = \frac{\partial f_s}{\partial z} = 0 \quad (3.29)$$

Simetria

Condições de simetria axial são aplicadas para todas as variáveis em todas as fases envolvidas:

$$\begin{aligned} u_g = u_s = v_g = v_s = 0 \\ \text{e,} \\ \frac{\partial f_g}{\partial r} = \frac{\partial f_s}{\partial r} = \frac{\partial w_g}{\partial r} = \frac{\partial w_s}{\partial r} = \frac{\partial k_g}{\partial r} = \frac{\partial \epsilon_g}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

”Underflow” e “Overflow”

Condições de continuidade do fluxo são aplicadas para todas as variáveis, tanto na saída inferior quanto na saída superior do ciclone:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_g}{\partial z} = \frac{\partial f_s}{\partial z} = \frac{\partial u_g}{\partial z} = \frac{\partial u_s}{\partial z} = \frac{\partial v_g}{\partial z} = \frac{\partial v_s}{\partial z} = \\ \frac{\partial w_g}{\partial z} = \frac{\partial w_s}{\partial z} = \frac{\partial k_g}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon_g}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0 . \end{aligned} \quad (3.31)$$

3.2- Procedimento Numérico

As equações do modelo apresentadas anteriormente são resolvidas com a utilização do método dos volumes finitos (FVM – “Finite-Volume Methods”). Na literatura encontra-se uma grande quantidade de material bibliográfico sobre o tema, destacando, dentre outros, os livros de Patankar (1980) e Maliska (1995 e 2004).

No método dos volumes finitos, as equações discretizadas são obtidas pela integração das equações diferenciais no volume de controle, utilizando de esquemas de interpolação.

O principal objetivo desta seção é apresentar de uma maneira sucinta as particularidades do método utilizado por Meier (1998) no desenvolvimento do código CYCLO. Uma vez que o código computacional CYCLO é baseado nos trabalhos desenvolvido por Meier (1998), as informações apresentadas a seguir foram extraídas do trabalho deste autor.

3.2.1- Equação geral de discretização

A equação geral de discretização é a equação discreta e aproximada resultante da integração das equações apresentadas anteriormente no domínio do espaço e do tempo.

As aproximações numéricas básicas utilizadas por Meier (1998) para a obtenção da equação geral de discretização são:

- formulação implícita no tempo;
- linearização do termo fonte;

- termos não lineares considerados constantes e com valor correspondente ao valor do ponto central do volume controle.

Considere o volume de controle genérico apresentado na Figura 3.3, onde P é um ponto da malha cuja posição coordenada é (r, z) , e N, S, W e E seus vizinhos ortogonais nas direções norte (posição $(r, z+(\Delta z)_n)$), sul (posição $(r, z-(\Delta z)_s)$), oeste (posição $(r-(\Delta r)_w, z)$) e leste (posição $(r+(\Delta r)_e, z)$), respectivamente. As faces do volume de controle nas respectivas direções são denotadas por n, s, w e e . O volume de controle tem um volume $\Delta r \cdot \Delta z \cdot 1$, onde a variação em θ foi considerada unitária devido à formulação tridimensional simétrica deste trabalho (conseqüentemente um domínio espacial bi-dimensional).

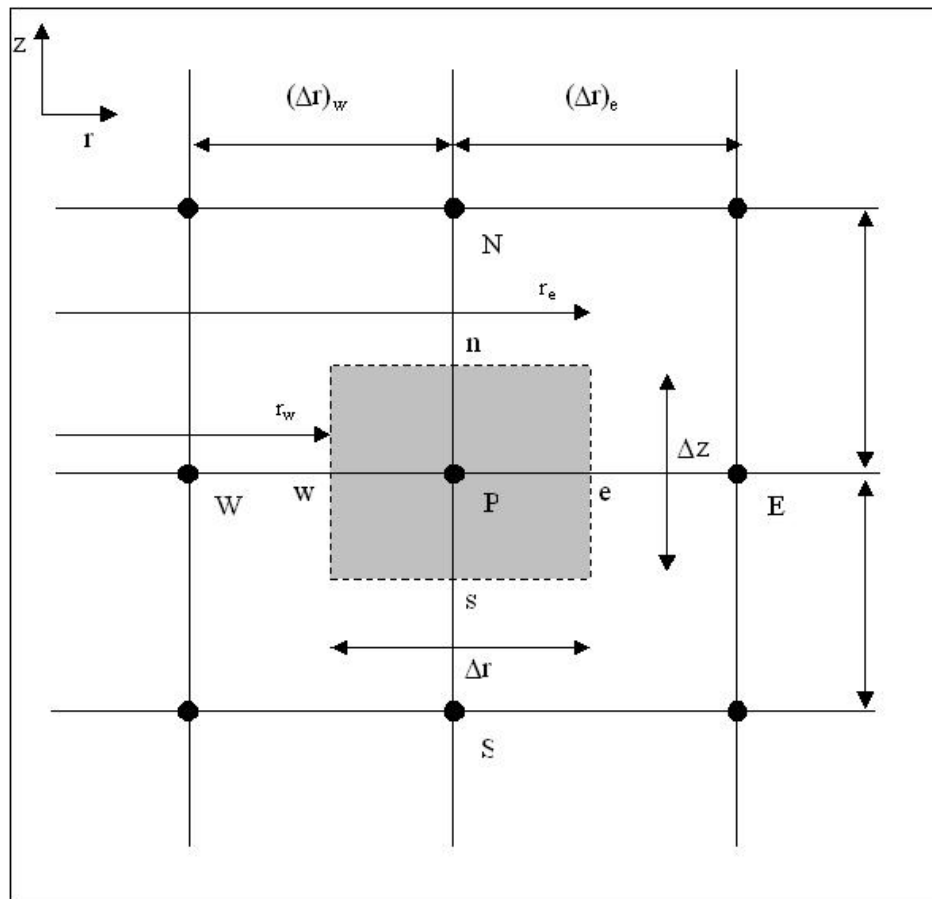


Figura 3.3 Representação de um volume de controle genérico

Desta forma, a equação geral de discretização é obtida por integração das equações diferenciais, sobre o volume elementar de controle e num intervalo de tempo. Detalhes dos passos para a integração e obtenção da equação geral de discretização são encontrados no trabalho de doutorado de Meier (1998).

As equações discretizadas resultantes da integração têm a forma:

$$a_p \phi_p = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (3.32)$$

onde:

ϕ = representa as variáveis dependentes;

a = coeficientes que contêm as contribuições dos fluxos convectivos e difusivos;

b = representa os componentes do termo fonte linearizado.

Os coeficientes são definidos por:

$$\begin{aligned} a_N &= L_d \left[\frac{(\Gamma_z)_n}{\Delta z_n} \beta_n - (w)_n \left(\frac{1}{2} - \alpha_n \right) \right] f_n A_n \\ a_S &= L_d \left[\frac{(\Gamma_z)_s}{\Delta z_s} \beta_s + (w)_s \left(\frac{1}{2} + \alpha_s \right) \right] f_s A_s \\ a_E &= \left[\frac{(\Gamma_r)_e}{\Delta r_e} \beta_e - (u)_e \left(\frac{1}{2} - \alpha_e \right) \right] f_e A_e \\ a_W &= \left[\frac{(\Gamma_r)_w}{\Delta r_w} \beta_w + (u)_w \left(\frac{1}{2} + \alpha_w \right) \right] f_w A_w \\ a_p &= a_N + a_S + a_E + a_W + f_p \frac{\Delta V}{\Delta \tau} - Sp + L_d [(w)_n f_n A_n - (w)_s f_s A_s] + (u)_e f_e A_e - (u)_w f_w A_w \\ b &= Sc + f_p^0 \phi_p^0 \frac{\Delta V}{\Delta \tau} \end{aligned} \quad (3.33)$$

sendo:

- os coeficientes α e β definidos pela escolha apropriada de um esquema de interpolação e

- as áreas nas faces são definidas como:

$$A_e = r_e \Delta z \quad , \quad A_w = r_w \Delta z \quad , \quad A_n = A_s = \frac{r_e^2 - r_w^2}{2} \quad . \quad (3.34)$$

A equação (3.32) pode ser aplicada para cada variável do modelo para formar um sistema algébrico de equações que são resolvidas pelo tradicional algoritmo linha -por-linha com TDMA – “TriDiagonal Matrix Alghoritm” (Patankar, 1980). As não linearidades e os acoplamentos entre as variáveis são introduzidos gradativamente num processo iterativo de solução sucessiva de sistemas algébricos lineares.

3.2.2- Esquemas de interpolação

Na literatura encontra-se uma quantidade considerável de informações sobre os esquemas de interpolação (por exemplo: Patankar, 1980 e Maliska, 1995). Os esquemas de interpolação são necessários para definir as variáveis nas faces dos volumes de controle.

Os esquemas que estão implementados no código CYCLO são descritos abaixo:

Esquema das Diferenças Centrais (CDS)

$$\begin{aligned}\alpha &= 0 \\ \beta &= 1\end{aligned}\tag{3.35}$$

Esquema UDS (Upwind)

$$\begin{aligned}\alpha &= \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{se } v \geq 0 \\ -\frac{1}{2} & \text{se } v < 0 \end{cases} \\ \beta &= 1\end{aligned}\tag{3.36}$$

Esquema WUDS – “Weighted Upstream Differencing Scheme”

$$\begin{aligned}|\alpha| &= \frac{Pe^2}{10 + 2 Pe^2} \\ \beta &= \frac{(1 + 0.005 Pe^2)}{1 + 0.05 Pe^2}\end{aligned}\tag{3.37}$$

com o número de Peclet (Pe) definido por:

$$Pe = \frac{\dot{m} \Delta s}{\Gamma}\tag{3.38}$$

onde:

- \dot{m} representa o fluxo mássico na direção genérica s
- o sinal de α é definido pelo esquema “Upwind”.

Esquema Exponencial

$$\alpha = \frac{1}{2} - \frac{e^{\frac{Pe}{2}} - 1}{e^{Pe} - 1}$$
$$\beta = Pe \frac{e^{\frac{Pe}{2}}}{e^{Pe} - 1} \quad (3.39)$$

3.2.3- Acoplamento pressão-velocidade

A natureza de solução das equações algébricas pode ser segregada ou simultânea. Na solução simultânea destas equações algébricas, cria-se uma única matriz que envolve todos os coeficientes e resolvem-se todas as incógnitas simultaneamente. Outra alternativa, que é adotada pelo programa CYCLO, é a solução segregada dos sistemas de equações, isto é, resolver os sistemas lineares um a um atualizando-se os coeficientes. Neste tipo de solução se destaca o problema dos acoplamentos entre as variáveis.

Para a solução segregada das equações e escoamento incompressível, o fato de ρ não variar com a pressão, introduz um forte acoplamento entre a pressão e a velocidade, causando dificuldades para a solução do sistema de equações. A solução é, então, determinar um campo de pressões que, quando inserido nas equações do movimento, origine um campo de velocidade que satisfaça a equação da conservação da massa. O código CYCLO apresenta dois métodos para tratar do problema do acoplamento em escoamentos incompressíveis, o método SIMPLE (“Semi IMPLICIT Linked Equations”) e o SIMPLEC. O método SIMPLE foi desenvolvido por Patankar e Spalding (1972), e envolve dois passos distintos: primeiramente as velocidades são calculadas pela equação do movimento, de maneira a satisfazer a equação da conservação da massa, e em seguida, as pressões são avançadas para completar o ciclo iterativo. O SIMPLEC

foi derivado do SIMPLE diferindo apenas nas equações de correção das velocidades. Esta diferença evita a necessidade de uma severa relaxação no cálculo da correção de pressão, comum ao método SIMPLE (Maliska, 1995).

Maiores detalhes dos métodos SIMPLE e SIMPLEC são apresentados na literatura (Patankar, 1980) e Maliska (1995 e 2004).

3.2.4 Resolução do sistema de equações

Os métodos de solução de sistemas de equações podem ser classificados em diretos ou iterativos. Nos métodos diretos é necessária a inversão da matriz completa. Por isso, tais métodos requerem o manuseio dos elementos de todos os pontos da matriz de coeficientes (inclusive os elementos nulos) influenciando de forma considerável no tempo computacional do método. Nos métodos iterativos o sistema de equações é resolvido parcialmente a cada iteração, partindo de uma estimativa inicial e obtendo uma resposta mais próxima da solução. Assim, várias iterações são necessárias para que a diferença entre a solução obtida e a solução real seja satisfatória.

O programa CYCLO utiliza para a solução do sistema algébrico anteriormente discutido um método iterativo, conhecido como linha por linha com TDMA. A seguir é apresentada a idéia central do algoritmo TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm), implementado por Meier (1998) no código CYCLO.

Para ilustrar o método, considere uma matriz regular composta por N_i+1 linhas e N_j+1 colunas, caracterizando os pontos do domínio espacial onde se pretende obter a solução numérica aproximada do modelo, mostrada na Figura 3.4.

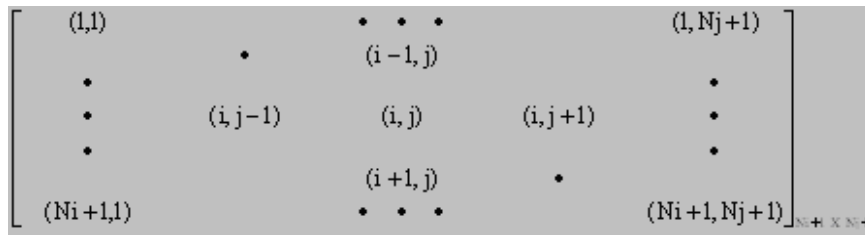


Figura 3.4 Ilustração em linhas e colunas do domínio de cálculo

Os elementos externos da matriz representam as fronteiras do domínio espacial e os elementos internos os pontos de aplicação da equação de discretização para a variável ϕ genérica.

O método consiste em transformar o problema bidimensional não linear, em sucessivos problemas lineares unidimensionais. Por exemplo, percorrendo horizontalmente a linha de i constante desde $j=2$ até N_j , e admitindo-se que os valores das variáveis na linha inferior ($i-1$) e na linha superior ($i+1$) sejam constantes e que foram calculados no mesmo processo durante a linha anterior, o problema reduz-se a um problema unidimensional do tipo tridiagonal que possui uma solução direta dada pelo algoritmo de Thomas (Maliska, 1995). Percorrendo-se todas as linhas do domínio de cálculo, as condições de contorno a esquerda e a direita da matriz, são atualizadas e introduzidas para o interior do domínio espacial.

Este mesmo processo deve ser implementado para as colunas de j constante de maneira a introduzir as condições de contorno nas fronteiras superior e inferior para o interior do domínio de cálculo.

As alterações do procedimento de percorrer linhas e colunas devem ser realizadas sucessivamente até que não mais ocorram variações e sejam atingidos os critérios de convergência adotados.

Os critérios de convergência utilizados no código CYCLO são baseados no cálculo dos resíduos das equações e da norma euclideana dos resíduos.

O resíduo para o ponto genérico P da malha (R_P) é definido da seguinte forma:

$$R_p = a_p \phi_p - \sum a_{nb} \phi_{nb} - b \quad (3.40)$$

A norma euclideana dos resíduos (R_{eucl}) é definida por:

$$R_{eucl} = \sqrt{\sum_{i=2}^{N_i} \sum_{j=2}^{N_j} (R_p)_{i,j}^2} \quad (3.41)$$

Os critérios implementados e utilizados são:

$$\begin{cases} (R_p)_{\max} \leq Tol_1 \\ R_{eucl} \leq R_f (R_{eucl})_0 \end{cases} \quad (3.42)$$

onde:

- $(R_p)_{\max}$ representa o maior valor do resíduo em todos os pontos do domínio;
- Tol_1 uma tolerância para o máximo resíduo;
- R_f um fator de redução compreendido entre 0,05 e 0,25, e
- $(R_{eucl})_0$ representa a norma euclideana do resíduo na primeira iteração do procedimento iterativo de linha por linha com TDMA.

Como critério de convergência global de todas as equações do modelo acopladas e com o acoplamento pressão-velocidade, utiliza-se a norma euclideana da fonte de massa da equação de correção de pressão. A fonte de massa aparece quando a equação da continuidade não é satisfeita na equação da correção de pressão.

3.2.5 Fatores de relaxação

Para garantir a estabilidade e convergência da solução numérica iterativa das equações algébricas representadas pela equação (3.32), face as não linearidades das equações e aos acoplamentos entre as variáveis, é conveniente efetuar-se um relaxamento da taxa de atualização dos valores destas variáveis, no procedimento convencional de linha por linha com TDMA. As principais estratégias normalmente aplicadas com esse propósito são as relaxações produzidas por coeficientes de relaxação e aquelas promovidas por coeficientes de inércia.

As relaxações por coeficiente de relaxação consistem em reescrever a equação (3.32) da seguinte forma:

$$\frac{a_P}{\lambda} \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + b + (1 - \lambda) \frac{a_P}{\lambda} \phi_P^* , \quad (3.43)$$

onde:

- λ é um coeficiente de relaxação que dependendo do seu valor pode conduzir a uma aceleração ou a um retardamento da solução, e
- ϕ_P^* é o valor de ϕ_P obtido em iteração anterior.

Os valores de λ estão compreendidos no intervalo $[-1, +1]$ tais que se:

$\lambda = 1$ – sem relaxamento;

$\lambda > 1$ – aceleração;

$\lambda < 1$ - relaxamento

As relaxações produzidas pela adoção de um coeficiente de inércia podem ser implementadas em junção ao procedimento de relaxações sucessivas, da seguinte forma:

$$\left(\frac{a_P}{\lambda} + \text{Iner}\right)\phi_P = a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_E\phi_E + a_W\phi_W + b + \left[(1-\lambda)\frac{a_P}{\lambda} + \text{Iner}\right]\phi_P^* \quad (3.44)$$

onde ao coeficiente *Iner* normalmente atribui-se valores positivos.

Especificamente para o cálculo iterativo da equação de correção da pressão utiliza-se a técnica de relaxação conhecida por cancelamento parcial de Stone sugerida por Van Doormaal e Raithby (1984).

3.2.6- Malha numérica

A malha numérica adotada no código CYCLO foi uma malha ortogonal, regular e em coordenadas cilíndricas.

Adotou-se uma estratégia multi-bloco para possibilitar uma concentração diferenciada de pontos da malha em determinadas regiões do ciclone. O ciclone foi dividido radialmente em três (3) blocos distintos que denominamos região de corpo rígido, região de interface e região de vórtice livre, por analogia as características do escoamento vorticial no interior do ciclone. Na direção axial foram criados cinco (5) blocos definidos pelas regiões de entrada e saída, região anular, região cilíndrica, região cônica 1 e região cônica 2. Estas regiões são ilustradas nas Figuras 3.1 e 3.5.

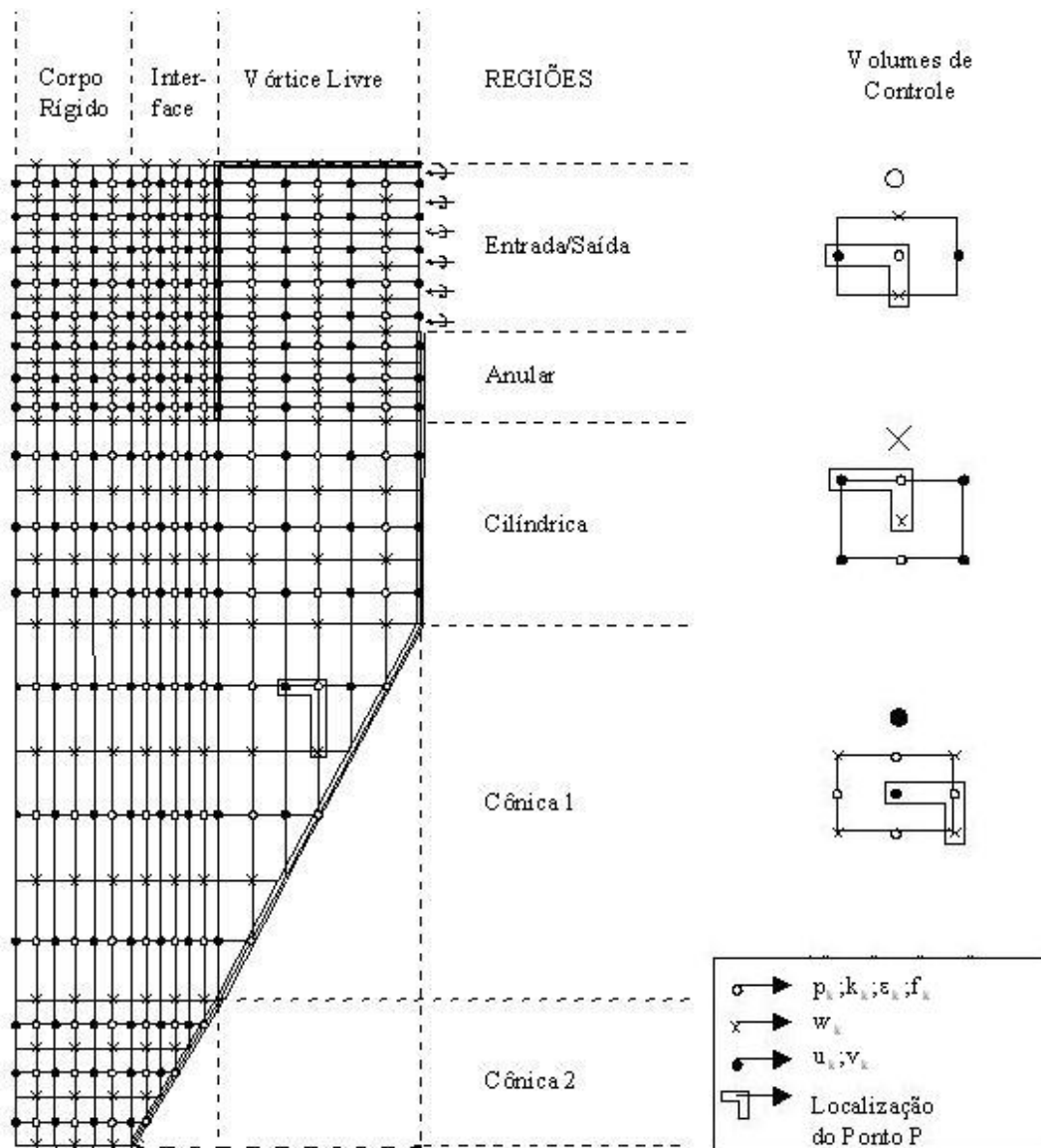


Figura 3.5 Ilustração da malha numérica deslocada

Como procedimento para a distribuição dos pontos na malha adotou-se o procedimento de malha deslocada (“staggered grids”) onde as variáveis do modelo são calculadas em posições diferentes da malha. Patankar (1980) faz uma discussão detalhada sobre a malha deslocada como forma de minimizar problemas de oscilações numéricas decorrentes de altos gradientes de pressão. A idéia central do deslocamento da malha é posicionar, na malha numérica, os componentes de velocidade de forma que a força de pressão atuante no volume

de controle seja calculada entre dois pontos adjacentes de pressão. Em cada bloco utiliza-se uma distribuição uniforme dos pontos da malha.

A Figura 3.6 apresenta um detalhe dos volumes de controle e dos pontos deslocados da malha deslocada.

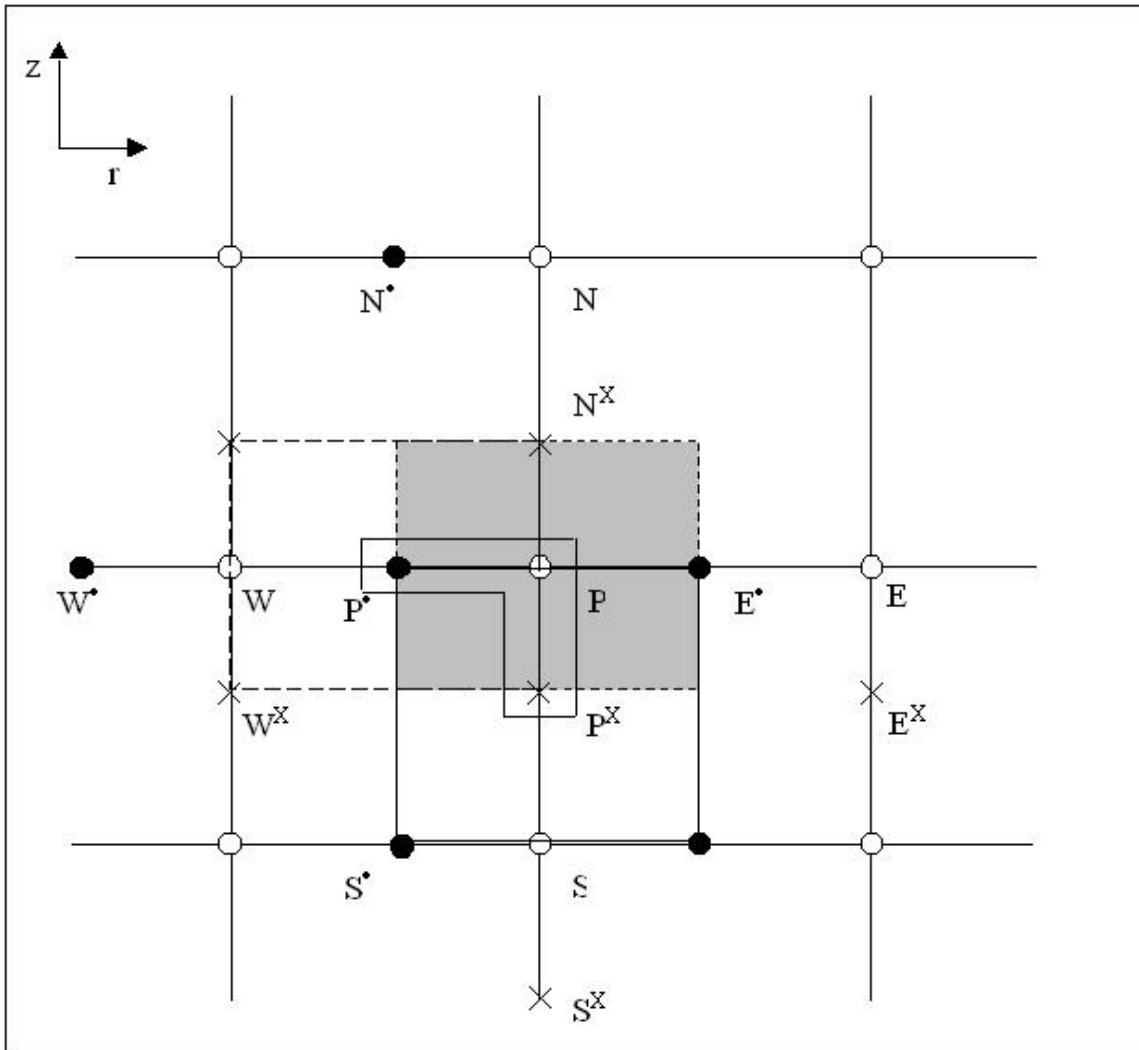


Figura 3.6 Volumes e pontos deslocados na malha deslocada

O deslocamento a ser utilizado segue sugestão de Maliska *et al.* (1992), e apresenta o seguinte esquema de deslocamento: os componentes de velocidade radial e tangencial são deslocados a esquerda do ponto central (simbolizado na figura pelo símbolo (\bullet)); o componente axial de velocidade é deslocado abaixo do ponto central (simbolizado por (\times)); e todos os demais componentes como

pressão, frações volumétricas e propriedades turbulentas, são calculados no volume central da figura hachurado em cinza e nos pontos simbolizados por (o).

CAPÍTULO 4 – O CÓDIGO CYCLO

O código CYCLO é um programa de fluidodinâmica computacional (CFD), dedicado exclusivamente à simulação numérica do escoamento gás-sólido em separadores ciclônicos.

A modelagem matemática e os procedimentos numéricos utilizados foram apresentados no capítulo anterior.

O código CYCLO é uma extensão de versões anteriores. Nesta nova versão o código foi ampliado para poder representar a fase particulada com diferentes diâmetros e massa específica. O código foi verificado e validado para o escoamento monofásico, bifásico e tetrafásico.

O programa foi desenvolvido em linguagem FORTRAN 77 e FORTRAN 90 utilizando o ambiente de programação “Microsoft Developer Studio”, com o compilador “Fortran Power Station 5.0”.

4.1 Estrutura do Código

O código CYCLO é composto basicamente por três módulos:

Módulo de pré-processamento (Pre)

Este módulo é utilizado para a criação e alteração de arquivos de informações geométricas para a construção da malha numérica. O resultado destes cálculos é disposto em um arquivo de dados para posterior leitura e utilização pelo módulo de processamento.

Antes de iniciar o módulo de pré-processamento, é necessário definir as características da malha numérica, isto é, qual o número de células deverá ser

utilizado para cada região do ciclone. A Figura 4.1 apresenta a planilha Malha_pdr, na qual o usuário através da definição das informações geométricas do ciclone determina o tamanho das escalas Δr e Δz . Como resultado, é gerado a quantidade de pontos a ser utilizado em cada região do ciclone. Essa malha é gerada pelo pré-processador e é então visualizada através do software PCTEX.

ENTRADA DE DADOS		TAMANHO		MALHA	
GEOMETRIA		Tamanho		Nº Pontos	
mm		mm			
		$\Delta r1$	1	NJ1	56
Le	150	$\Delta r2$	1	NJ2	19
Ls	151	$\Delta r3$	1	NJ3	75
Lc	300	$\Delta z1$	8	NI1	19
Lco	750	$\Delta z2$	8	NI2	0
Ds	150	$\Delta z3$	8	NI3	38
Dc	300			NI4=NJ3	75
DI	112,5			NI5=NJ2	19
b	60				

Figura 4.1 Planilha Malha_pdr

Módulo de processamento (Pro)

É responsável pela criação e alteração de arquivos onde são definidas as condições operacionais e a solução iterativa do modelo. Neste módulo são definidos parâmetros numéricos como fatores de relaxação, fatores de redução, número máximo de iterações por ciclo, etc. Todas as rotinas necessárias para a solução numérica através do método dos volumes finitos são definidas neste módulo.

Módulo de pós-processamento (Pos)

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.

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os arquivos necessários para que o programa CYCLO possa ser executado.

Inicialmente o arquivo apresentado na Figura 4.2 deverá ser executado através do programa gerador de malha (módulo de pré-processamento). Note que neste arquivo estão definidas as características geométricas do ciclone e a malha numérica a ser utilizada. Como resultado da execução do programa gerador de malha, um dos diversos arquivos gerados, é o arquivo que contém todas as informações da malha que será utilizado para a execução do módulo de processamento.

```

-----
SIMULACAO DE CICLONES - ARQUIVO PARA O PRE-PROCESSAMENTO
----> GERACAO DA MALHA NUMERICA
-----
Propriedades Geometricas do Ciclone (m):
-----
Dia. tubo de saída      (Ds)=1.5000d-1
Dia. do cilindro       (Dc)=3.0000d-1
Dia. do tubo de sólidos(Dl)=1.1250d-1
Comp. da entrada       (Le)=1.5000d-1
Comp. tubo de saída    (Ls)=1.5100d-1
Comp. do cilindro      (Lc)=3.0000d-1
Comp. do cone          (Lco)=7.5000d-1
Largura do Boca1      (b)=0.6000d-1
-----
Características da Malha:
-----
Pontos radiais 1      (NJ1)=56
Pontos radiais 2      (NJ2)=19
Pontos radiais 3      (NJ3)=75
Pontos axiais 1       (NI1)=19
Pontos axiais 2       (NI2)=1
Pontos axiais 3       (NI3)=38
-----
Parametros de Definicao das Referencias
-----
Iref (1(Dc/L),2(Dc),3(L)) =1
-----

```

Figura 4.2 Arquivo para geração da malha numérica

Para a predição das propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido é necessária informação sobre a composição do gás, temperatura média, pressão média, e o conhecimento de algumas propriedades. A Figura 4.3 ilustra o formato deste arquivo. Com estas informações é possível calcular a viscosidade dinâmica e a massa específica dos gases em função da composição, temperatura e pressão.

 ARQUIVO DE DADOS PARA SIMULACAO DE CICLONES
 Propriedades dos Gases e Condições de Operação

Fracões Mássicas

 1-Oxigênio (O2) =0.2300d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =0.0001d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =0.0001d+0
 4-Nitrogênio (N2) =0.75980d+0
 5-vapor de água (H2O) =0.0100d+0

Massa Molar (g/mol)

 1-oxigênio (O2) =32.000d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =44.000d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =64.000d+0
 4-Nitrogênio (N2) =28.000d+0
 5-vapor de água (H2O) =18.000d+0

Temperatura Crítica (K)

 1-oxigênio (O2) =154.60d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =304.20d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =430.80d+0
 4-Nitrogênio (N2) =126.20d+0
 5-vapor de água (H2O) =647.10d+0

Pressão Crítica (Atm)

 1-oxigênio (O2) =49.80d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =72.80d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =77.80d+0
 4-Nitrogênio (N2) =33.50d+0
 5-vapor de água (H2O) =217.60d+0

volume crítico (cm3/mol)

 1-oxigênio (O2) =73.40d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =94.00d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =122.00d+0
 4-Nitrogênio (N2) =89.50d+0
 5-vapor de água (H2O) =56.00d+0

Fator Acêntrico

 1-oxigênio (O2) =0.021d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =0.224d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =0.273d+0
 4-Nitrogênio (N2) =0.040d+0
 5-vapor de água (H2O) =0.348d+0

Momento Dipolar (Debyes)

 1-oxigênio (O2) =0.000d+0
 2-Gás Carbônico (CO2) =0.000d+0
 3-Dióxido de Enxofre (SO2) =1.600d+0
 4-Nitrogênio (N2) =0.000d+0
 5-vapor de água (H2O) =1.800d+0

Condições de operação

 Pressão Média (mBar) =990.00d+0
 Temperatura Média (K) =293.000d+0
 Pressão de Referência(mmca)=10.30d+3

Figura 4.3 Arquivo das propriedades do gás

Nas Figuras 4.4.a, b, c é apresentado o arquivo com as informações referentes as características geométricas do ciclone, malha numérica, condições operacionais e todas as particularidades do método dos volumes finitos. A execução deste arquivo e do arquivo de propriedades do gás ocorre simultaneamente no módulo de processamento.

ARQUIVO DE DADOS PARA SIMULACAO DE CICLONES			
Arquivo para sistema multifásico (tetrafásico)			

Propriedades Físicas dos Gases			
Viscosidade	(mig)	=1.800d-5	kg/ms
Massa específica	(rog)	=1.180d+0	kg/m ³

Propriedades Físicas do Sólido			
Diâmetro médio1	(dp1)	=3.25000d-6	m
Massa específica1	(rop1)	=2700.00d+0	kg/m ³
Fração Mássica1	(fp1)	=1.00000d+0	
Diâmetro médio2	(dp2)	=5.97000d-6	m
Massa específica2	(rop2)	=2700.00d+0	kg/m ³
Fração Mássica2	(fp2)	=0.00000d+0	
Diâmetro médio3	(dp3)	=2.87020d-6	m
Massa específica3	(rop3)	=2700.00d+0	kg/m ³
Fração Mássica3	(fp3)	=0.00000d+0	

Propriedades Geométricas do Ciclone:			
Dia. tubo de saída	(Ds)	=1.5000d-1	m
Dia. do cilindro	(Dc)	=3.0000d-1	m
Dia. do tubo de sólidos	(Dl)	=1.1250d-1	m
Comp. da entrada	(Le)	=1.5000d-1	m
Comp. tubo de saída	(Ls)	=1.5100d-1	m
Comp. do cilindro	(Lc)	=3.0000d-1	m
Comp. do cone	(Lco)	=7.5000d-1	m
Largura do Bocal	(b)	=0.6000d-1	m

Condições operacionais:			
Vazão de gás	(Qg)	=1.44389d-1	m ³ /s
Vazão de sólido	(Qp)	=2.67387d-7	m ³ /s
Temp. entrada/gás	(Tg0)	=19.850d+0	°C
Temp. entrada/sólido	(Tp0)	=19.850d+0	°C

Características da Malha:			
Pontos radiais 1	(NJ1)	=56	
Pontos radiais 2	(NJ2)	=19	
Pontos radiais 3	(NJ3)	=75	
Pontos axiais 1	(NI1)	=19	
Pontos axiais 2	(NI2)	=1	
Pontos axiais 3	(NI3)	=38	

Figura 4.4a Arquivo de dados para a simulação (a)

Esquemas de Interpolação:			
Esquema 1 : CDS (Central Difference Scheme)			
Esquema 2 : UDS (Upstream Difference Scheme)			
Esquema 3 : WUDS (Upstream-weighted Difference Scheme)			
Esquema 4 : Exponencial			
VARIÁVEL ESQUEMA DE INTERPOLAÇÃO		VARIÁVEL Fator de Relaxação	
1-velocidade Axial (gás)	=3	1-velocidade Axial (gás)	=1.0d+0
2-velocidade Radial(gás)	=3	2-velocidade Radial(gás)	=1.0d+0
3-Pressão	=2	3-Pressão	=1.0d+0
4-velocidadeTangencial(gás)	=3	4-velocidadeTangencial(gás)	=1.0d+0
5-Correção de Pressão	=2	5-Correção de Pressão	=1.0d+0
6-Energia Cinética Turb.	=2	6-Energia Cinética Turb.	=1.0d-1
7-Taxa de Dissipação de k	=2	7-Taxa de Dissipação de k	=1.0d-1
8-velocidade Axial(dp1)	=2	8-velocidade Axial(dp1)	=1.0d+0
9-velocidade Radial(dp1)	=2	9-velocidade Radial(dp1)	=1.0d+0
10-velocidade Tang. (dp1)	=2	10-velocidade Tang. (dp1)	=1.0d+0
11-velocidade Axial(dp2)	=2	11-velocidade Axial(dp2)	=1.0d+0
12-velocidade Radial(dp2)	=2	12-velocidade Radial(dp2)	=1.0d+0
13-velocidade Tang. (dp2)	=2	13-velocidade Tang. (dp2)	=1.0d+0
14-velocidade Axial(dp3)	=2	14-velocidade Axial(dp3)	=1.0d+0
15-velocidade Radial(dp3)	=2	15-velocidade Radial(dp3)	=1.0d+0
16-velocidade Tang. (dp3)	=2	16-velocidade Tang. (dp3)	=1.0d+0
17-Fração volumétrica (gás)	=2	17-Fração volumétrica (gás)	=1.0d+0
18-Fração volumétrica (dp1)	=2	18-Fração volumétrica (dp1)	=1.0d+0
19-Fração volumétrica (dp2)	=2	19-Fração volumétrica (dp2)	=1.0d+0
20-Fração volumétrica (dp3)	=2	20-Fração volumétrica (dp3)	=1.0d+0
21-Temperatura do Gás	=2	21-Temperatura do Gás	=1.0d+0
22-Temperatura do sólido	=2	22-Temperatura do sólido	=1.0d+0
VARIÁVEL Fator de Redução		VARIÁVEL Fator de Inércia	
1-velocidade Axial (gás)	=2.5d-1	1-velocidade Axial (gás)	=0.0d+0
2-velocidade Radial(gás)	=2.5d-1	2-velocidade Radial(gás)	=0.0d+0
3-Pressão	=0.5d-1	3-Pressão	=0.0d+0
4-velocidadeTangencial(gás)	=0.5d+0	4-velocidadeTangencial(gás)	=0.0d+0
5-Correção de Pressão	=0.5d-1	5-Correção de Pressão	=0.0d+0
6-Energia Cinética Turb.	=2.5d-1	6-Energia Cinética Turb.	=0.0d+0
7-Taxa de Dissipação de k	=2.5d-1	7-Taxa de Dissipação de k	=0.0d+0
8-velocidade Axial(dp1)	=2.5d-1	8-velocidade Axial(dp1)	=0.0d+0
9-velocidade Radial(dp1)	=2.5d-1	9-velocidade Radial(dp1)	=0.0d+0
10-velocidade Tang. (dp1)	=2.5d-1	10-velocidade Tang. (dp1)	=0.0d+0
11-velocidade Axial(dp2)	=2.5d-1	11-velocidade Axial(dp2)	=0.0d+0
12-velocidade Radial(dp2)	=2.5d-1	12-velocidade Radial(dp2)	=0.0d+0
13-velocidade Tang. (dp2)	=2.5d-1	13-velocidade Tang. (dp2)	=0.0d+0
14-velocidade Axial(dp3)	=2.5d-1	14-velocidade Axial(dp3)	=0.0d+0
15-velocidade Radial(dp3)	=2.5d-1	15-velocidade Radial(dp3)	=0.0d+0
16-velocidade Tang. (dp3)	=2.5d-1	16-velocidade Tang. (dp3)	=0.0d+0
17-Fração volumétrica (gás)	=0.5d-1	17-Fração volumétrica (gás)	=0.0d+0
18-Fração volumétrica (dp1)	=0.5d-1	18-Fração volumétrica (dp1)	=0.0d+0
19-Fração volumétrica (dp2)	=0.5d-1	19-Fração volumétrica (dp2)	=0.0d+0
20-Fração volumétrica (dp3)	=0.5d-1	20-Fração volumétrica (dp3)	=0.0d+0
21-Temperatura do Gás	=2.5d-1	21-Temperatura do Gás	=0.0d+0
22-Temperatura do sólido	=2.5d-1	22-Temperatura do sólido	=0.0d+0

Figura 4.4b Arquivo de dados para a simulação (b)

VARIÁVEL Máximos Resíduos		VARIÁVEL Número de Iterações nos Ciclos Internos	
1-velocidade Axial (gás)	=1.0d-3	1-velocidade Axial (gás)	=3
2-velocidade Radial(gás)	=1.0d-3	2-velocidade Radial(gás)	=3
3-Pressão	=1.0d-3	3-Pressão	=1
4-velocidadeTangencial(gás)	=1.0d-3	4-velocidadeTangencial(gás)	=3
5-Correção de Pressão	=1.0d-8	5-Correção de Pressão	=30
6-Energia Cinética Turb.	=1.0d-3	6-Energia Cinética Turb.	=1
7-Taxa de Dissipação de k	=1.0d-3	7-Taxa de Dissipação de k	=1
8-velocidade Axial(dp1)	=1.0d-3	8-velocidade Axial(dp1)	=5
9-velocidade Radial(dp1)	=1.0d-3	9-velocidade Radial(dp1)	=5
10-velocidade Tang. (dp1)	=1.0d-3	10-velocidade Tang. (dp1)	=10
11-velocidade Axial(dp2)	=1.0d-3	11-velocidade Axial(dp2)	=5
12-velocidade Radial(dp2)	=1.0d-3	12-velocidade Radial(dp2)	=5
13-velocidade Tang. (dp2)	=1.0d-3	13-velocidade Tang. (dp2)	=10
14-velocidade Axial(dp3)	=1.0d-3	14-velocidade Axial(dp3)	=5
15-velocidade Radial(dp3)	=1.0d-3	15-velocidade Radial(dp3)	=5
16-velocidade Tang. (dp3)	=1.0d-3	16-velocidade Tang. (dp3)	=10
17-Fração Volumétrica (gás)	=1.0d-8	17-Fração Volumétrica (gás)	=10
18-Fração volumétrica (dp1)	=1.0d-8	18-Fração volumétrica (dp1)	=10
19-Fração Volumétrica (dp2)	=1.0d-8	19-Fração volumétrica (dp2)	=10
20-Fração Volumétrica (dp3)	=1.0d-8	20-Fração volumétrica (dp3)	=10
21-Temperatura do Gás	=1.0d-3	21-Temperatura do Gás	=3
22-Temperatura do Sólido	=1.0d-3	22-Temperatura do Sólido	=3

Número de Iterações no Ciclo Externo			

Itemax	=650000		

SIMPLE (1) x SIMPLEC (2)			

Ipv	=2		

Fator de Relaxação de Stone			

Theta	=1.95d+0		

Tolerância na Fonte de Massa			

Tol	=1.0d-09		

Parâmetros do Método			

Autorizador de Impressão	=1		
Incremento da Impressão	=5000		
Delta tau	=1.0d-2		
Iref (1(Dc/L),2(Dc),3(L))	=1		
Continuação (0-Início)	=1		
Continuação do g(1), g-s(2)	=1		
False Time Step (0-Sim)	=0		
Desacoplamento (IPSA=1)	=0		
Tempo final do IPSA	=1.0d+4		
Dispersao Fase solida(s=1)	=0		
Animacao (s=1)	=0		
Intervalo p/ Animação (s)	=0.1d+0		
Fator para a correcao de mi	=1.0d+0		
Título do Estudo de Caso	=GS-LGN-Zhao 16.04 Dp 3.25		

Figura 4.4c Arquivo de dados para a simulação (c)

O acompanhamento da solução é visualizado com a geração de informações através do módulo de pós-processamento.

Inicialmente, conforme já descrito anteriormente, a malha numérica deverá ser gerada através do módulo de pré-processamento. A Figura 4.5 apresenta visualmente como o andamento da solução é acompanhado.



Figura 4.5 Montagem da malha numérica

Com as informações da malha numérica o módulo de processamento é utilizado para a resolução das equações que fornecerão resultados macroscópicos e microscópicos. As Figuras 4.6 e 4.7, geradas através do módulo de pós-processamento, apresentam informações que podem ser acompanhadas durante a execução do programa CYCLO. 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.

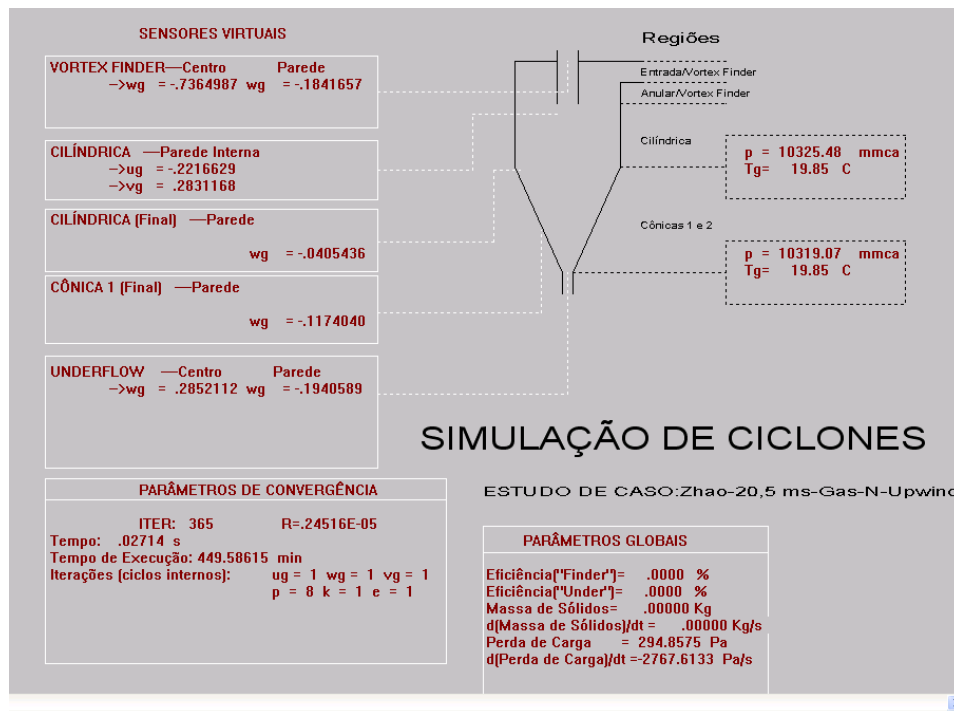


Figura 4.6 Tela de acompanhamento do código CYCLO (gás)

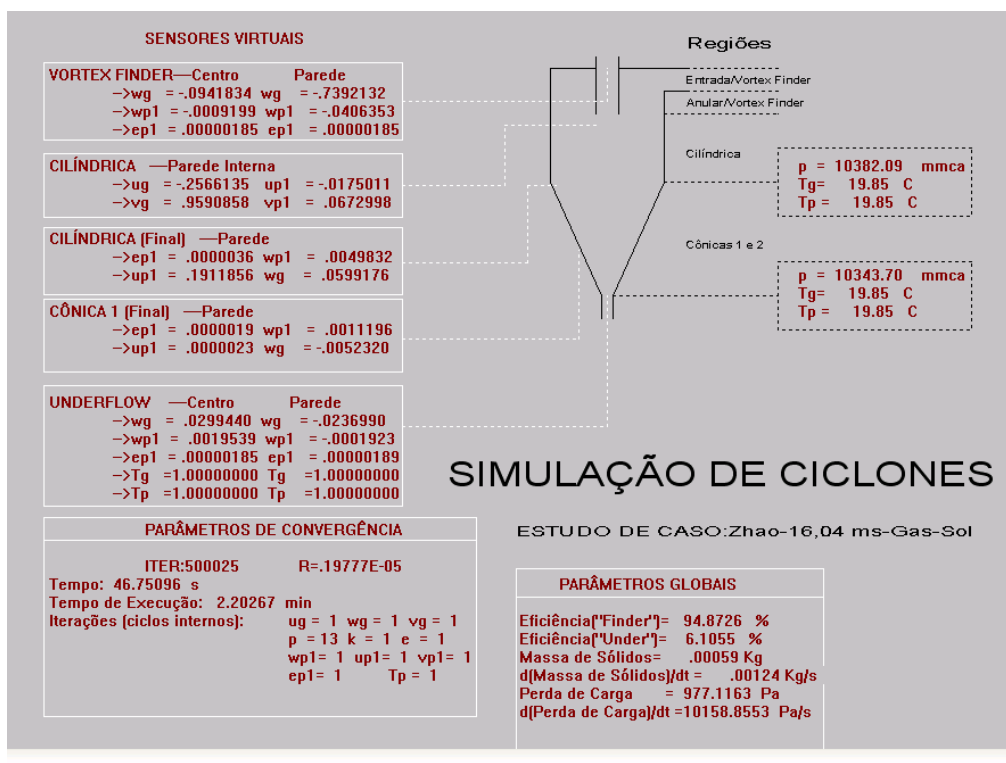


Figura 4.7 Tela de acompanhamento do código CYCLO (gás/sólido)

CAPÍTULO 5 – ESTUDOS DE VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

O programa CYCLO, como já citado anteriormente, é o resultado do aperfeiçoamento de versões anteriores. Durante a aprimoração do código, vários experimentos numéricos foram realizados para a verificação e validação do modelo monofásico e multifásico.

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos que verificam e validam o código para utilização na avaliação de ciclones.

Os resultados obtidos na realização dos experimentos numéricos com o modelo monofásico e multifásico são apresentados e comparados com valores experimentais. Para o modelo monofásico, os resultados são também comparados com o código comercial CFX 4.4 da ANSYS.

5.1 Estudo de Caso 01 – Sistema Monofásico

O atual programa CYCLO tem como ponto de partida o programa desenvolvido por Meier (1998) em sua tese de doutorado. O código foi aprimorado deste então e, principalmente, para o modelo monofásico, foi exaustivamente verificado e validado com dados experimentais (Meier, 1998; Meier *et al.*, 1999; Meier *et al.*, 2002a; Meier *et al.*, 2002b; Vegini *et al.*, 2003; Vegini *et al.*, 2004; Noriler *et al.*, 2004; Vegini *et al.*, 2005).

Como já mencionado anteriormente e ilustrado na Figura 3.2, o código CYCLO assume simetria na entrada do ciclone. Esta simplificação é necessária devido a condição de simetria axial utilizada no código numérico (Meier, 1998). No entanto, esta hipótese simplificadora já utilizada por outros pesquisadores como Boysan *et al.* (1982), Zhou e Soo (1990), Lixing (1993) e Madsen *et al.* (1994) não

prejudica o desempenho do código, como será demonstrado e comprovado através deste estudo de caso.

Para o estudo de caso em questão, informações experimentais obtidas por Patterson e Munz (1996) são utilizadas para verificação e validação do programa CYCLO. Patterson e Munz (1996) desenvolveram um estudo experimental do escoamento monofásico (ar), e multifásico (ar com partículas), em ciclones com entrada tangencial e diferentes temperaturas de operação.

As dimensões e geometria do ciclone utilizado na verificação e validação do escoamento monofásico são apresentadas na Figura 5.1, e corresponde ao ciclone C1 do experimento desenvolvido por Patterson e Munz (1996). As condições operacionais para a experimentação numérica estão apresentadas na Tabela 5.1.

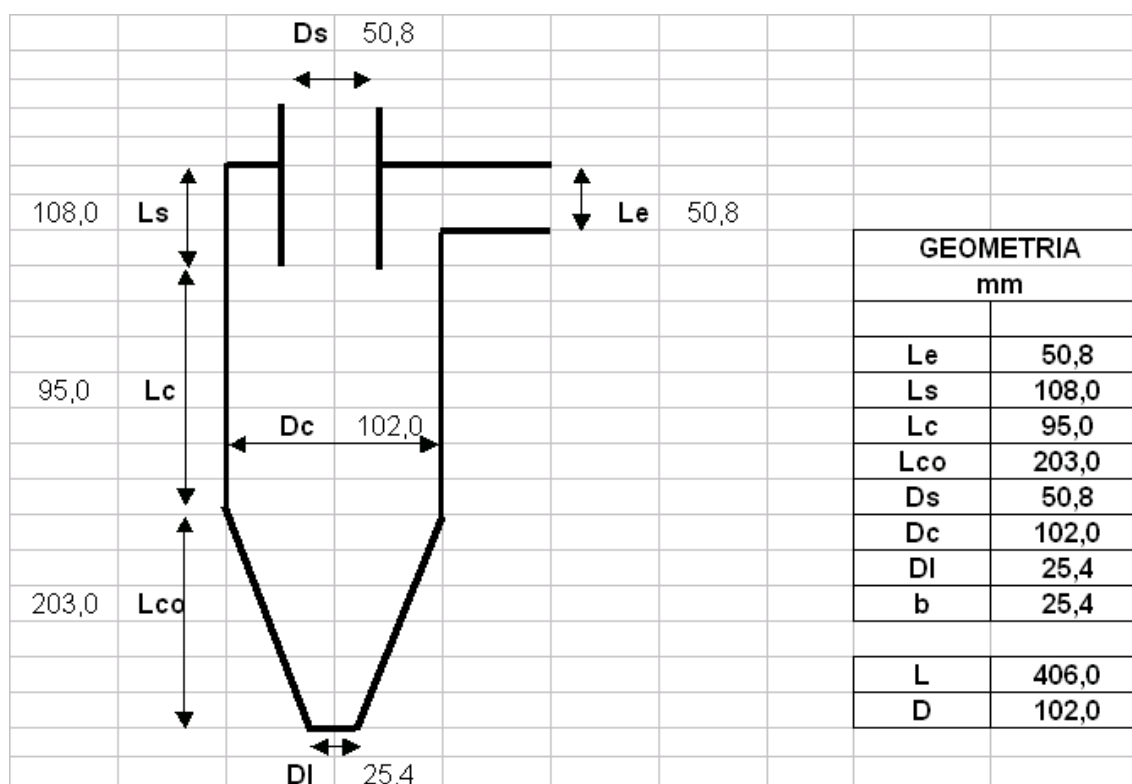


Figura 5.1 Geometria do ciclone utilizado na simulação numérica – Caso 01

Tabela 5.1 Condições de operação – Caso 01

Condições de Operação		Caso 01
Fase Fluida		Ar
Velocidade de ar na entrada	m/s	15,20
Vazão de ar	m ³ /h	70,62
Temperatura	°C	26,85
Pressão	mBar	1013,00

As informações acima apresentadas foram utilizadas no estudo de experimentação numérica com o código CYCLO e o código comercial CFX 4.4 da ANSYS.

O programa CYCLO, conforme apresentado anteriormente, utiliza um modelo tridimensional simétrico e um modelo híbrido para representar a turbulência. Já o código CFX 4.4 da ANSYS utiliza um modelo tridimensional assimétrico e para fechamento do modelo de turbulência é utilizado o modelo dos Tensores de Reynolds (DSM = “Differential Stress Model”).

5.1.1 Métodos numéricos

As características do programa CYCLO já foram apresentadas anteriormente. O código comercial CFX 4.4 da ANSYS, também utiliza método dos volumes finitos, com uma estrutura multi-bloco, mas em coordenadas generalizadas e um sistema colocalizado para malha numérica. O algoritmo SIMPLIC foi aplicado para o acoplamento pressão velocidade, com esquema de interpolação de ordem superior (HIGHER-UPWIND). O algoritmo Rhie Chow com

procedimento AMG (*Algebraic Multi-Grid*) para solução do sistema de equações não-lineares foi usado para prevenir erros numéricos como “Check-Boarding” e “zig-zag”, devido a utilização de um grid colocalizado (onde todas as variáveis são calculadas no centro de cada célula) e erros devido a não ortogonalidade das células geradas durante a construção da estrutura numérica (Noriler *et al.*, 2004).

5.1.2 Malha numérica

A Figura abaixo apresenta as malhas numéricas utilizadas no estudo.

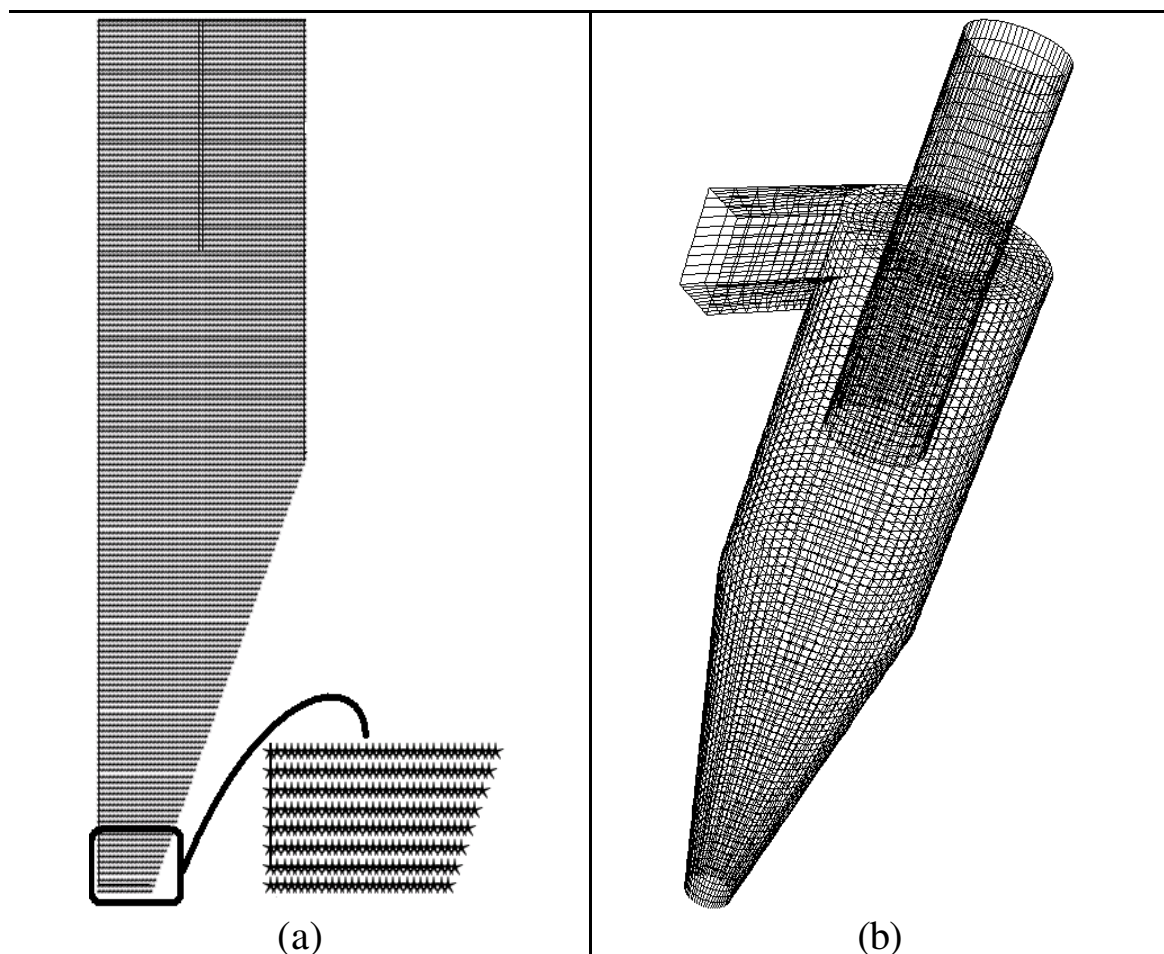


Figura 5.2 Malha numérica: CYCLO (a), CFX 4.4 (b)

A definição do tamanho da malha mais adequado à realização dos experimentos numéricos considera o esforço computacional e a precisão da solução numérica. Para o código CYCLO adotou-se uma malha com um número total de aproximadamente 13000 elementos distribuídos uniformemente nas direções radiais e axiais. Já para o código comercial CFX 4.4 da ANSYS, a malha foi construída com um total de 94975 elementos de controle.

5.1.3 Comparação dos resultados

O trabalho de experimentação numérica, para os dois códigos computacionais, foi realizado utilizando um PC PENTIUM IV, 3.0 Ghz e 1.0 Gb de memória RAM.

O tempo médio de processamento para a solução do modelo 3D-simétrico foi de 18,0 horas. Para o modelo 3D-assimétrico, o esforço computacional aumenta consideravelmente alcançando valores de aproximadamente 100 horas. Este acréscimo no tempo de processamento é resultado de um maior número de equações de conservação para o modelo 3D-assimétrico, além de um número 7 vezes maior de volumes de controle. Além disso, a estratégia de solução deste modelo requer a solução estabilizada com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão para servir como condição inicial para o modelo DSM (Peres, 2002).

Os perfis de velocidade tangencial e axial obtidos experimentalmente por Patterson e Munz (1996) são comparados com os resultados preditos pelo código CYCLO e pelo programa comercial CFX 4.4 da ANSYS.

A utilização das técnicas de CFD permite a visualização do comportamento fluidodinâmico dos ciclones através de mapas de velocidades, pressão ou fração volumétrica. Como os modelos utilizados pelos dois códigos são diferentes, os mapas de pressão e de velocidade tangencial são apresentados e utilizados para verificar e validar as técnicas empregadas.

Perfil de velocidade tangencial

A Figura 5.3 mostra a variação da velocidade tangencial do centro até a parede do ciclone a 13 centímetros a partir de seu topo.

Patterson e Munz (1996) sugerem que a velocidade tangencial aumenta da parede para o centro, assumindo um valor máximo em uma posição aproximadamente 65% do raio, a partir da parede, e então decai rapidamente. Como se pode observar na Figura 5.3, ambos os modelos apresentam uma tendência de aumento gradativo da parede ao centro até atingirem um valor máximo e após diminuem rapidamente. A previsão desta tendência possibilita concluir que ambos os códigos reproduziram os valores experimentais, apesar de possuírem metodologias de discretização e técnicas de solução diferentes.

Em termos de validação, pode-se perceber que o programa CFX 4.4 da ANSYS apresentou um deslocamento do pico de velocidade máxima em direção a parede, quando comparado com os dados de Patterson e Munz (1996). Além disso, o escoamento giratório não foi representado na magnitude correta, ou seja, as velocidades tangenciais ficaram abaixo daquelas obtidas experimentalmente, apesar de apresentarem a mesma tendência.

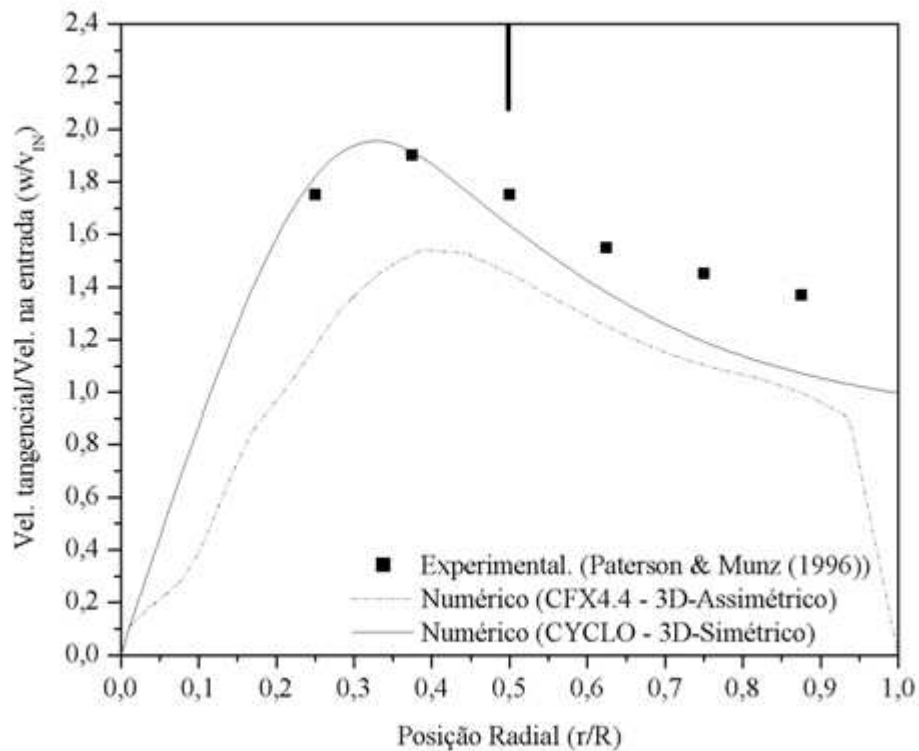


Figura 5.3 Perfil de velocidade tangencial ao longo do raio 13 cm a partir do topo do ciclone

O código CYCLO, por sua vez, apresenta uma melhor aproximação dos dados experimentais quanto a magnitude do pico de velocidade. A curva apresenta um pequeno afastamento dos pontos experimentais em direção à parede. Este afastamento está provavelmente relacionado à função de parede para velocidade tangencial utilizada pelo código (velocidade tangencial próxima a parede = velocidade tangencial de entrada do ciclone) .

Perfil de velocidade axial

A Figura 5.4 apresenta a variação da velocidade axial do centro até a parede do ciclone a 13 centímetros a partir do seu topo.

A componente axial de velocidade em um ciclone a gás deve apresentar um comportamento descendente junto à parede e gradativamente inverter seu sentido em $r/R \approx 0,6$ (Patterson e Munz, 1996), e assim crescer até o eixo de simetria do ciclone. Ambos os modelos predizem com boa concordância os dados experimentais e a região de reversão do fluxo. O modelo 3D-Assimétrico apresenta um fluxo descendente próximo ao eixo de simetria do ciclone. Este fluxo descendente pode existir no interior do tubo de imersão em função da região de baixa pressão criada no centro do ciclone. Na posição a qual os dados foram coletados não existem zonas de fluxo descendente. No entanto, o modelo 3D-Assimétrico apresentou este perfil em função do deslocamento do pico de velocidade em direção a parede e do pouco poder de giro (Noriler, *et al.*, 2004).

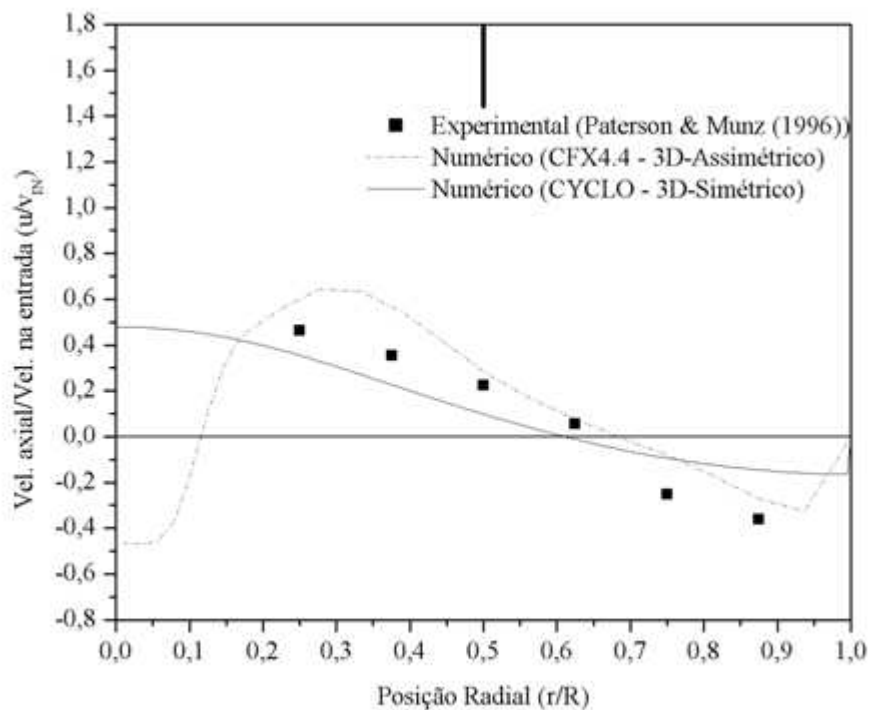


Figura 5.4 Perfil de velocidade axial ao longo do raio 13 cm a partir do topo do ciclone.

Mapas de pressão

Os mapas de pressão para ambos os modelos são ilustrados através da Figura 5.5.

Ao observar a Figura 5.5, pode-se notar que ambos os modelos apresentam uma tendência similar no campo de pressão, com pressões maiores junto às paredes e menores no eixo de simetria. Nota-se, porém, que o modelo 3D-Assimétrico (CFX 4.4), estende a zona de baixa pressão até a base do ciclone, e que pode ser justificado em função do caráter tridimensional do modelo e não ideal como o adotado pelo código CYCLO.

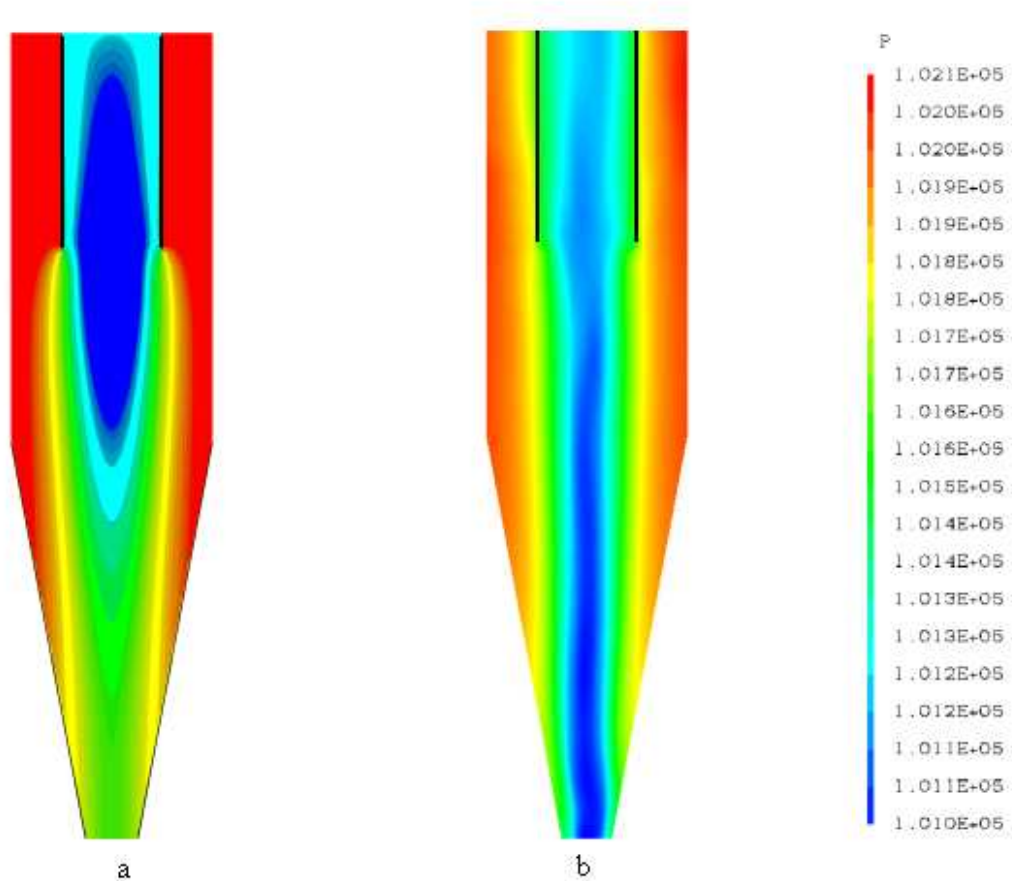


Figura 5.5 Mapas de pressão: (a) CYCLO, (b) CFX 4.4

Mapas de velocidade tangencial

A Figura 5.6 apresenta os mapas da componente tangencial de velocidade para ambos os modelos.

Observa-se na Figura 5.6 um comportamento similar entre os modelos, com a velocidade tangencial crescendo gradativamente a partir da parede até alcançar um pico e, então, ocorrendo um decréscimo até o eixo de simetria. Analisando a Figura 5.6 (b), verifica-se a hipótese adotada por Meier (1998), de que a assimetria da entrada é rapidamente absorvida logo após a seção de entrada. Esta hipótese comprovada através do modelo 3D-assimétrico, auxilia a justificar a proposta da adoção de um modelo simétrico como uma forma de simplificação do modelo utilizado pelo código CYCLO. Verifica-se também a característica ideal do escoamento representado pelo modelo 3D-simétrico onde ocorre uma região de alto giro próximo à entrada do tubo de imersão e o gradativo decréscimo do pico de velocidade tangencial em direção a base do ciclone. O modelo 3D-Assimétrico adotado pelo código CFX 4.4, apresenta a mesma característica, mas com menor intensidade em função do modelo não ter a característica de idealidade.

Com os resultados obtidos neste estudo de caso, pode-se concluir que o código CYCLO representa o comportamento do escoamento giratório em ciclones a gás. O modelo híbrido de turbulência e a adoção da simetria na entrada do ciclone, condições estas adotadas pelo programa desenvolvido, são validadas com as informações obtidas experimentalmente por Patterson e Munz (1996).

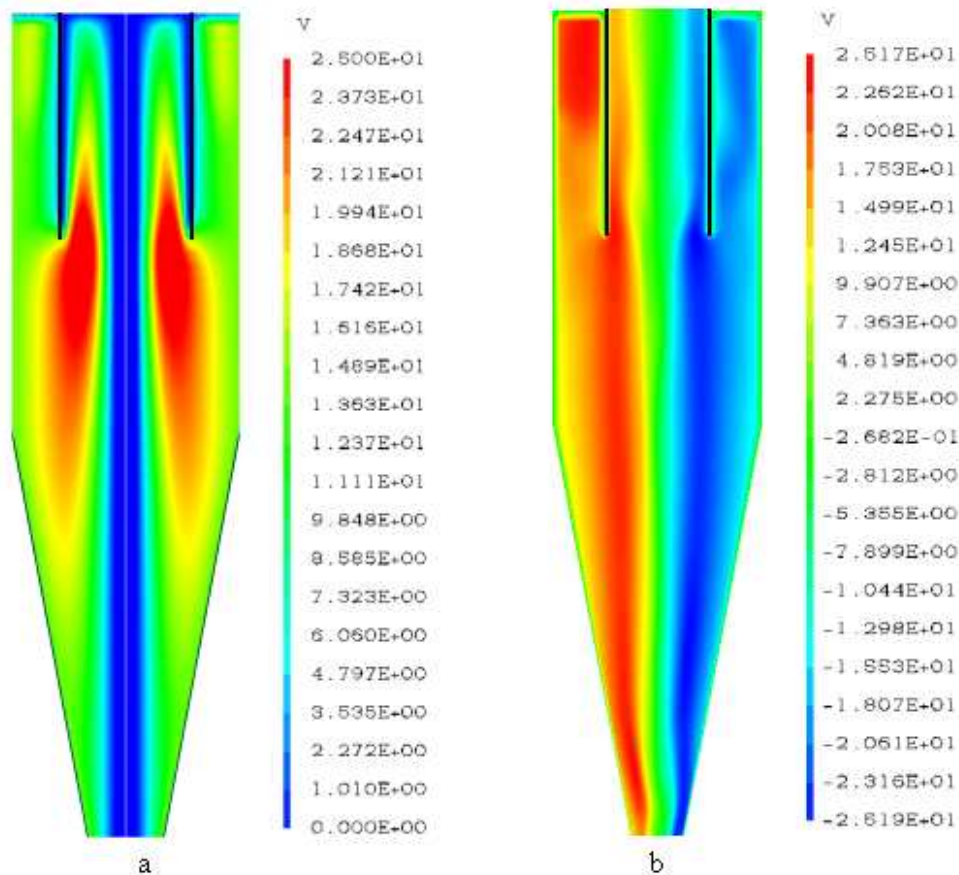


Figura 5.6 Mapas de velocidade tangencial: (a) CYCLO, (b) CFX 4.4

5.2 Estudo de Caso 02 – Sistema Multifásico

Para o estudo de experimentação numérica do sistema multifásico foram utilizadas as informações experimentais do artigo publicado por Zhao *et al.* (2004). Os autores avaliaram a influência da geometria de entrada no desempenho dos ciclones. Foram analisados três tipos diferentes de geometria de entrada: entrada tangencial convencional (CTSI); entrada direta simétrica espiralada (DSSI); e entrada convergente simétrica espiralada (CSSI). Com exceção da geometria de entrada, todas as outras dimensões são iguais para os ciclones avaliados por

Zhao *et al.* (2004). Para a comparação dos resultados com o código CYCLO, utilizam-se os resultados experimentais obtidos com o ciclone com entrada tangencial convencional (CTSI) e entrada convergente simétrica espiralada (CSSI). A entrada do tipo CTSI é usualmente a mais utilizada, e o tipo CSSI é o que se aproxima mais da hipótese de simetria na entrada adotada pelo código CYCLO. As dimensões e geometria destes ciclones são apresentadas na Tabela 5.2 e Figura 5.7.

Tabela 5.2 Dimensões do ciclone em mm

$D = D_c$	$De = D_s$	$h = L_s$	$H = L$	$B = b$	$S = L_e$	$a = L_e$	$B = D_l$
300	150	450	1200	1125	150	150	60

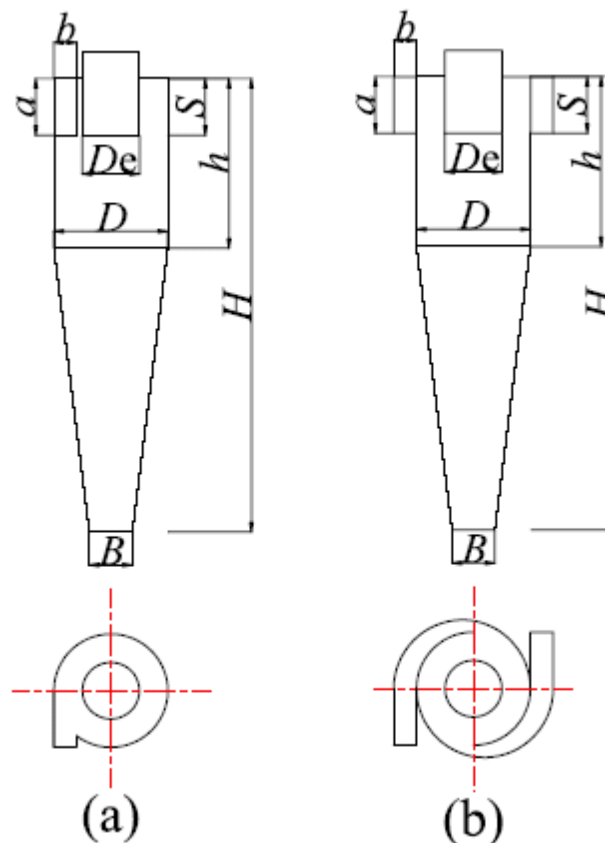


Figura 5.7 Diagrama esquemático da geometria dos ciclones: (a) CTSI e (b) CSSI

A Figura 5.8 ilustra a nomenclatura adotada pelo código CYCLO com as respectivas dimensões do ciclone.

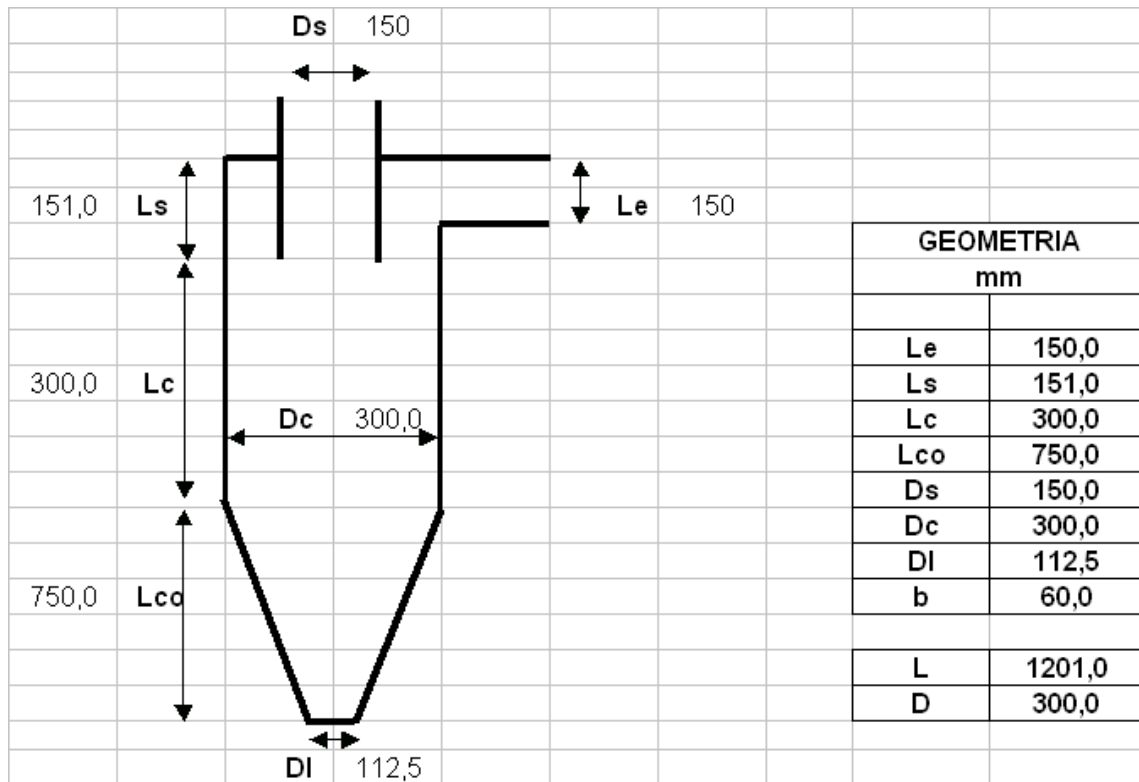


Figura 5.8 Geometria do ciclone utilizado na simulação numérica

Zhao *et al.* (2004) utilizou como fluido o ar, que durante os ensaios teve como condições a umidade relativa menor que 75%, temperatura de 19,85 °C e pressão absoluta de 0,99 bar. Como material particulado para a determinação da eficiência de coleta dos ciclones, foi utilizado talco em pó, na concentração de 5,0 g/m³. Este material foi caracterizado através de análise granulométrica e os resultados da distribuição do tamanho das partículas ajustado ao modelo de distribuição log-normal (LN), apresentando como resultado um diâmetro médio geométrico de 5,97 μm e desvio padrão de 2,08. A Tabela 5.3 apresenta as condições de operação utilizadas na experimentação numérica. Foram obtidos resultados em função da variação da vazão de ar ou velocidade de entrada no ciclone para quatro diferentes condições, nomeadas de Caso 01, Caso 02, Caso 03 e Caso 04, conforme apresentado na tabela.

Tabela 5.3 Condições de operação

Condições de Operação		Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Fase fluida		Ar	Ar	Ar	Ar
Velocidade de ar na entrada	m/s	11,99	16,04	20,18	23,85
Vazão de ar	m ³ /h	388,34	519,80	653,67	772,62
Temperatura média	°C	19,85	19,85	19,85	19,85
Pressão média (absoluta)	mBar	990,00	990,00	990,00	990,00
Fase sólida		Talco	Talco	Talco	Talco
Carga de sólidos	g/m ³	5,00	5,00	5,00	5,00
Diâmetro médio	µm	5,97	5,97	5,97	5,97
Desvio padrão	σ	2,08	2,08	2,08	2,08
Massa específica	Kg/m ³	2700,00	2700,00	2700,00	2700,00

5.2.1 Estratégia de solução

Na simulação numérica multifásica, as soluções são obtidas inicialmente para o modelo monofásico utilizando-se o esquema de interpolação UDS (upwind), para todas as variáveis, com o intuito de evitar as oscilações numéricas e garantir a estabilidade da solução. Após a convergência desta solução, analisada observando-se o valor da norma euclidiana da fonte de massa da equação de correção da pressão, a função de interpolação para os componentes de velocidade é alterada para o esquema WUDS.

Os resultados da simulação numérica do escoamento monofásico, com a utilização do esquema de interpolação WUDS para os componentes de

velocidade, são utilizados como condição inicial para a simulação do sistema multifásico.

5.2.2 Malha numérica

Inicialmente foi avaliada a influência da malha numérica nos resultados do escoamento monofásico para definição do tamanho de malha mais adequado à realização dos experimentos numéricos. A avaliação foi desenvolvida considerando-se o esforço computacional necessário e a precisão da solução numérica.

Como já discutido no Capítulo 3, a malha numérica para o código CYCLO deverá ser a mais homogênea possível como forma de garantir convergência e estabilidade numérica na solução do problema. Com a ajuda da planilha Malha_pdr (Figura 4.7), foram gerados diversos tamanhos de malha para o estudo de verificação, os quais podem ser visualizados através da Figura 5.9.

A perda de carga para o escoamento monofásico, utilizando-se o esquema de interpolação UDS para todas as variáveis, foi avaliada em função do tamanho da malha para verificação da precisão dos resultados numéricos. Os resultados são apresentados na Figura 5.10, e pode ser verificado que o refinamento da malha conduz a solução do problema para um resultado estacionário. Este resultado estacionário nos garante a precisão da solução. Em contrapartida, o esforço computacional aumenta significativamente com o refinamento da malha, o que pode ser verificado na Tabela 5.4.

Em busca de resultados que possam ser utilizados para a validação do código CYCLO e, ao mesmo tempo, em que permita tempos computacionais de simulação otimizados, optou-se pela malha 1 x 8 mm como padrão para a simulação numérica do sistema multifásico.

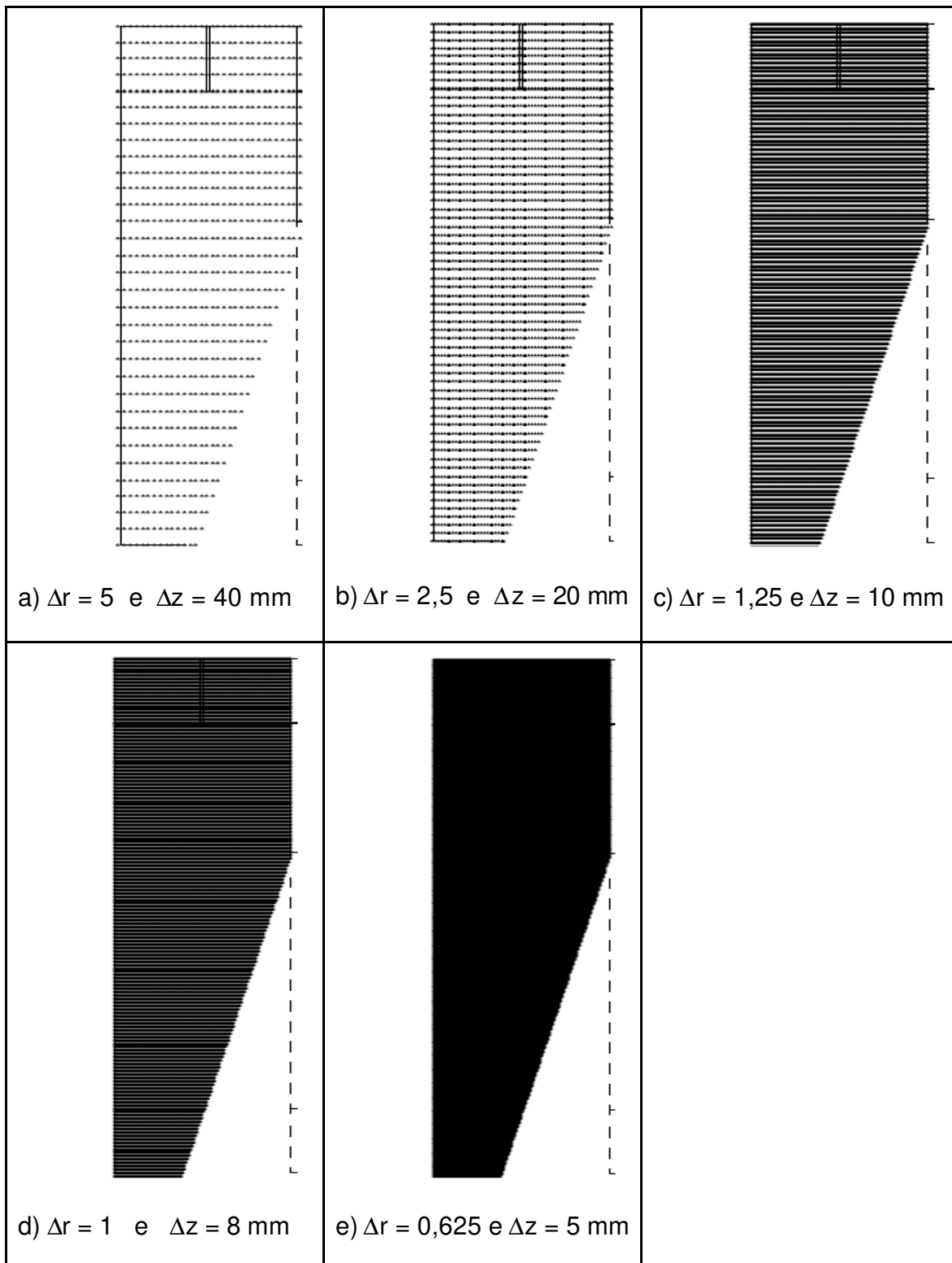


Figura 5.9 Tamanho das malhas verificadas

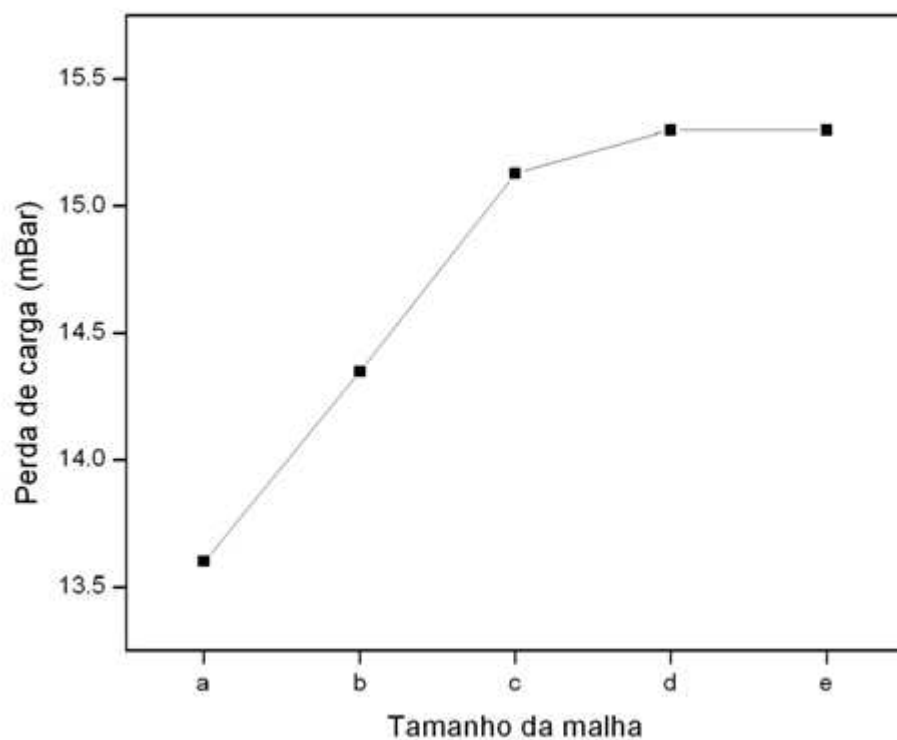


Figura 5.10 Perda de carga em função do tamanho da malha

Tabela 5.4 Tempo computacional em função do tamanho da malha

Malha	Processador	Tempo (h)
A	Pentium (R) 4CPU 3.06GHz	2,40
B	Pentium (R) 4CPU 3.06GHz	9,79
C	Pentium (R) 4CPU 3.06GHz	44,34
D	Pentium (R) 4CPU 3.06GHz	56,56
E	Pentium (R) 4CPU 3.06GHz	218,15

5.2.3 Tratamento da fase sólida

O código CYCLO utiliza diâmetros médios para a representação da fase sólida. Os modelos bifásico e tetrafásico diferem na quantidade de diâmetros utilizados para representar a fase particulada. A seguir é apresentada a definição dos tamanhos de partículas para cada modelo.

Geralmente, o material particulado é caracterizado através de análise granulométrica e representado por algum modelo de distribuição. No caso em estudo, o material particulado segue a distribuição log-normal (LN), e apresenta como resultados um diâmetro médio geométrico $D_{50} = 5,97 \mu\text{m}$ e desvio padrão geométrico $\sigma = 2,08$.

O modelo de distribuição log-normal é expresso matematicamente da seguinte forma (Frare *et al.*, 2000):

$$D_p = D_{50} \exp\left[\left(\sqrt{2} \ln \sigma\right)z\right] \quad (5.1)$$

$$z = \text{erf}^{-1}(2X - 1) \quad (5.2)$$

onde X é a fração mássica de partículas cujo diâmetro é menor que D_p , e erf^{-1} é a função erro inversa.

Através destas expressões é possível a reconstituição da distribuição do tamanho das partículas da amostra em estudo (Tabela 5.5).

Com base nestas informações, é possível definir o tamanho das partículas e a respectiva fração mássica (ou volumétrica), a ser utilizada em cada modelo. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 5.6. Neste caso, como o material particulado possui a mesma massa específica, a fração mássica e a volumétrica são iguais.

Tabela 5.5 Reconstituição dos dados de distribuição de tamanhos das partículas

D_p (μm)	X (%)
32,80	99,00
19,91	95,00
15,26	90,00
12,42	84,13
7,38	61,38
8,25	67,06
5,97	50,00
4,83	38,62
4,32	32,93
2,87	15,87
2,33	10,00
1,79	5,00
1,09	1,00

Tabela 5.6 Definição do diâmetro da partícula e fração volumétrica

Modelo	Diâmetro da Partícula	Fração Volumétrica
	μm	%
Bifásico	5,97	100,00
Tetrafásico	12,42	15,87
	5,97	68,26
	2,87	15,87

Modelo bifásico

Para o modelo bifásico é necessário somente um tamanho de partícula para representar a fase sólida e, portanto, utilizou-se o diâmetro médio geométrico (D_{50}) da amostra que é de 5,97 μm .

Modelo tetrafásico

Para o modelo tetrafásico, é necessário representar o material sólido através de três diferentes diâmetros de partícula, o que pode ser obtido através do conhecimento dos parâmetros do modelo log-normal tal como exemplificado a seguir para os dados de Zhao *et al.* (2004) e apresentados na Tabela 5.6:

Parâmetros do modelo

Os parâmetros do modelo são obtidos diretamente da Tabela 5.5.

Diâmetro médio geométrico (D_{50})

Representa o diâmetro da partícula obtida na Tabela 5.5 com $X = 50\%$.

$$D_{50} = 5,97 \mu\text{m}$$

Desvio padrão geométrico (σ)

O desvio padrão geométrico é a média das seguintes relações (Frare *et al.*, 2000):

$$\sigma = \frac{D_{50}}{D_{15,87}} \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{D_{84,13}}{D_{50}}$$

Os valores de $D_{15,87}$ e $D_{84,13}$ são também obtidos na Tabela 5.5, ou, conhecendo-se o desvio padrão geométrico do material em estudo ($\sigma = 2,08$), os valores de $D_{15,87}$ e $D_{84,13}$ podem ser calculados:

$$D_{15,87} = 2,87 \mu\text{m} \quad \text{e} \quad D_{84,13} = 12,42 \mu\text{m}$$

Deste modo podem-se obter os valores dos diâmetros médios das partículas e suas respectivas frações volumétricas que serão utilizadas para representar a fase sólida no modelo tetrafásico.

O domínio de cada diâmetro no modelo bifásico e tetrafásico são ilustrados pelas Figuras 5.11 e 5.12.

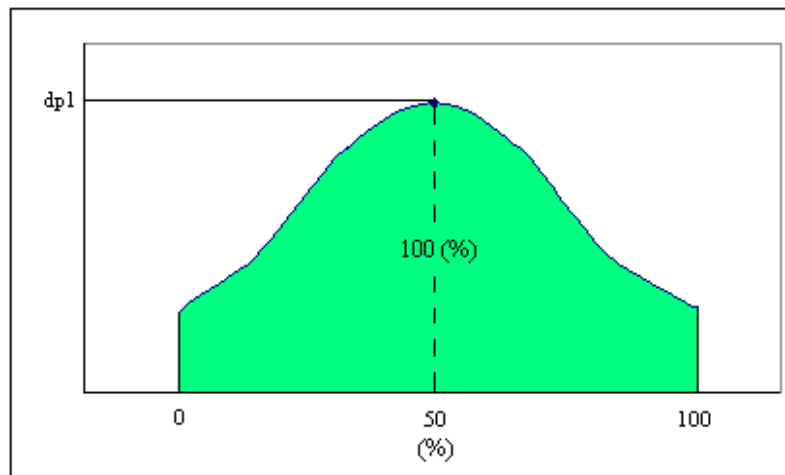


Figura 5.11 Fração volumétrica em função do diâmetro: modelo bifásico

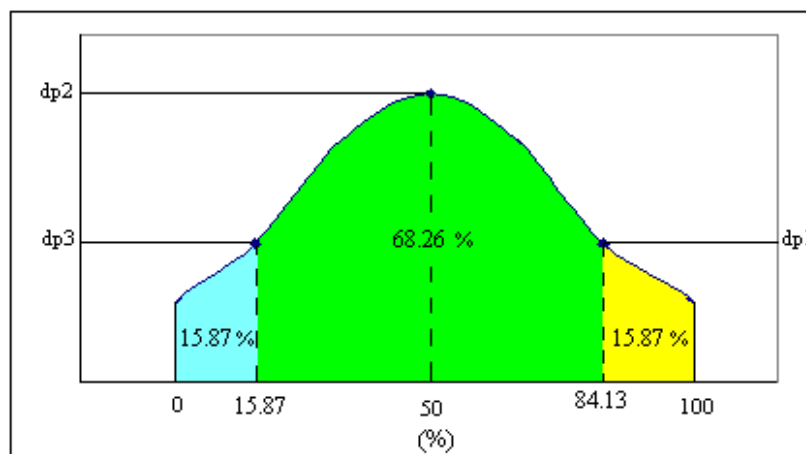


Figura 5.12 Fração volumétrica em função do diâmetro: modelo tetrafásico

5.2.4 Comparação dos resultados

As informações macroscópicas utilizadas na avaliação do desempenho dos ciclones são as eficiências de coleta e as perdas de carga. Para as condições

de processo e ciclone acima descrito, Zhao *et al.* (2004) obteve estas informações experimentalmente. Para validação do código CYCLO, comparamos os resultados experimentais com os valores obtidos numericamente.

Eficiência de coleta

A Figura 5.13 apresenta os resultados da eficiência global do ciclone em função da velocidade de entrada, obtidos experimentalmente por Zhao *et al.* (2004) e os valores numéricos preditos pelo modelo bifásico e tetrafásico.

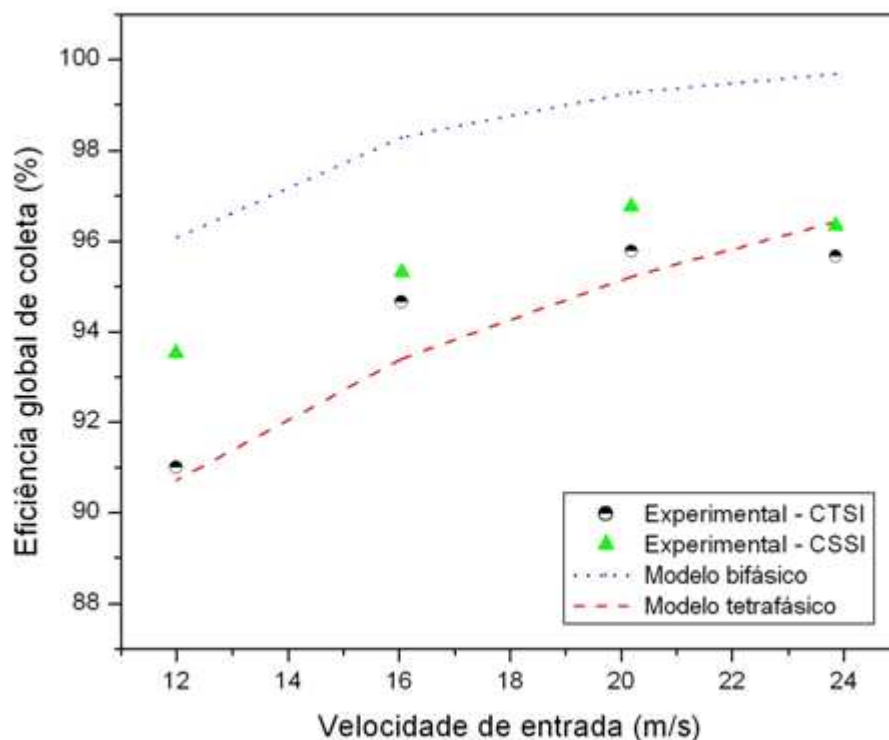


Figura 5.13 Eficiência global de coleta em função da velocidade de entrada

Como usualmente esperado, a eficiência de coleta aumenta com o aumento da velocidade de entrada para todos os casos. Cabe aqui mencionar os resultados obtidos por Zhao *et al.* (2004), onde a eficiência global do ciclone com

entrada convergente simétrica espiralada (CSSI) foi, para todos os experimentos, sempre maior que o ciclone com entrada tangencial convencional (CTSI). Como já mencionado anteriormente, o código CYCLO não consegue prever esta diferença já que o modelo proposto pressupõe entrada simétrica. Os resultados obtidos numericamente apresentam boa concordância com os valores experimentais, apresentando desvios inferiores a 3% para o modelo tetrafásico e inferiores a 5,57 % para o modelo bifásico.

De acordo com a Figura 5.13 e os resultados de desvios apresentados anteriormente, o modelo tetrafásico pode prever a eficiência global de coleta melhor que o modelo bifásico usual. Isto torna-se verdadeiro quando se utiliza um modelo de distribuição para a avaliação da eficiência de um conjunto de partículas (material heterogêneo), já que o modelo tetrafásico considera a influência de três diferentes tamanhos de partícula, enquanto que o modelo bifásico usual utiliza-se apenas do diâmetro médio para representar o conjunto de partículas que se necessita determinar a eficiência global de coleta.

Para a análise da eficiência de coleta em função do diâmetro de partícula, o modelo bifásico foi utilizado. Nesta análise, o material particulado foi considerado homogêneo e representado por um único diâmetro de partícula, não necessitando desta forma a utilização do modelo tetrafásico. Esta hipótese foi assumida considerando-se que não há partículas de diferentes tamanhos nos resultados experimentais da eficiência de coleta por tamanho de partícula. As Figuras 5.14 a 5.17 comparam os resultados obtidos experimentalmente e preditos através do modelo bifásico, da eficiência de coleta em função do diâmetro da partícula para o ciclone em estudo com diferentes velocidades de entrada. Como esperado, a eficiência de coleta aumenta com o aumento do tamanho das partículas para todos os casos apresentados. Os resultados obtidos numericamente com o modelo bifásico apresentam concordância razoável com os valores experimentais, apresentando desvios maiores nos tamanhos de partículas menores para as velocidades de 20,18 m/s (Figura 5.16) e 23,85 m/s (Figura 5.17).

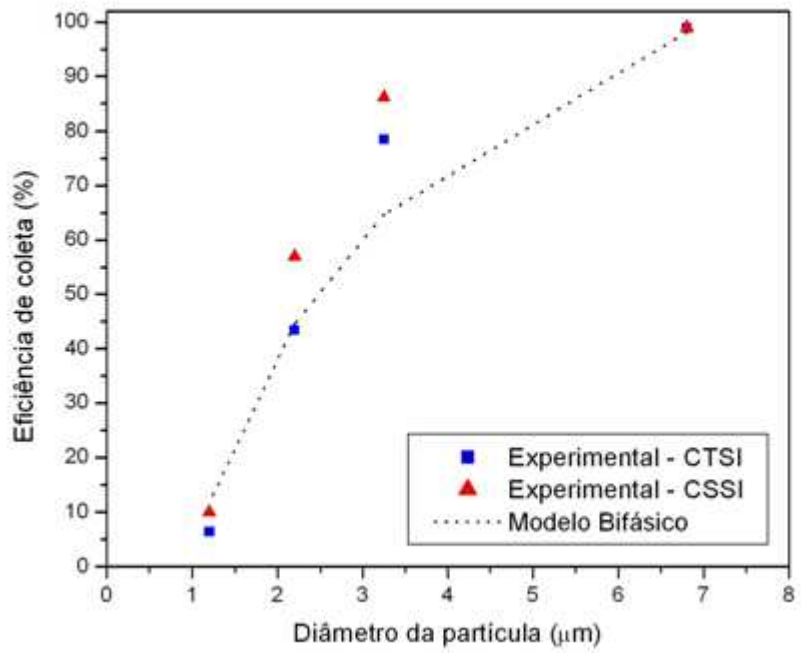


Figura 5.14 Eficiência de coleta - $V_{\text{entrada}} = 11,99 \text{ m/s}$

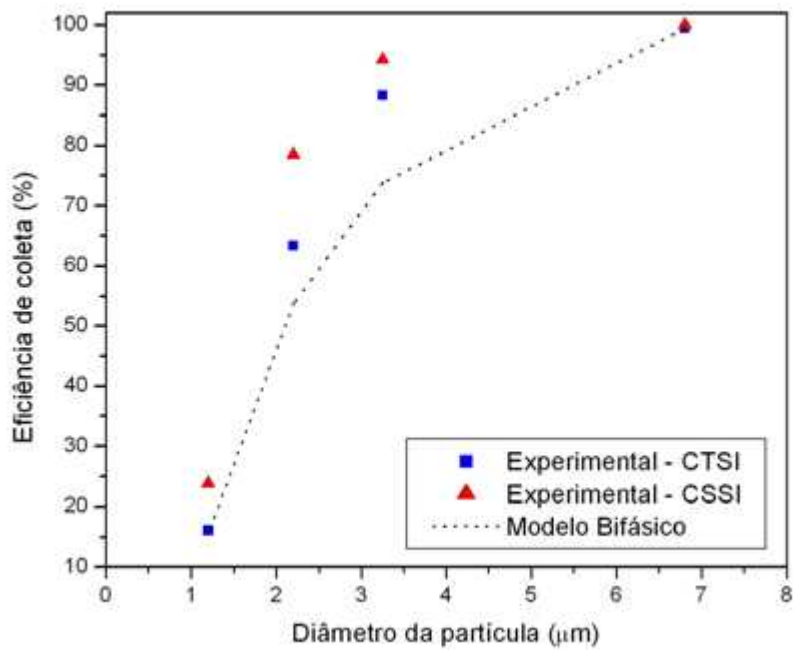


Figura 5.15 Eficiência de coleta - $V_{\text{entrada}} = 16,04 \text{ m/s}$

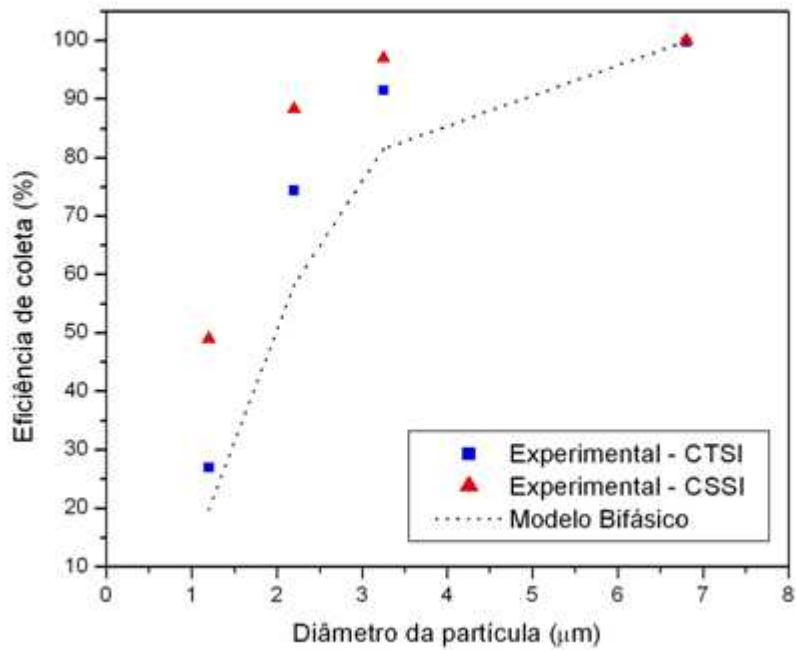


Figura 5.16 Eficiência de coleta - $V_{\text{entrada}} = 20,18 \text{ m/s}$

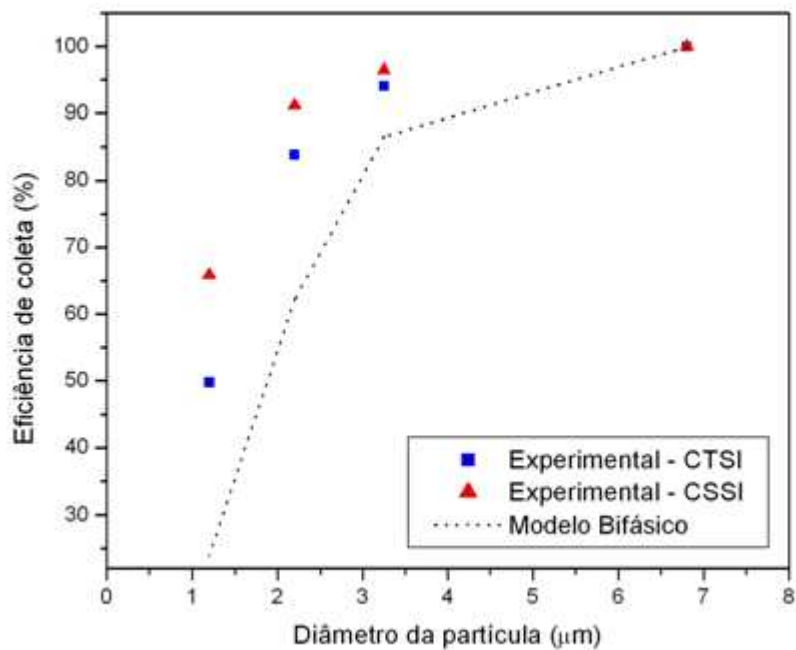


Figura 5.17 Eficiência de coleta - $V_{\text{entrada}} = 23,85 \text{ m/s}$

Perda de carga

Na Figura 5.18 são apresentados valores de perda de carga para o ciclone em estudo. Os valores experimentais obtidos por Zhao *et al.* (2004) foram medidos através de um micromanômetro digital entre os flanges (conexões) de entrada e saída do ciclone. O código CYCLO, por sua vez, prediz a perda de carga no ciclone (conforme malha apresentada na Figura 5.9), mas não considera os flanges de entrada e saída. Esta diferença é muito pequena e pode ser desprezada.

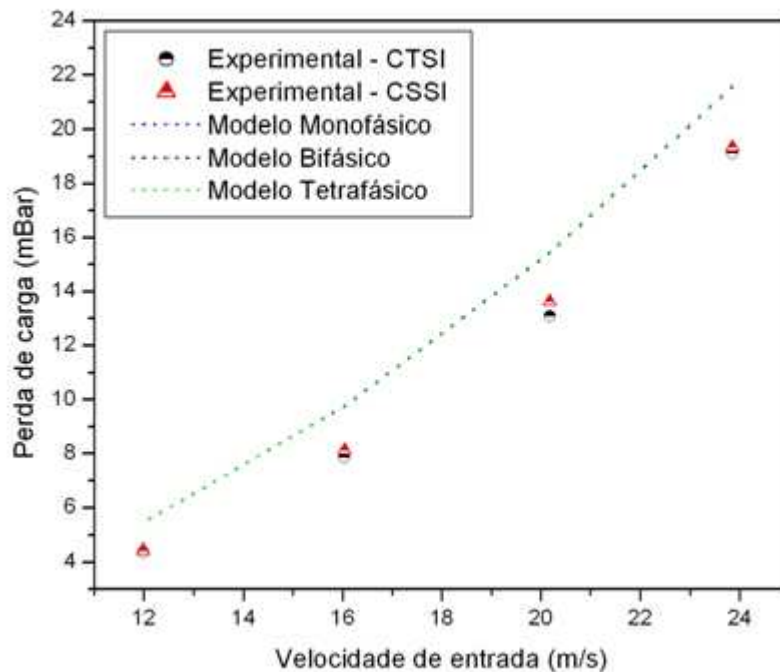


Figura 5.18 Perda de carga em função da velocidade de entrada

A comparação dos resultados demonstra que os valores preditos possuem, como esperado, a mesma tendência dos resultados obtidos experimentalmente, isto é, a perda de carga aumenta com o aumento da velocidade de entrada. Observa-se também, que os resultados numéricos são praticamente iguais para os modelos. Isto pode ser explicado devido a baixa carga de sólidos utilizada no experimento (5 g/m^3), o que nos leva a supor que a perda

de carga é praticamente quase que na totalidade devido ao escoamento do ar no interior do ciclone. Os resultados obtidos com o código CYCLO apresentam boa concordância, apresentando como, por exemplo, desvios de aproximadamente 10,51 a 18,86% entre o modelo bifásico e o resultado experimental-CSSI.

Mapas de fração volumétrica

As Figuras 5.19 a 5.21 apresentam os mapas de fração volumétrica para cada fase sólida obtidas com o código CYCLO (modelo tetrafásico), para o caso em estudo com velocidade de entrada de 20,18 m/s. Verifica-se, principalmente na Figura 5.21, que partículas de sólido são arrastadas pela corrente gasosa em direção ao topo do ciclone através do “vortex-finder”, causando perda de material e com isso redução da eficiência global de coleta.

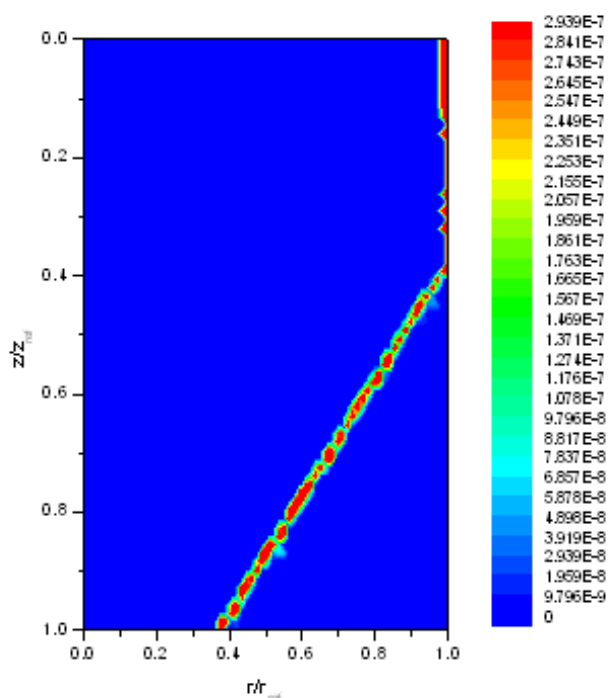


Figura 5.19 Mapa da fração volumétrica da fase sólida 1 ($d_p = 12,42 \mu\text{m}$)

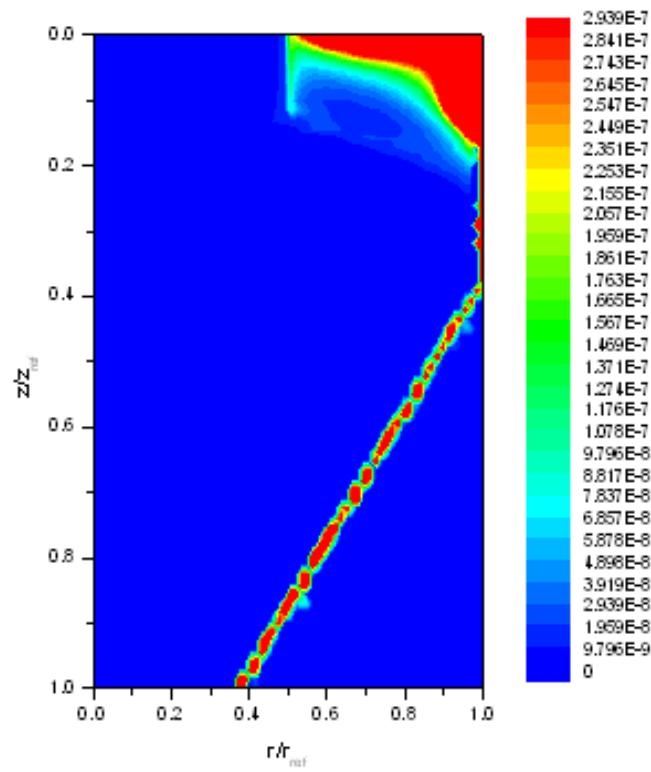


Figura 5.20 Mapa da fração volumétrica da fase sólida 2 ($d_p = 5,97 \mu\text{m}$)

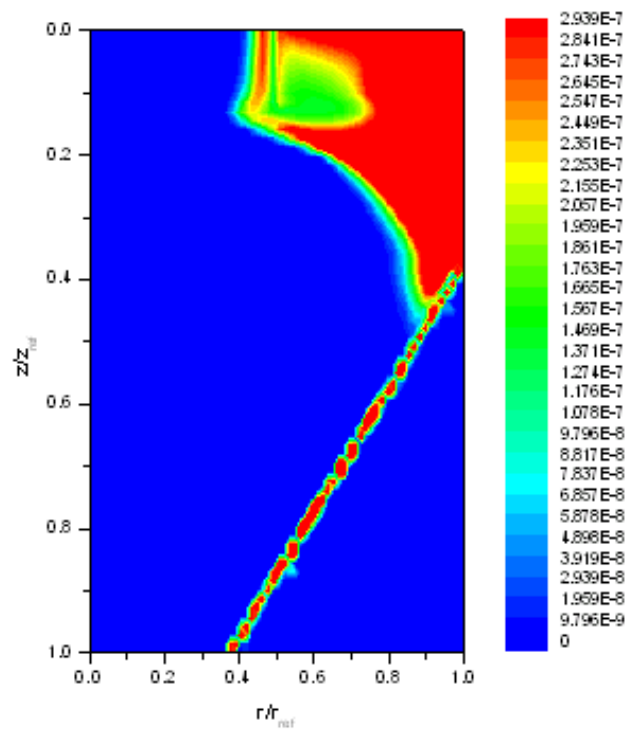


Figura 5.21 Mapa da fração volumétrica da fase sólida 3 ($d_p = 2,7 \mu\text{m}$)

5.3 Ampliação de Escala (“scale-up”) em Ciclones

Nas unidades anteriores, o programa CYCLO foi verificado utilizando-se resultados experimentais obtidos em escala de bancada. Para demonstrar a potencialidade do código na ampliação de escala (“scale-up”) em ciclones, apresentam-se nesta unidade resultados numéricos do desempenho de ciclones de diferentes geometrias. Como base para esta experimentação numérica, informações operacionais e geométricas do estudo de caso apresentado anteriormente para o sistema multifásico (informações experimentais obtidas por Zhao *et al.*, 2004), foram utilizadas.

As condições de operação são apresentadas na Tabela 5.7, e representam as informações do Caso 03 apresentado anteriormente, que possui velocidade de ar na entrada do ciclone de 20,18 m/s.

Tabela 5.7 Condições de operação

Condições de Operação		Caso 03
Fase fluida		Ar
Velocidade de ar na entrada	m/s	20,18
Vazão de ar	m ³ /h	653,67
Temperatura média	°C	19,85
Pressão média (absoluta)	mBar	990,00
Fase sólida		Talco
Carga de sólidos	g/m ³	5,00
Diâmetro médio	µm	5,97
Desvio padrão	σ	2,08
Massa específica	Kg/m ³	2700,00

O “scale-up” dos ciclones é proporcional, sendo: o ciclone C1b, 5 (cinco) vezes maior que o ciclone base C1a; o ciclone C1c, 10 (dez) vezes; e o ciclone C1d, 15 vezes. Através da Figura 5.22 é possível visualizar as diferenças no tamanho destes ciclones. Na Tabela 5.8, as dimensões do ciclone base C1a e demais ciclones são apresentadas.

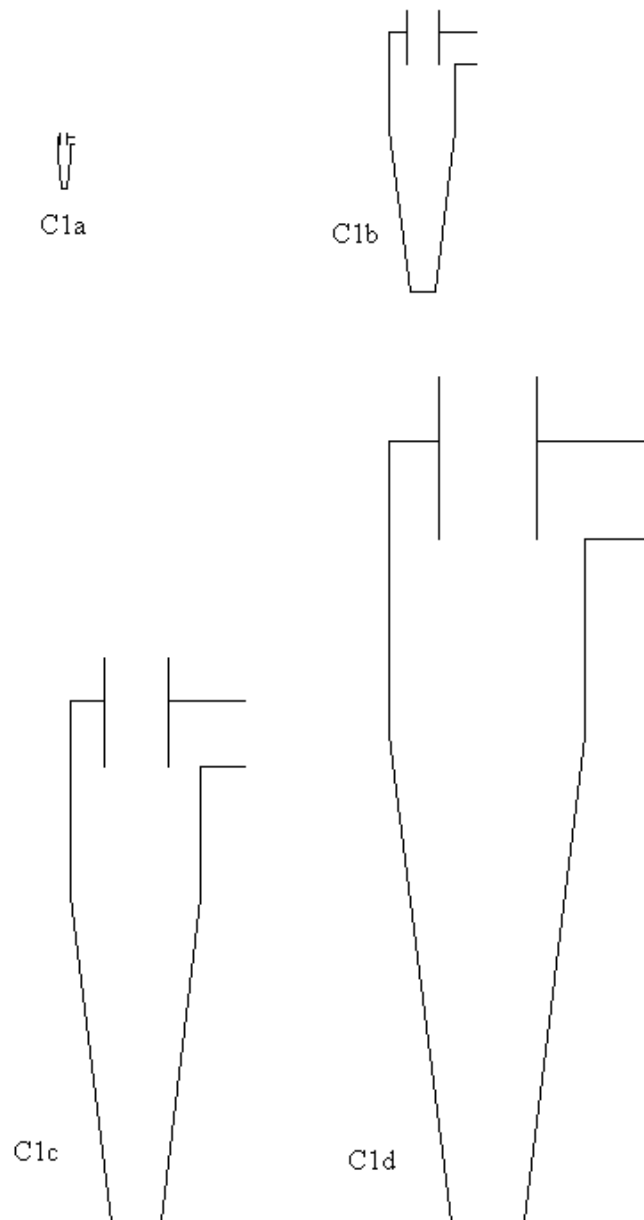


Figura 5.22 Desenho esquemático dos ciclones C1a, C1b, C1c e C1d

Tabela 5.8 Dimensões dos ciclones

Dimensão (mm)	Ciclones			
	C1a	C1b	C1c	C1d
Altura da seção de entrada, L_e	150,00	750,00	1500,00	2250,00
Altura do “vortex-finder”, L_s	151,00	755,00	1510,00	2265,00
Altura da seção circular, L_c	300,00	1500,00	3000,00	4500,00
Altura da seção cônica, L_{co}	750,00	3750,00	7500,00	11250,00
Diâmetro do “vortex-finder”, D_s	150,00	750,00	1500,00	2250,00
Diâmetro do cilindro, D_c	300,00	1500,00	3000,00	4500,00
Diâmetro do “underflow”, D_I	112,50	562,50	1125,00	1687,50
Largura da seção de entrada, B	60,00	300,00	600,00	900,00
Comprimento total, L	1201,00	6005,00	12010,00	18015,00

A estratégia de solução e os cuidados na construção da malha numérica discutida e apresentada anteriormente foram rigorosamente obedecidos. O código CYCLO, versão bifásico, é utilizado para as simulações numéricas. Em todas as simulações, independente do tamanho do ciclone, é utilizada as condições de operação apresentadas na Tabela 5.7.

5.3.1 Resultados obtidos

O principal objetivo deste estudo de caso é avaliar a flexibilidade do código computacional CYCLO em função da mudança de escala no tamanho dos ciclones. Os ciclones C1a-d foram simulados numericamente com o modelo bifásico e com as informações geométricas e condições de operação apresentadas anteriormente na Tabela 5.6 e 5.7.

A Figura 5.23 apresenta o resultado da perda de carga do escoamento multifásico para os ciclones. Como esperado, independente do tamanho do ciclone, a perda de carga é praticamente a mesma (diferenças são inferiores a 1%).

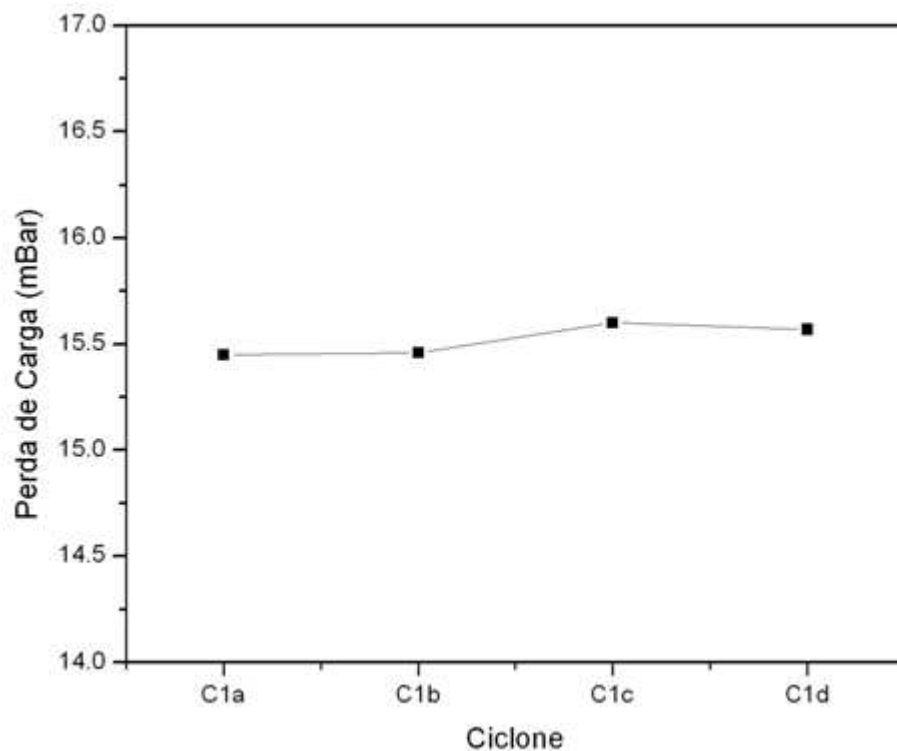


Figura 5.23 Perda de carga dos ciclones

O resultado da eficiência global de coleta para os diferentes ciclones é ilustrado pela Figura 5.24. Como pode ser observada, a eficiência de coleta diminui com o aumento do tamanho do ciclone. Este resultado era esperado, e pode ser explicado em função da trajetória da partícula no ciclone. Como a velocidade de entrada nos diversos ciclones é a mesma (20,18 m/s), a partícula no ciclone menor ($D_c = 300$ mm), possui um menor trajeto a ser percorrido até alcançar a parede. Já no ciclone maior ($D_c = 4500$ mm), a distância que a partícula tem que percorrer até alcançar a parede é maior, e como consequência, a probabilidade de ser arrastada pela corrente de ar é também maior, diminuindo portanto a eficiência global de coleta do ciclone.

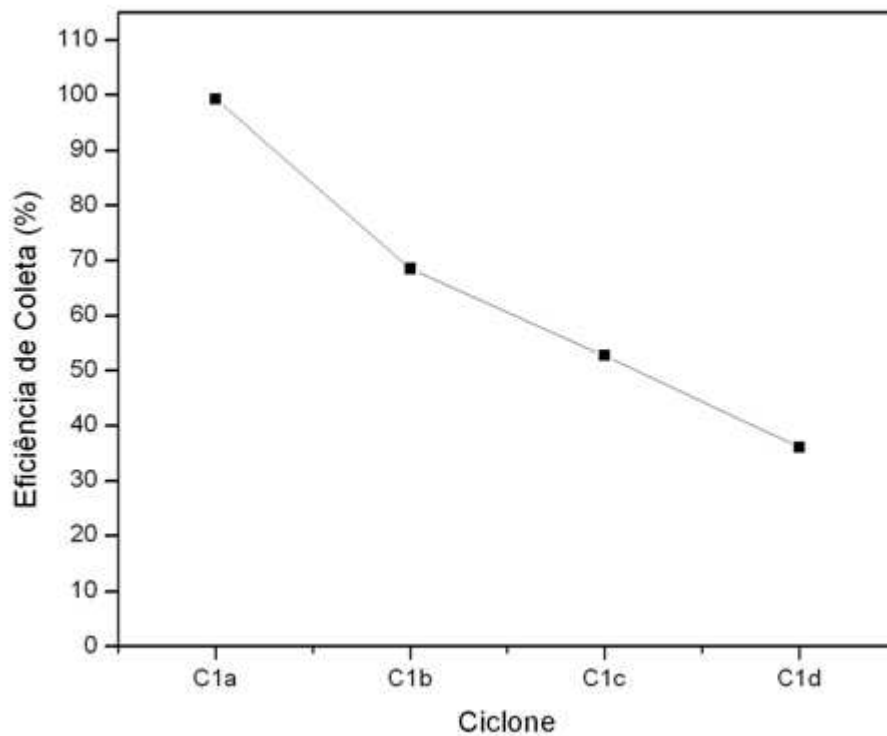


Figura 5.24 Eficiência de coleta dos ciclones

A visualização do comportamento fluidodinâmico dos ciclones através de mapas de velocidade tangencial, pressão e fração volumétrica, são utilizadas nesta seção para verificar os resultados de desempenho obtidos anteriormente.

Como já apresentado e verificado através da Figura 5.23, a perda de carga obtida nos diferentes ciclones é praticamente a mesma. Este resultado macroscópico pode ser visualizado microscopicamente através dos mapas de velocidade tangencial (Figura 5.25) e mapas de pressão (Figuras 5.26). Verifica-se através destas figuras, que não existem diferenças microscópicas visíveis, o que ratifica os resultados macroscópicos encontrados anteriormente.

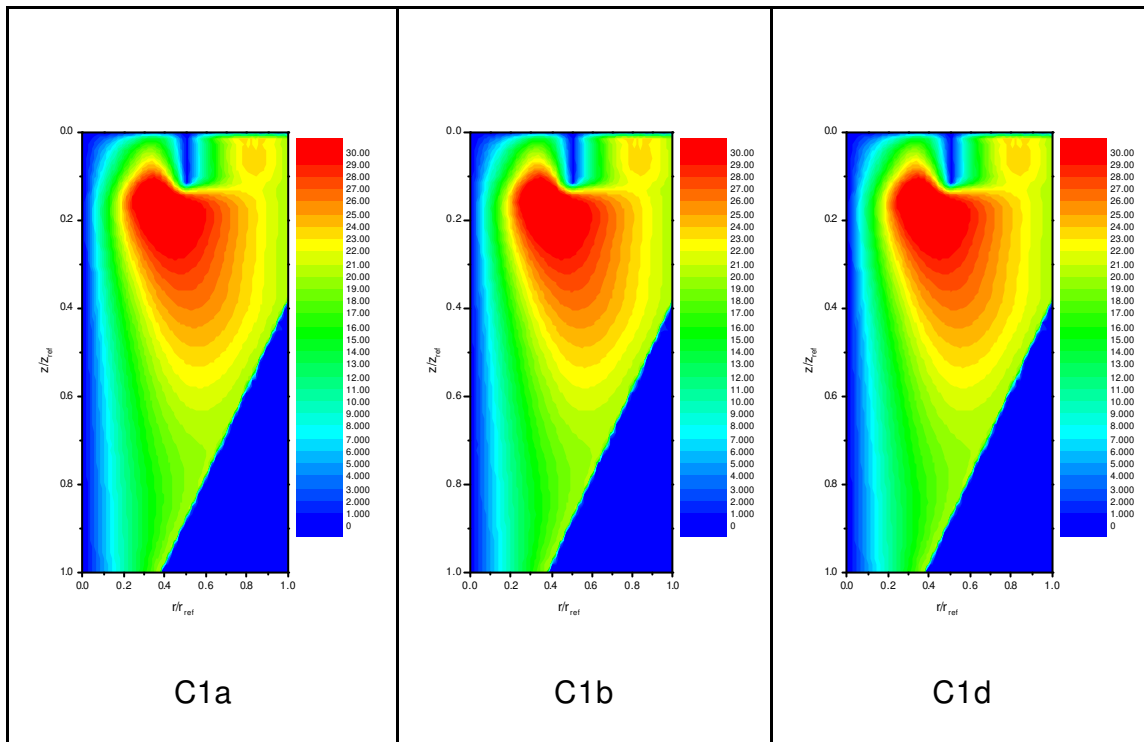


Figura 5.25 Mapas de velocidade tangencial: Ciclones C1a, C1b e C1d

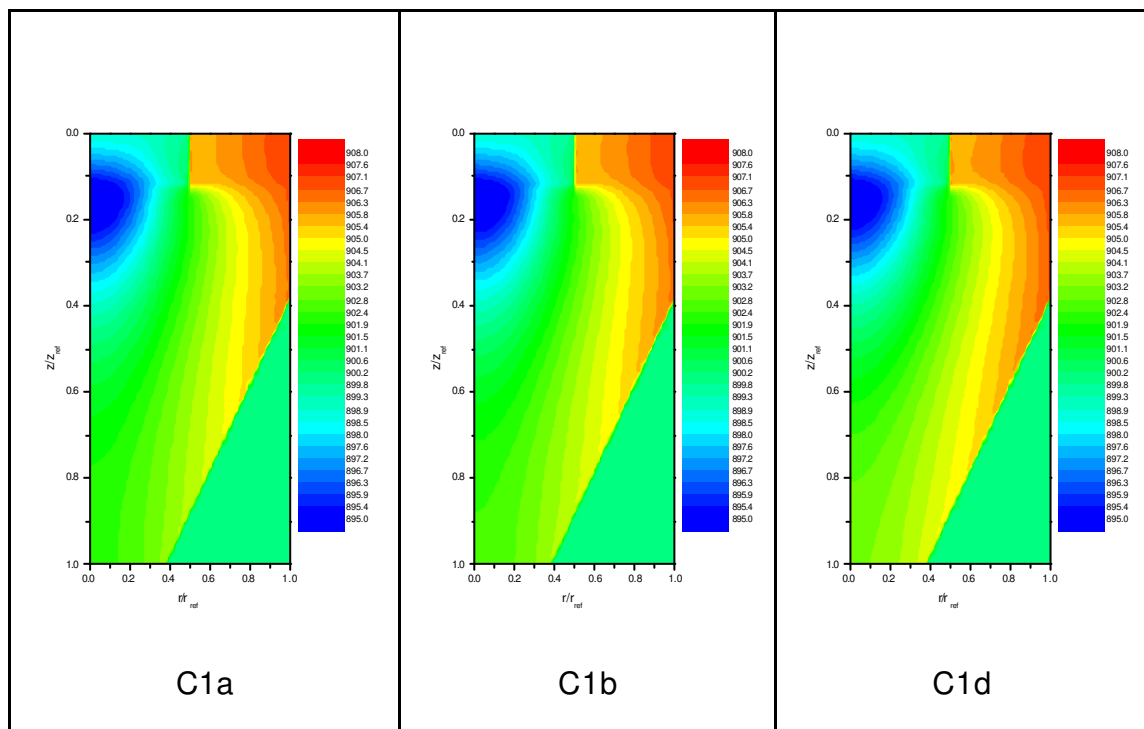


Figura 5.26 Mapas de pressão: Ciclones C1a, C1b e C1d

Os mapas de fração volumétrica apresentados na Figura 5.27 retratam os resultados macroscópicos obtidos anteriormente e visualizados através da Figura 5.24, que apontam uma redução da eficiência global de coleta quando do aumento no tamanho do ciclone. Verifica-se visualmente na Figura 5.27, que os ciclones C1b e C1d apresentam uma concentração maior de partículas na região de ascendência do gás. Estas partículas são arrastadas pela corrente gasosa em direção ao topo do ciclone através do “vortex-finder” causando perda de material, e com isso, redução da eficiência global de coleta.

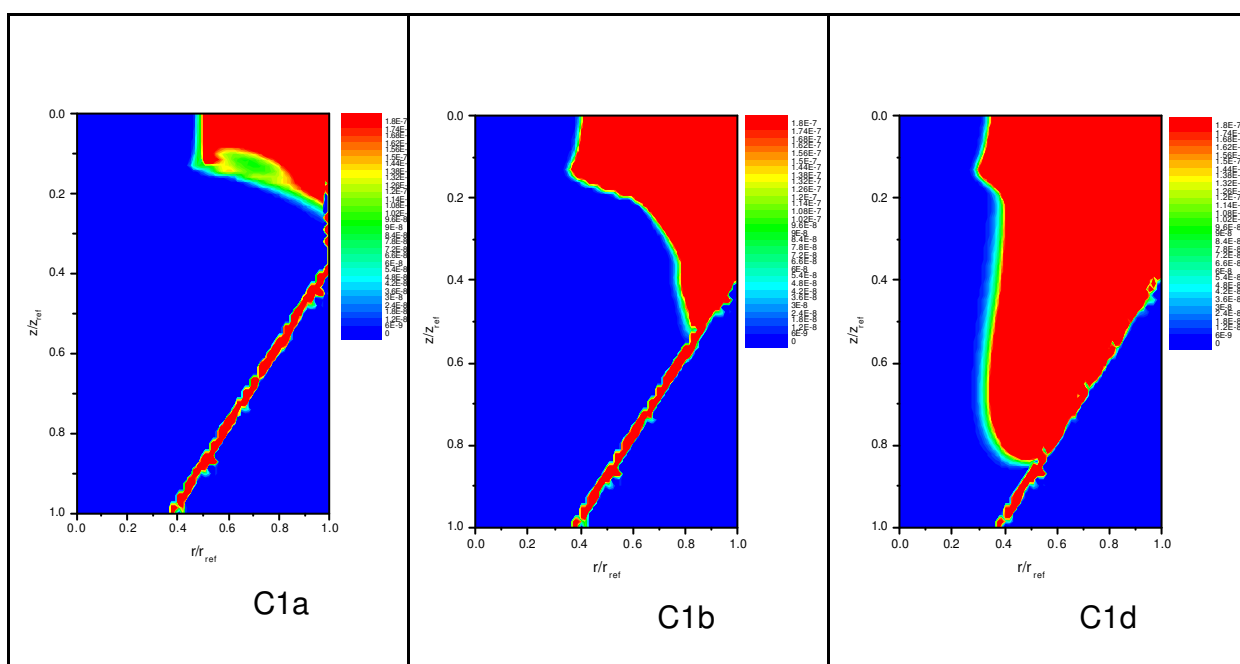


Figura 5.27 Mapas de fração volumétrica: Ciclones C1a, C1b e C1d

Neste capítulo apresentamos estudos de casos que foram utilizados para a verificação do código CYCLO no escoamento monofásico e multifásico de ciclones. Pode-se concluir que o programa CYCLO apresentou resultados satisfatórios que possibilitam utilizar o código como uma ferramenta de suporte no projeto e otimização de ciclones.

CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DE CICLONES INDUSTRIAIS

No desenvolvimento do código CYCLO vários estudos foram realizados para avaliar a potencialidade e confiabilidade do simulador. Através da parceria com uma empresa de fabricação de cimentos., realizamos estudos de simulação numérica para avaliação de ciclones de tamanho industrial. Dentre os vários estudos realizados, vamos apresentar nas próximas seções dois estudos de caso que demonstram o potencial da análise de ciclones através da técnica da fluidodinâmica computacional. O código CYCLO, versão bifásico, foi o programa utilizado nestes dois estudos de caso.

6.1 Avaliação de Torre de Ciclones

Neste estudo de caso, o programa CYCLO (versão bifásico), foi utilizado para avaliar o desempenho de uma torre de ciclones utilizada na produção de cimento. Os ciclones são utilizados na indústria de cimento para o pré-aquecimento da matéria-prima (farinha). A Figura 6.1 apresenta esquematicamente uma torre de ciclones, composta de 2 correntes, cada uma possuindo 4 ciclones conectados em série. O aquecimento da matéria-prima ocorre em todos os ciclones, sendo a alimentação da farinha efetuada no primeiro ciclone, C1. Os gases quentes, provenientes do forno de combustão, entram em contracorrente no ciclone C4 e percorrem os outros ciclones aquecendo a matéria-prima. No ciclone C4 (região de calcinação), devido às altas temperaturas, reações químicas e de combustão são predominantes. O material sólido coletado no ciclone C4 vai para o forno.

O código CYCLO foi utilizado para prever a perda de carga e a eficiência dos ciclones. Os ciclones possuem diferentes geometrias e operam a temperaturas altas e elevadas razões de carga. Através da análise e comparação dos resultados numéricos obtidos com as informações oriundas da unidade industrial, é possível verificar o desempenho da torre de ciclones.

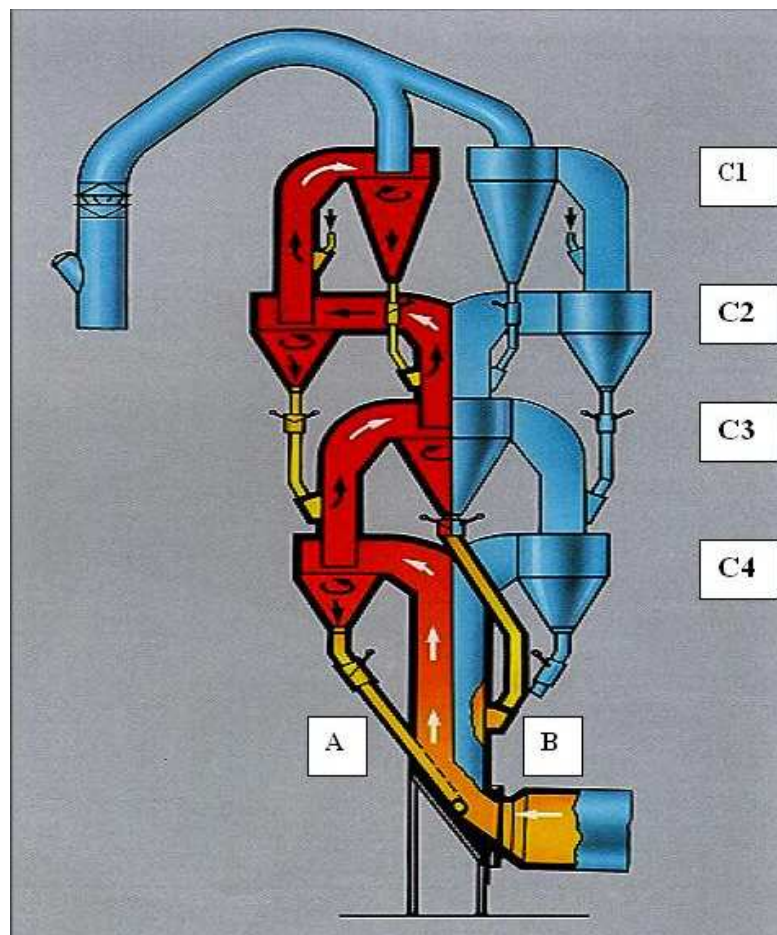


Figura 6.1 Torre de ciclones

6.1.1 Configurações geométricas e condições de operação dos ciclones

As dimensões dos ciclones utilizados neste estudo estão apresentadas na Tabela 6.1. Os ciclones C4A e C4B não foram utilizados nesta investigação, pois o

programa CYCLO não está preparado para simular os fenômenos de combustão e calcinação que ocorrem nestes dois ciclones. A nomenclatura utilizada na Tabela 6.1 é a mesma já apresentada anteriormente. As dimensões dos ciclones para cada estágio são as mesmas para as correntes A e B da torre de ciclones.

Tabela 6.1 Dimensões dos ciclones

Dimensão (mm)	Ciclones		
	C1A-C1B	C2A-C2B	C3A-C3B
Altura da seção de entrada, Le	1849,00	1720,00	1720,00
Altura do “vortex-finder”, Ls	5490,00	2060,00	2060,00
Altura da seção circular, Lc	5469,00	3660,50	3660,50
Altura da seção cônica, Lco	6180,00	5703,50	5703,50
Diâmetro do “vortex-finder”, Ds	3500,00	3190,00	3190,00
Diâmetro do cilindro, Dc	5701,00	5333,00	5333,00
Diâmetro do “underflow”, DI	865,00	952,00	952,00
Largura da seção de entrada, B	3721,00	4244,00	4244,00

As condições de operação da torre de ciclones utilizadas para a simulação numérica foi obtida de um caso real da indústria de cimento. As Tabelas 6.2 e 6.3 apresentam um resumo das informações utilizadas para os ciclones das correntes A e B, respectivamente.

A distribuição do tamanho das partículas considerada neste estudo é apresentada na Tabela 6.4, e representa uma situação de operação onde o diâmetro médio é de aproximadamente 31,34 μm para o ciclone C1, 30,86 μm para o ciclone C2 e 29,43 μm para o ciclone C3. Esses valores médios foram obtidos através da média ponderada dos valores apresentados na Tabela 6.4 : diâmetro médio = S diâmetro da partícula x % abaixo da peneira. Como esperado, o diâmetro médio das partículas diminuiu com o aumento da temperatura (Tabela 6.4), devido a volatilização de alguns dos componentes.

Tabela 6.2 Condições de operação – Corrente A

Condições de Operação		Ciclones		
		C1A	C2A	C3A
Vazão volumétrica	m ³ /s	121,78	156,07	178,88
Velocidade de ar na entrada	m/s	17,70	21,38	24,50
Carga de sólidos	g/m ³	471,83	340,94	297,46
Temperatura média	°C	460,42	670,88	832,47
Pressão média (absoluta)	mBar	873,96	877,54	896,74

Tabela 6.3 Condições de operação – Corrente B

Condições de Operação		Ciclones		
		C1B	C2B	C3B
Vazão volumétrica	m ³ /s	128,88	163,33	178,88
Velocidade de ar na entrada	m/s	18,73	22,37	24,50
Carga de sólidos	g/m ³	445,84	327,92	299,42
Temperatura média	°C	477,46	686,31	802,57
Pressão média (absoluta)	mBar	869,67	877,22	898,01

Tabela 6.4 Dados de distribuição do tamanho das partículas

Diâmetro da partícula (µm)	% Abaixo da Peneira (massa)	% Abaixo da Peneira (massa)	% Abaixo da Peneira (massa)
	C1	C2	C3
50,00	41,59	39,99	33,20
40,00	6,28	6,56	7,60
30,00	7,92	8,81	10,40
20,00	12,36	13,14	16,10
10,00	31,85	31,50	32,70
S	100,00	100,00	100,00

6.1.2 Malha numérica

A malha numérica utilizada na simulação pode ser visualizada através da Figura 6.2. Como já discutido anteriormente, a determinação do tamanho da malha adequado para a simulação é fator fundamental para a obtenção de estabilidade numérica, convergência e resultados confiáveis. Para este estudo de caso, foram testados outros tamanhos de malhas, mas o que apresentou os melhores resultados é o apresentado pela figura. Pode ser verificado através da Figura 6.2 que a malha apresenta homogeneidade.

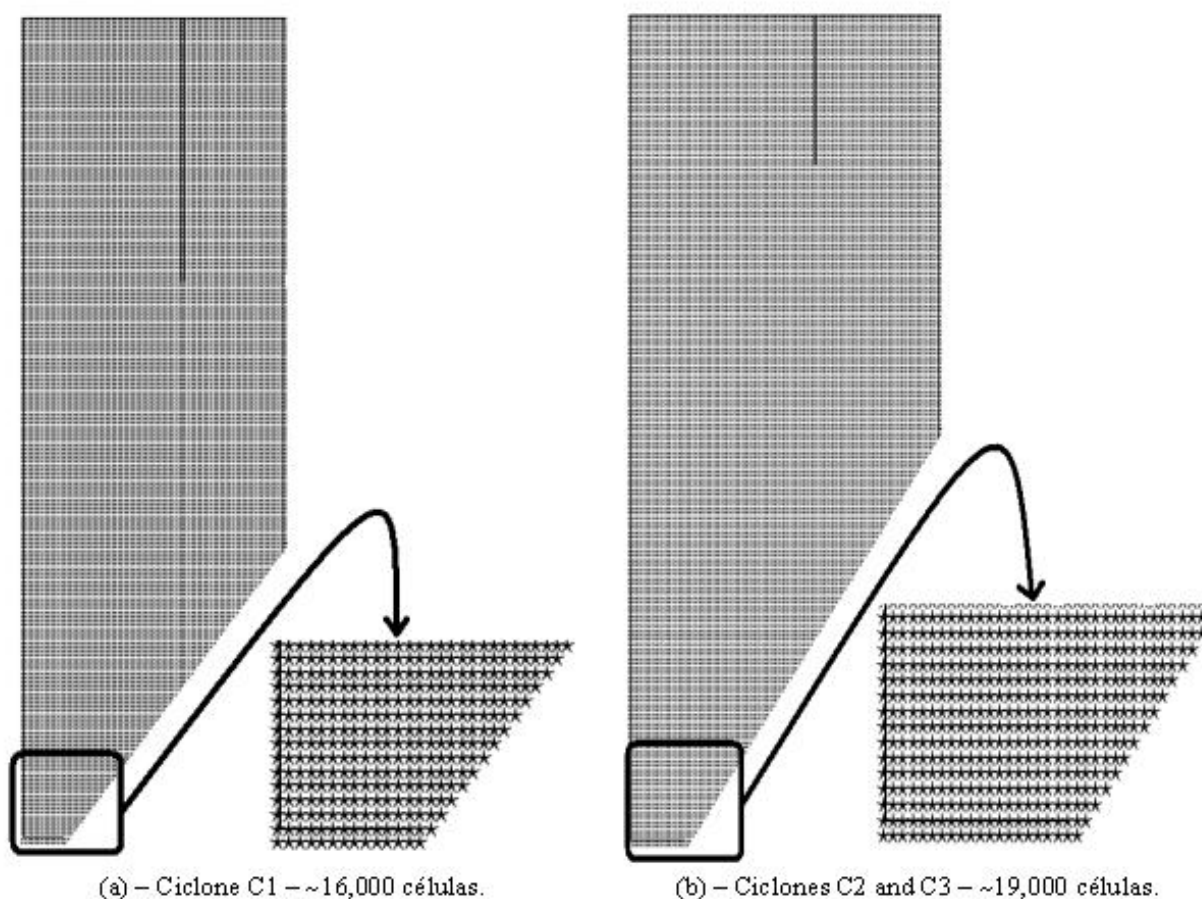


Figura 6.2 Malha numérica

6.1.3 Resultados obtidos

O objetivo principal deste estudo de caso é o de avaliar o desempenho de uma torre de ciclones de uma indústria de cimento. As variáveis de maior interesse são usualmente a perda de carga e a eficiência de coleta dos ciclones. Procuramos desenvolver uma metodologia para a detecção de problemas operacionais em torre de ciclones, comparando os valores de perda de carga obtidos no caso real (valores obtidos da indústria), com os valores preditos através de simulação numérica.

O estudo de simulação numérica foi realizado com as informações apresentadas anteriormente. Para tornar a simulação numérica mais realística, os ciclones foram simulados com partículas com tamanhos de 10, 20, 30, 40 e 50 μm , conforme apresentado na Tabela 6.4.

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam resultados da eficiência de coleta para os ciclones da corrente A e B. Como esperado, a eficiência de coleta aumenta com o tamanho da partícula e partículas com diâmetro maior que 50 μm são totalmente coletadas. Pode também ser verificado, que apesar do ciclone C1 ter velocidade na entrada menor do que os ciclones C2 e C3, sua eficiência de coleta é maior. Isto pode ser explicado desde que outros efeitos como a carga de sólidos, temperatura e geometria do ciclone, também influenciam a eficiência de coleta dos ciclones. Hoffmann *et al.* (1992), estudaram os efeitos da geometria e carga de sólidos no desempenho dos ciclones, enquanto o efeito da temperatura foi pesquisado por Patterson *et al.* (1989).

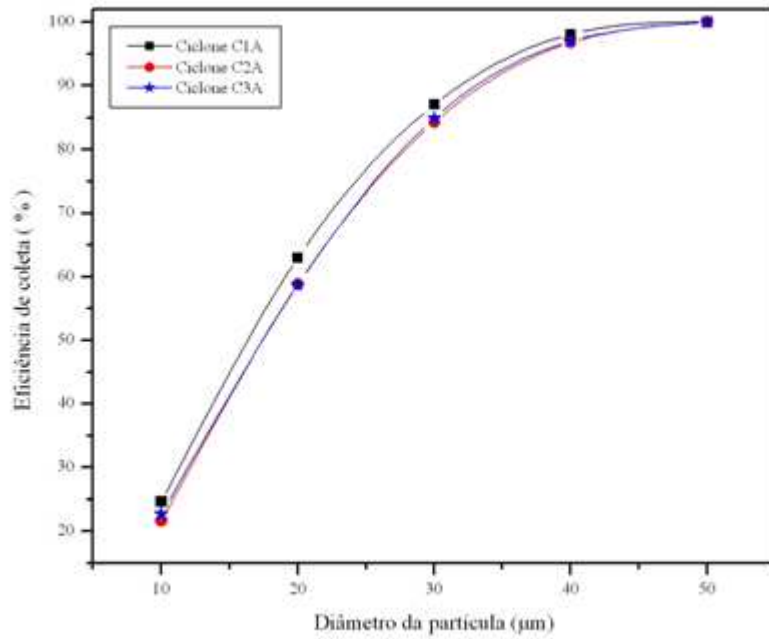


Figura 6.3 Eficiência de coleta – Corrente A

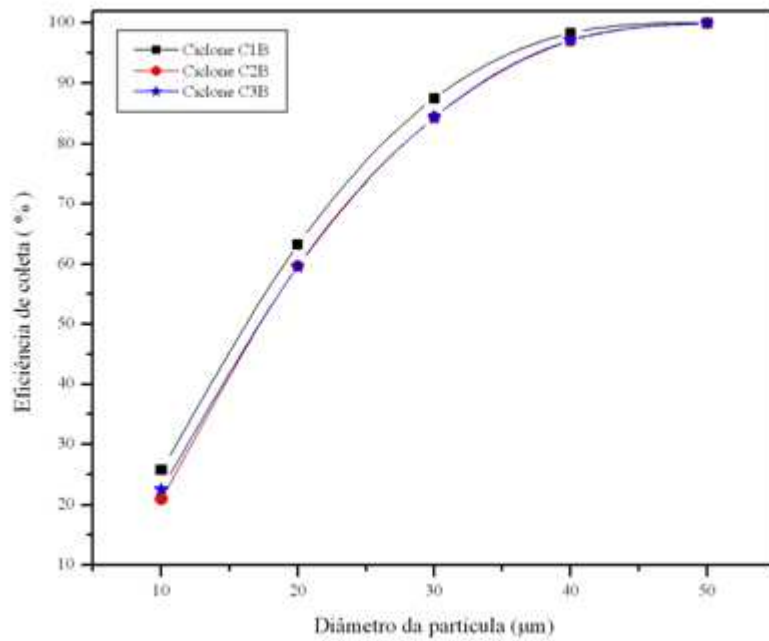


Figura 6.4 Eficiência de coleta – Corrente B

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam os resultados de perda de carga em função do diâmetro da partícula. Observa-se que a perda de carga diminui com o aumento do tamanho da partícula até aproximadamente 40 μm , permanecendo constante a partir deste valor. A redução da perda de carga para partículas de maior diâmetro ocorre como uma função da redução da velocidade tangencial (Figuras 6.7 e 6.8), responsável pela maior parte da perda de carga, devido ao maior consumo de energia para o arraste de partículas maiores e a conseqüente diminuição do campo centrífugo.

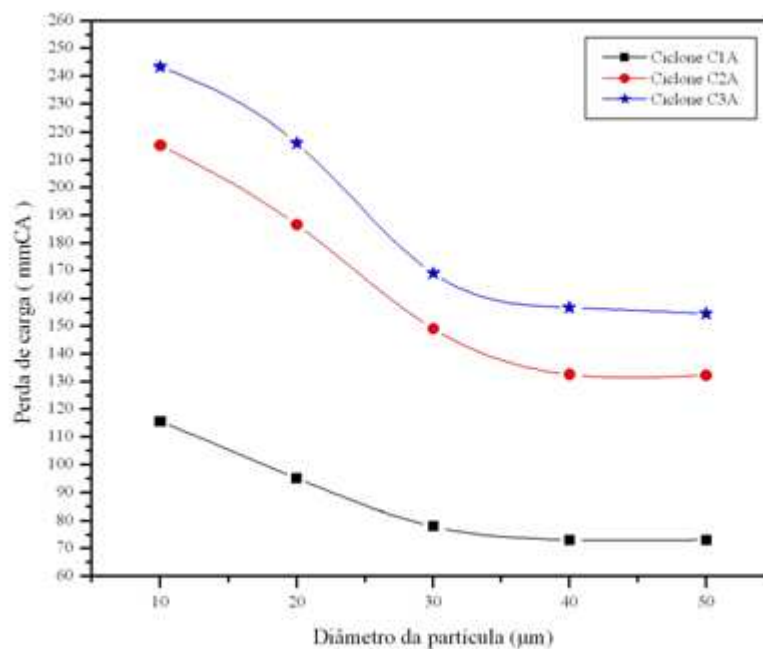


Figura 6.5 Perda de carga em função do diâmetro da partícula – Corrente A

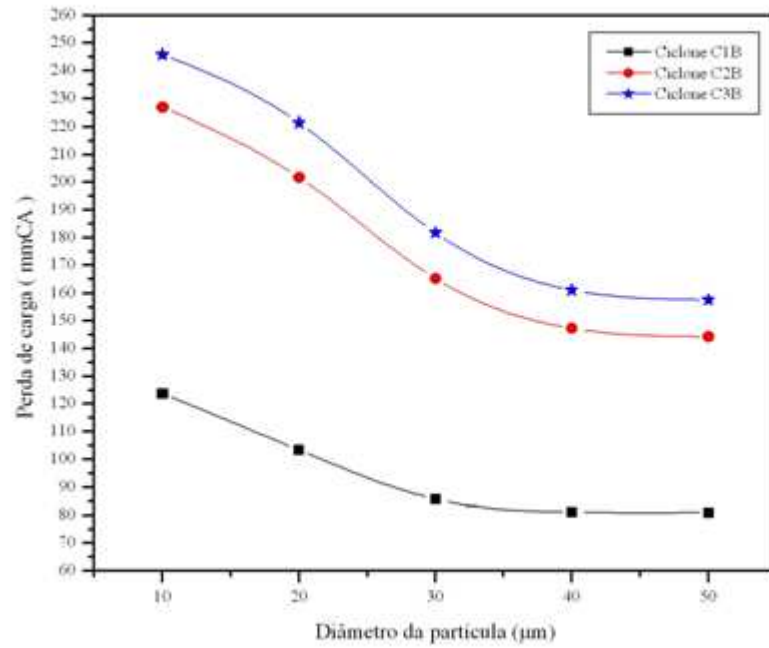


Figura 6.6 Perda de carga em função do diâmetro da partícula – Corrente B

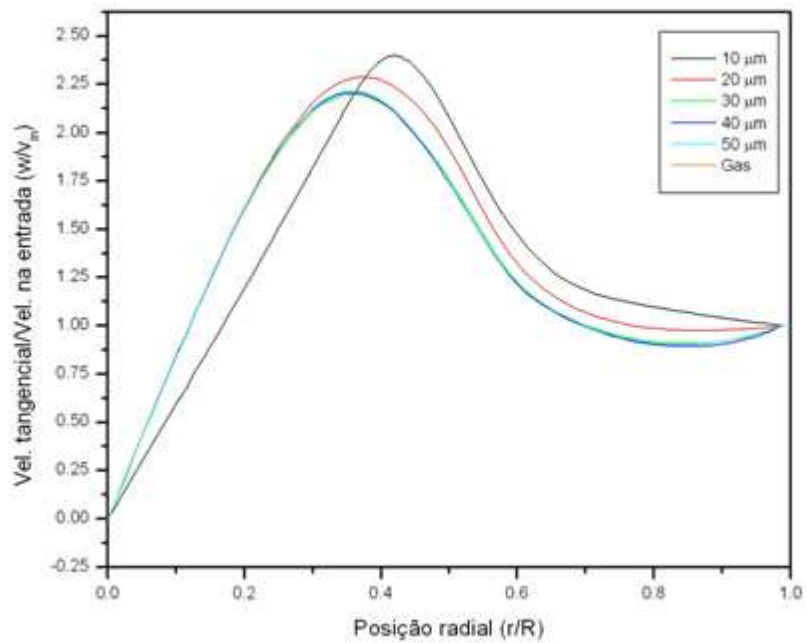


Figura 6.7 Perfil de velocidade tangencial para o ciclone C1A

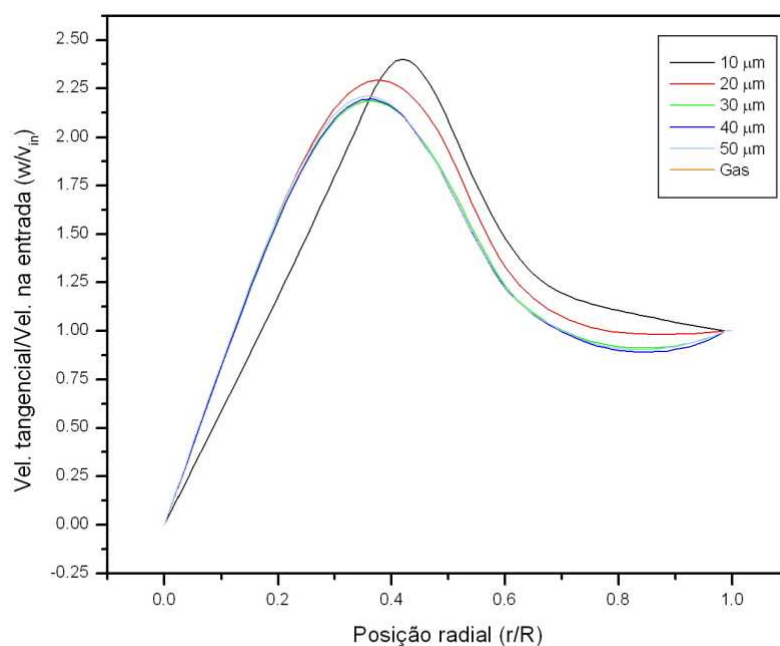


Figura 6.8 Perfil de velocidade tangencial para o ciclone C1B

O principal objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia que permita verificar as condições de operação de uma torre de ciclones e desta forma tomar decisões que possam prever futuros problemas operacionais e com isso ações corretivas necessárias. Para a avaliação da torre de ciclones comparamos os valores de perda de carga obtidos numericamente com os valores da planta industrial. A planta industrial opera de forma contínua e os valores de perda de carga são registrados on-line através de um programa de aquisição de dados. Utilizamos para comparação os valores médios obtidos durante um período de 24 horas.

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam os resultados de perda de carga obtidos pelo código CYCLO para o modelo monofásico e bifásico, e os valores medidos na indústria. A perda de carga numérica obtida pelo modelo bifásico e apresentada nas figuras é a perda de carga média obtida através das informações da perda de carga individual de cada diâmetro de partícula com sua respectiva fração mássica (Tabela 6.4). Como esperado, a predição dos resultados de perda de carga para o modelo bifásico são maiores do que para o modelo monofásico, desde que o

conceito multi-fluido adotado prevê a transferência de quantidade de movimento interfase através de um modelo constitutivo de força de arraste.

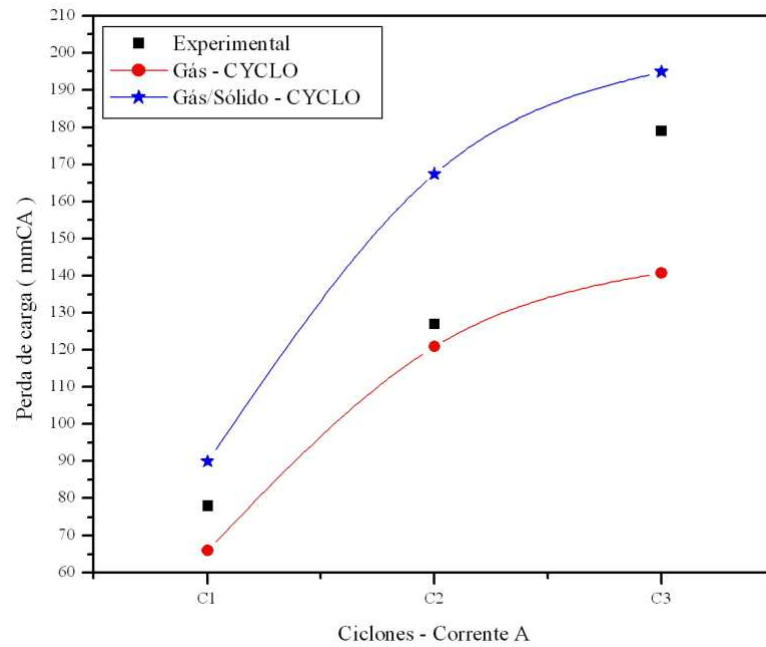


Figura 6.9 Perda de carga (média) – Corrente A

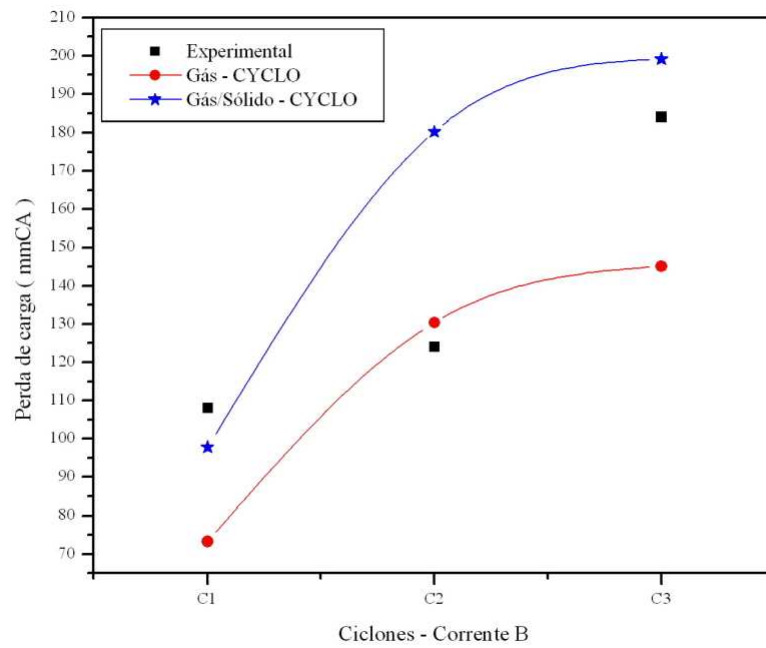


Figura 6.10 Perda de carga (média) – Corrente B

Um dos mais importantes resultados obtidos neste estudo de caso foi a observação de anormalidade operacional na torre de ciclones. Os ciclones simulados neste estudo de caso são conectados em série e trabalham em depressão. Devido a esta disposição dos ciclones (Figura 6.1), se houver defeito em alguma válvula de fundo de um dos ciclones, haverá entrada de ar falso no sistema. Esta entrada de ar falso afetará o comportamento fluidodinâmico do ciclone em questão e, dependendo da situação alterará as condições do ciclone subsequente.

Nas Figuras 6.9 e 6.10, observa-se que os resultados numéricos obtidos pelo código CYCLO, apesar de pequenas diferenças nas condições de operação das duas torres (Tabela 6.2 e 6.3), apresentam comportamento similar. Na simulação numérica, a vazão mássica dos gases através dos ciclones conectados em série é a mesma, alterando-se somente as condições de temperatura e pressão.

No entanto, quando verifica-se os resultados de perda de carga experimental das duas torres (obtidos durante a época que o sistema apresentava desvio operacional sem causa conhecida), observa-se que a torre B (Figura 6.10) apresenta comportamento diferente do resultado numérico para os ciclones C1 e C2, quando comparados com os resultados numéricos e experimentais da torre A. Considerando que a entrada de ar falso causa perturbação no comportamento fluidodinâmico absorvendo energia do campo centrífugo, e desta forma, diminuindo o perfil de velocidade tangencial que é responsável pela maior parte da perda de carga nos ciclones, sugere-se que, sendo a perda de carga experimental no Ciclone C2 da torre B menor que o valor numérico simulado, a entrada de ar falso ocorre na válvula de fundo deste ciclone. Sendo este diagnóstico correto, o ciclone C1 será afetado pois recebe todo o gás proveniente do ciclone C2 (ver Figura 6.1), e como consequência do acréscimo na vazão mássica/volumétrica deste ciclone, um aumento na perda de carga do respectivo ciclone deverá ser observada. Quando analisamos a Figura 6.10, verificamos que a perda de carga experimental no Ciclone C1 realmente é maior que o valor numérico obtido através da simulação. Através desta análise concluímos que a torre de ciclones B poderia estar provavelmente operando com entrada de ar falso no sistema

Esta observação de provável anormalidade operacional no processo da torre de ciclones da corrente B foi constatada quando da manutenção do sistema, onde foi verificado defeito (desgaste), nas válvulas de contrapeso, que são responsáveis pela vedação do sistema.

Como conclusões, além de demonstrar que o código computacional desenvolvido apresenta resultados confiáveis na predição da perda de carga em ciclones em escala industrial, pode também ser dito, que a utilização das técnicas de CFD, é uma ferramenta que pode ser utilizada como um método preventivo para a detecção de anormalidades operacionais em sistemas industriais, como por exemplo, no caso estudo apresentado para a indústria de cimento.

6.2 Avaliação do Desempenho de Ciclones

Neste estudo de caso, utiliza-se o programa CYCLO para avaliar tecnicamente duas configurações geométricas distintas de ciclones, aqui denominados de ciclone C1 e ciclone C2, destinados a separação de uma mistura de carvão e coque de uma corrente de ar em uma indústria de cimento.

A avaliação é conduzida por estudos de fluidodinâmica computacional com o código CYCLO, modelo bifásico, que além das informações macroscópicas como perda de carga e eficiência de coleta, usualmente utilizadas para caracterizar o desempenho de ciclones em projetos de engenharia, fornece também informações detalhadas sobre o comportamento fluidodinâmico do escoamento ciclônico como, por exemplo, os mapas de pressão, velocidades e frações volumétricas. Estas informações são de grande utilidade, pois permitem identificar fenômenos como existência de zonas de circulação, caminhos preferenciais, re-arraste de sólidos entre outros, que podem auxiliar a compreensão do funcionamento dos ciclones e por conseqüência fornecer subsídios para a otimização e projeto destes equipamentos.

6.2.1 Configurações geométricas e condições de operação dos ciclones

As informações geométricas necessárias para a construção da malha numérica para os dois ciclones em estudo, C1 e C2, são apresentados de forma esquemática pela Figura 6.11 e suas dimensões anotadas na Tabela 6.5. A Figura 6.11 foi desenhada em escala, o que nos permite visualizar que os ciclones propostos para a separação do combustível sólido possuem configurações geométricas distintas, apesar de terem sido projetados para executar o mesmo trabalho, isto é, separar uma mistura de carvão e coque do ar em condições pré-determinadas de vazão de ar, carga de sólidos, temperatura e pressão.

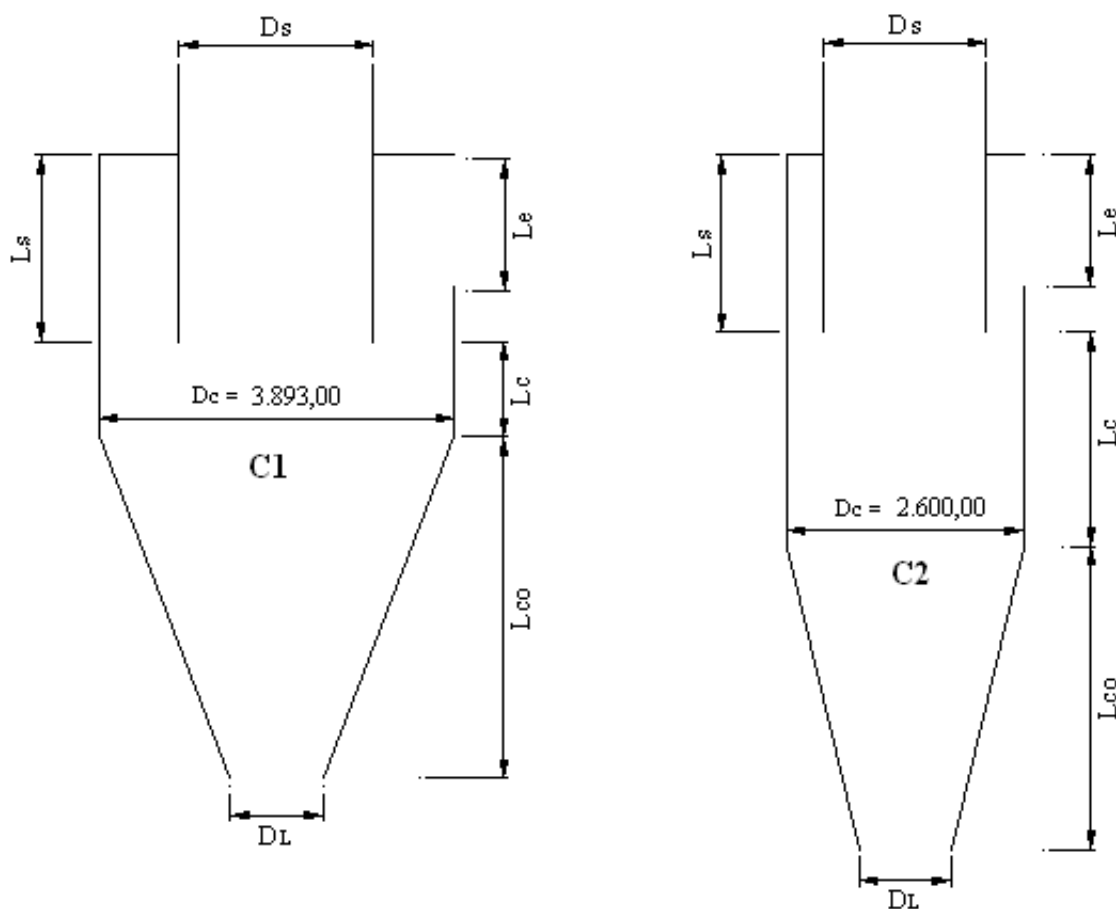


Figura 6.11 Definição das dimensões dos ciclones

As dimensões anotadas na Tabela 6.5 foram retiradas dos desenhos dos equipamentos fornecidos pela indústria de cimento.

Tabela 6.5 Dimensões dos ciclones

Dimensão (mm)	Ciclones	
	C1	C2
Altura da seção de entrada, L_e	1440,00	1440,00
Altura do “vortex-finder”, L_s	2045,00	1945,00
Altura da seção circular, L_c	1036,00	2342,00
Altura da seção cônica, L_{co}	3736,00	3319,00
Diâmetro do “vortex-finder”, D_s	2128,00	1780,00
Diâmetro do cilindro, D_c	3893,00	2600,00
Diâmetro do “underflow”, D_I	1015,00	1015,00
Largura da seção de entrada, B	770,00	770,00
Comprimento total, L	6817,00	7606,00

A Tabela 6.6 apresenta as condições básicas de operação utilizadas pelos fornecedores para o projeto dos ciclones C1 e C2, e que neste caso, é também utilizada para a simulação numérica deste estudo de caso.

Tabela 6.6 Condições de operação

Condições de Operação		Ciclones	
		C1	C2
Vazão volumétrica de Ar	m^3/h	82000,00	82000,00
Velocidade de ar na entrada	m/s	20,54	20,54
Carga de sólidos	g/Nm^3	262,00	262,00
Temperatura de operação	$^{\circ}C$	90,00	90,00
Pressão média (absoluta)	mBar	894,92	894,92

A distribuição granulométrica das partículas sólidas, utilizadas nos estudos de fluidodinâmica neste trabalho, representa uma situação de operação que resultou em um diâmetro médio das partículas de aproximadamente 20,195 μm (informações obtidas da indústria de cimento). A amostra analisada representa uma mistura típica de carvão e coque utilizada como combustível sólido na indústria de cimento.

Para melhor caracterização da fase sólida, considerou-se além do diâmetro médio das partículas, que foi calculado a partir da análise granulométrica (informações obtidas da indústria de cimento), três outros diâmetros adicionais. A Tabela 6.7 apresenta um resumo destes valores e as propriedades das fases gasosa e sólida considerada neste trabalho.

Tabela 6.7 Propriedades da fase gasosa e sólida considerada neste estudo

Fase	Propriedades	
Gasosa	Massa específica, kg/m^3	0,849
	Viscosidade, kg/m.s	$1,8 \times 10^{-5}$
Sólida	Massa específica, kg/m^3	1300,00 (carvão)
	Massa específica, kg/m^3	1660,00 (coque)
	Massa específica, kg/m^3	1480,00 (mistura)
	Diâmetro médio, μm	20,195
	Diâmetro 1, μm	11,50
	Diâmetro 2, μm	17,40
	Diâmetro 3, μm	28,30

6.2.2 Malha numérica

A malha numérica utilizada na simulação numérica dos ciclones é apresentada na Figura 6.12. Como pode ser verificada, a homogeneidade na

construção da malha foi respeitada, o que é de suma importância para a precisão dos resultados, estabilidade e convergência da simulação numérica. Outros tamanhos de malha foram testados, mas os melhores resultados foram conseguidos com a malha numérica apresentada na figura em discussão.

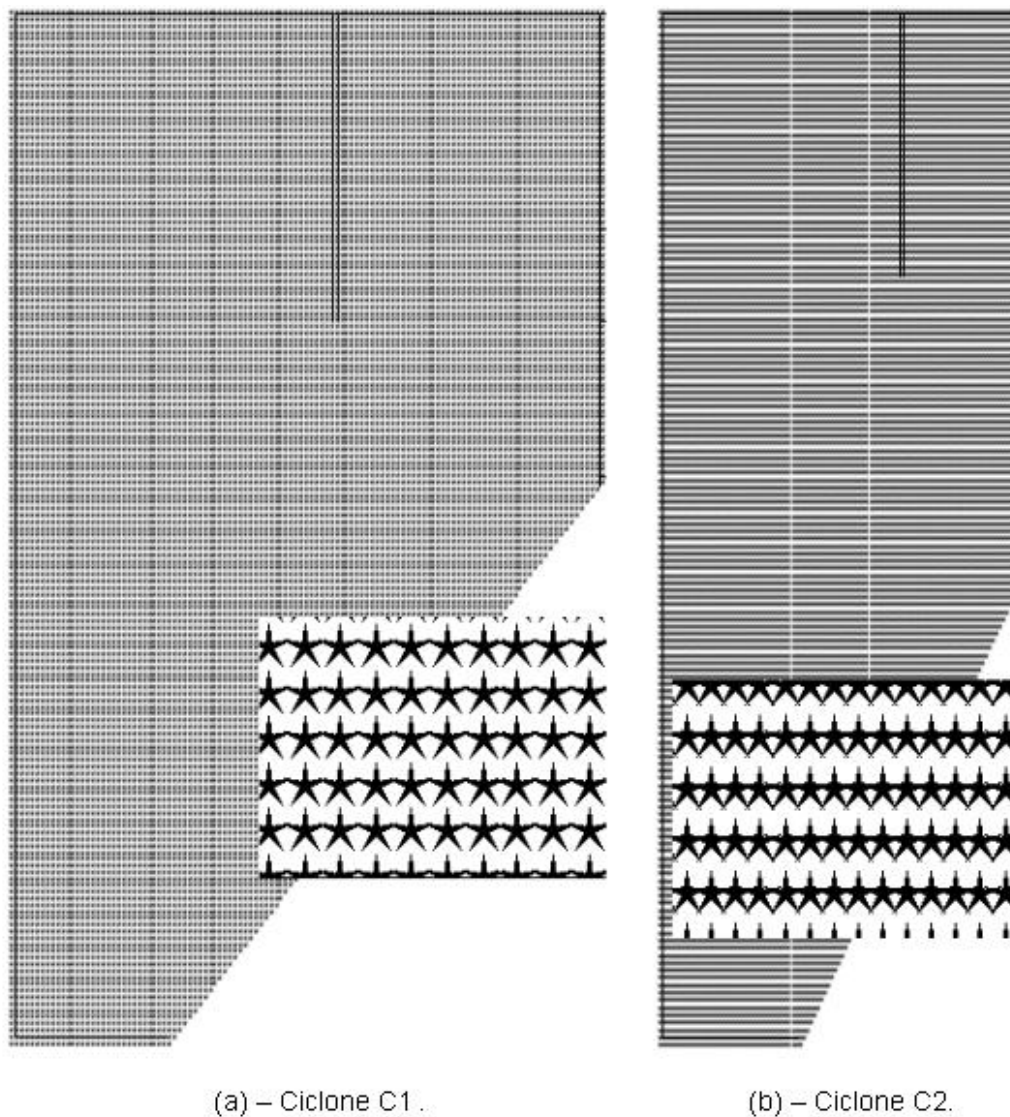


Figura 6.12 Malha numérica dos ciclones C1 e C2

6.2.3 Resultados obtidos

As variáveis, usualmente, de grande interesse no projeto de ciclones são a perda de carga e a eficiência de coleta. Nesta unidade são apresentados estes resultados e informações do escoamento fluidodinâmico no interior dos ciclones. Através da comparação e análise dos resultados numéricos obtidos para os dois ciclones, deverá ser possível recomendar qual o ciclone mais apropriado para realizar a separação gás-sólido.

A experimentação numérica foi planejada considerando três diferentes condições para a fase sólida, onde a diferença básica foi a composição do material particulado. Nos casos 1 e 2, o material sólido utilizado, respectivamente, foi o carvão e coque puros. No caso, nomeado 3, uma mistura de carvão (50% massa) e coque (50% massa) foi utilizada.

A Figura 6.13 apresenta a curva de eficiência de coleta para os ciclones C1 e C2 para o caso 1 (carvão), caso 2 (coque) e caso 3 (carvão/coque). Pode ser observado que para todas as situações e diâmetro de partículas, a eficiência de coleta do ciclone C1 é maior que para o ciclone C2.

As Figuras 6.14 e 6.15 apresentam os resultados de perda de carga para os ciclones C1 e C2. Verifica-se que o comportamento da perda de carga difere para os dois ciclones, sendo que no ciclone C1 a diminuição da perda de carga é mais acentuada para partículas menores que 20 μm e suavizada para partículas maiores. A perda de carga para o ciclone C1 é menor que do ciclone C2 para partículas com o diâmetro médio da amostra (20 μm). Observa-se também, que com exceção do menor diâmetro (11,5 μm), a perda de carga predita para o ciclone C1 foi menor que do ciclone C2.

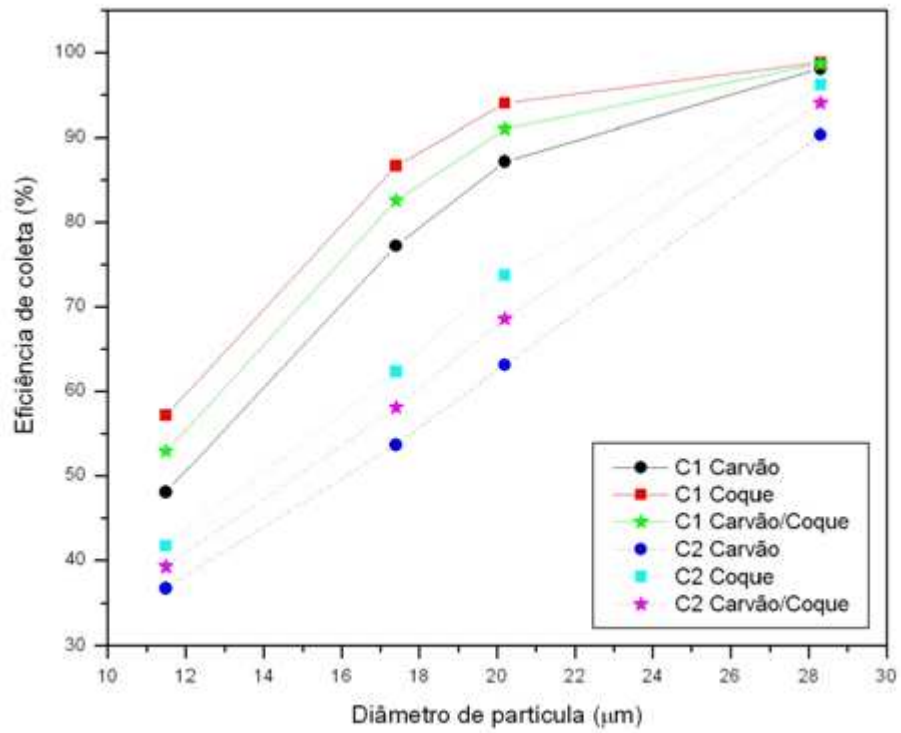


Figura 6.13 Eficiência de coleta para os ciclones C1 e C2

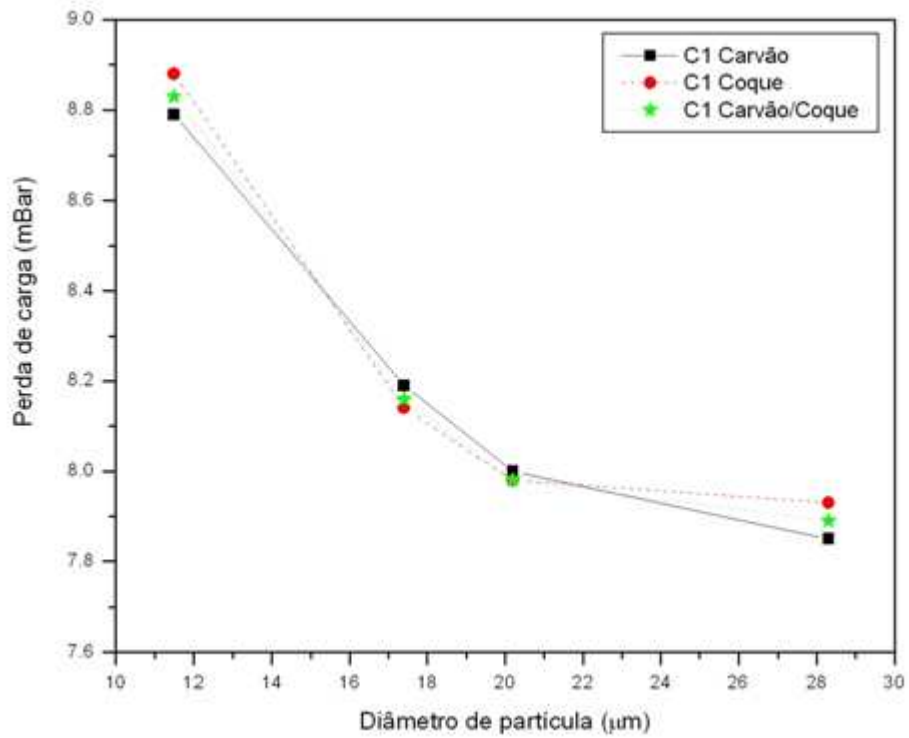


Figura 6.14 Perda de carga - Ciclone C1

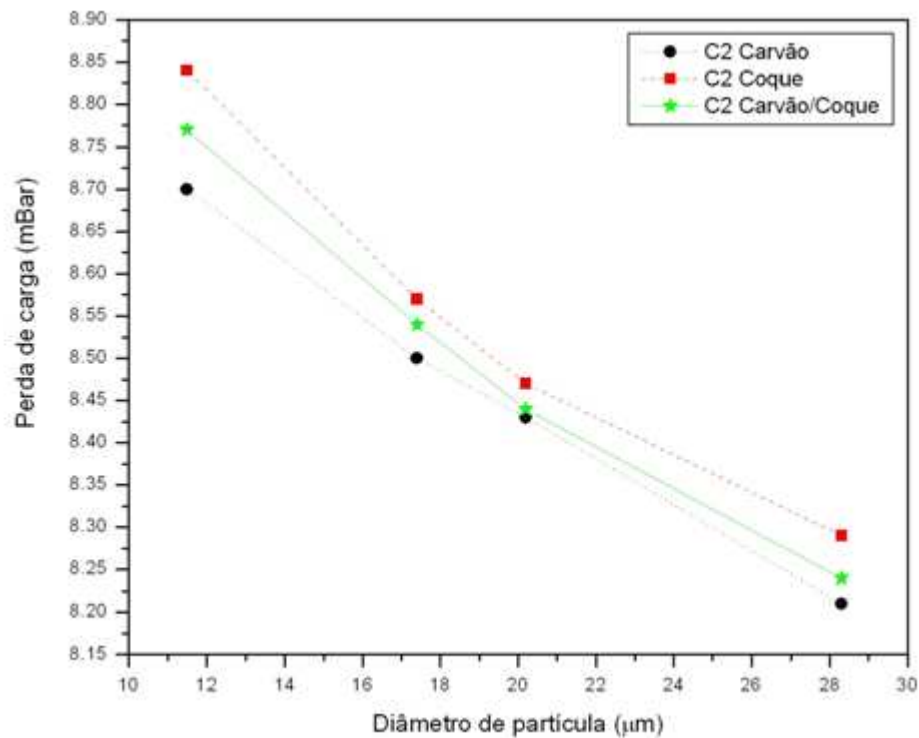


Figura 6.15 Perda de carga - Ciclone C2

Os resultados, de maneira geral, demonstram que o ciclone C1 tem melhor desempenho do que o ciclone C2, apresentando maior eficiência e menor perda de carga para as condições de processo analisadas.

A seguir, nas Figuras 6.16 a 6.19, apresentam-se mapas de velocidade tangencial e axial, fração volumétrica da fase sólida e pressão para os ciclones C1 e C2, obtidos para o caso 3 (carvão/coque) e diâmetro médio da partícula.

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.

A Figura 6.16 apresenta os mapas de velocidade tangencial para ambos os ciclones e verifica-se com clareza a existência de um escoamento giratório de alta intensidade e especificamente, para o ciclone C1, uma tendência a preservação da vorticidade. Esta tendência, por sua vez, amplia a intensidade do

campo centrífugo em direção às paredes do ciclone e com isso garante uma maior eficiência de coleta.

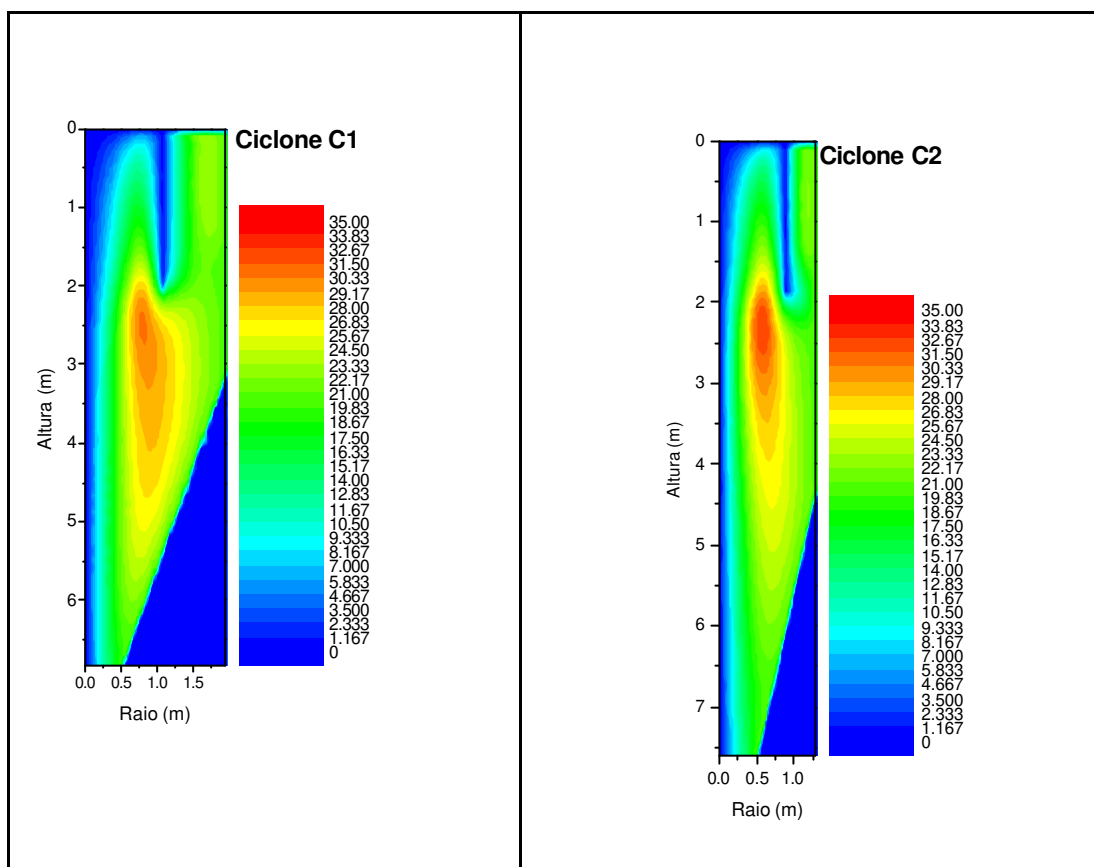


Figura 6.16 Mapas de velocidade tangencial (m/s)

A reversão do escoamento pode ser visualizada através da Figura 6.17, onde a cor amarela representa uma região de reversão do campo de velocidade axial. Nota-se que o comprimento natural, responsável pela reversão completa do escoamento, ocorre a uma menor distância no ciclone C2. Isto implica na possibilidade de redução do comprimento da seção cônica do ciclone C2 para uma melhor otimização da geometria. Já para o ciclone C1, comparativamente, a distância é menor, e não sugere redução significativa para a otimização geométrica e operacional do ciclone.

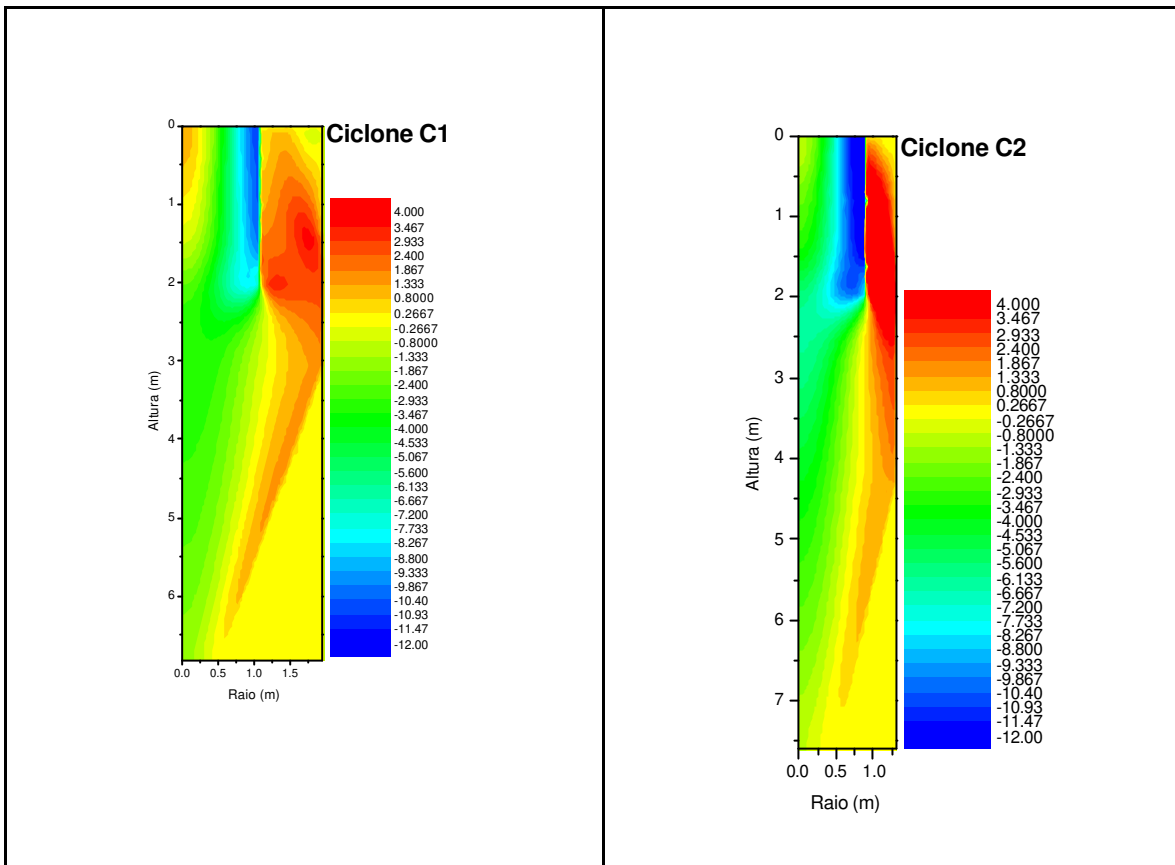


Figura 6.17 Mapas de velocidade axial (m/s)

O campo de pressão e a existência de um núcleo de baixa pressão (região em azul) podem ser visualizados na Figura 6.18. Observa-se que, para o ciclone C1, este núcleo é deslocado em direção a seção cônica, o que confere maior estabilidade ao escoamento ciclônico.

Para finalizar, a Figura 6.19 apresenta os mapas de fração volumétrica da fase sólida, que representa, basicamente, uma distribuição de sólidos ao longo do ciclone. Pela ação de um campo centrífugo de maior intensidade, o ciclone C1 apresenta uma distribuição de sólidos mais deslocados em direção à parede, o que confirma microscopicamente a informação macroscópica de eficiência de coleta apresentada anteriormente.

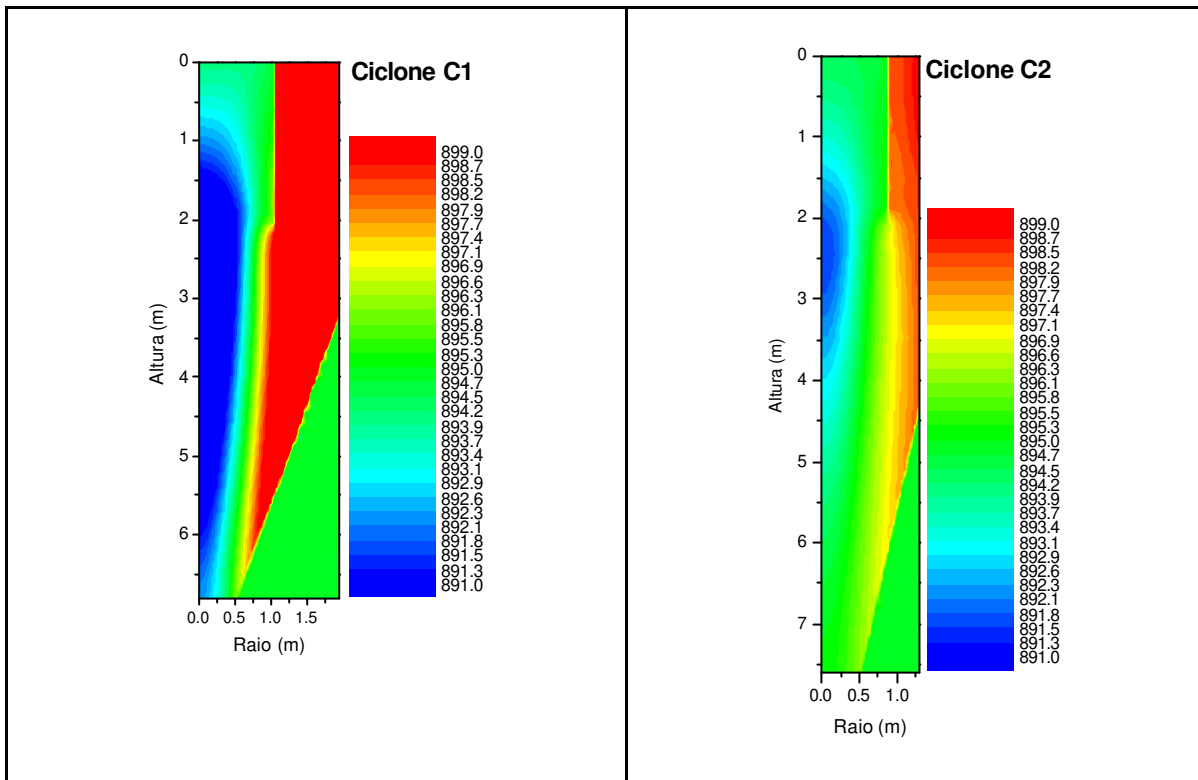


Figura 6.18 Mapas de pressão (mBar)

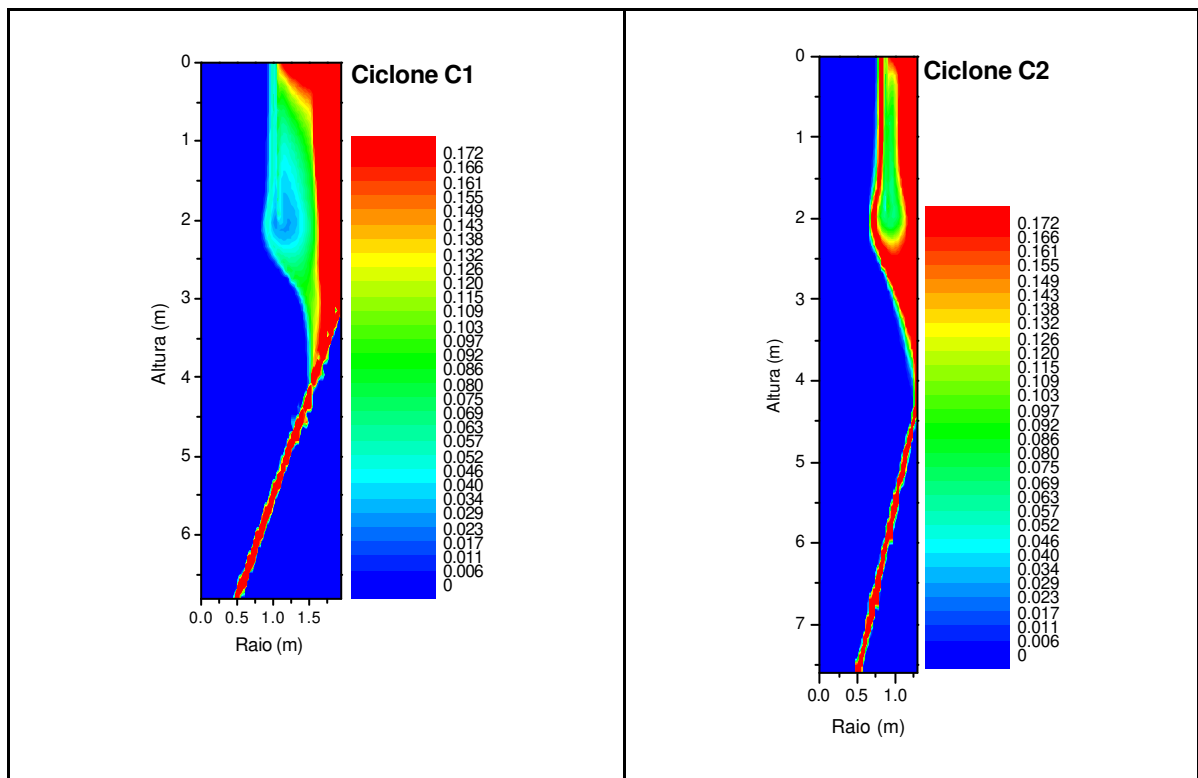


Figura 6.19 Mapas de fração volumétrica (%)

Diante dos resultados obtidos e apresentados anteriormente neste estudo de CFD, que forneceram tanto informações macroscópicas de desempenho da separação gás-sólido (eficiência de coleta e perda de carga), quanto as informações microscópicas associadas as características fenomenológicas do escoamento ciclônico, pode-se concluir que a geometria denominada ciclone C1, apresentou melhor desempenho operacional para todos os estudos de caso desenvolvidos neste trabalho. A geometria proposta para o ciclone C1 apresenta maior flexibilidade operacional frente a possíveis variações granulométricas do combustível ou no tipo de combustível (carvão, coque ou mistura carvão/coque). Na análise das informações microscópicas, o melhor desempenho do ciclone C1 foi também verificado, confirmando as informações macroscópicas apresentadas anteriormente.

Conclui-se finalmente, que a análise através da fluidodinâmica computacional (CFD), conforme apresentado neste estudo de caso, pode ajudar no entendimento do complexo comportamento multifásico que ocorre em ciclones.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Principais conclusões

As principais conclusões retiradas deste trabalho são:

Os resultados numéricos apresentados demonstram que a hipótese simplificadora de simetria na entrada do ciclone, que transforma o modelo tridimensional assimétrico em um modelo tridimensional simétrico, representa o comportamento ideal do escoamento giratório em ciclones.

O tempo de processamento necessário para a obtenção dos resultados convergidos é muito diferente quando se compara o código CYCLO (modelo 3D-simétrico), com pacotes comerciais de CFD (por ex.: CFX 3D-assimétrico). No caso avaliado neste trabalho, o esforço computacional requerido pelo código comercial para resolver o mesmo problema com a mesma acurácia foi aproximadamente 5 vezes maior.

O modelo multifásico euleriano-euleriano proposto representa qualitativamente e quantitativamente o escoamento no interior de ciclones. Os resultados de eficiência de coleta e perda de carga obtidos numericamente reproduziram razoavelmente os resultados experimentais.

O programa CYCLO consegue representar o escoamento fluidodinâmico em ciclones em escala de bancada e ciclones industriais.

As técnicas de CFD possuem capacidade de prever resultados de desempenho com precisão e rapidez, possibilitando o estudo de diferentes geometrias e condições de processo para os ciclones.

O código computacional CYCLO é um programa flexível, que viabiliza a análise do comportamento fluidodinâmico do escoamento gás-sólido no interior

dos ciclones, permitindo a análise de performance e a otimização destes equipamentos.

7.2 Sugestões para os Próximos Trabalhos

A validação numérica do programa multifásico foi realizada com experimento onde a carga de sólidos considerada foi de 5 g/m^3 . Como sugestão para trabalhos futuros, deve-se analisar o comportamento do programa frente a variações na razão de carga, comparando os resultados com experimentos realizados com carga de sólidos superior a 5 g/m^3 .

O programa CYCLO permite a utilização de até cinco fases sólidas (hexafásico). No trabalho atual foi avaliado o potencial do código para até três fases sólidas (tetrafásico). A avaliação do código para cinco fases sólidas deve ser investigada.

O modelo apresentado não possui interação sólido- sólido. A avaliação do modelo tetrafásico e hexafásico com interação sólido-sólido é necessária. No entanto, não existe disponível na literatura, modelo de interação sólido-sólido aplicados a ciclones. Sugere-se que na continuidade deste trabalho seja desenvolvida uma proposta de trabalho experimental para a avaliação da interação sólido-sólido em ciclones e obtenção de correlação apropriada para prever estes efeitos.

8.1 Artigos Completos Publicados em Periódicos

NORILER, D., VEGINI, A. A., SOARES, C., BARROS, A. C., MEIER, H. F., MORI, M. Analysis of a device for pressure drop reduction in cyclones by computational fluid dynamics. Braz. J. of Chem. Eng. v.21, p.93-101, 2004.

8.2 Trabalhos Completos em Anais de Eventos

VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. Design of Cyclones by Using CFD Techniques. In: XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2003.

VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. Eulerian-Eulerian Model for Prediction of Multiphase Flow in Cyclones. In: XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004.

NORILER, D., VEGINI, A. A., MEIER, H. F., MORI, M. Verificação e validação em CFD do escoamento giratório em cyclones a gás. In: XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004.

VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. Four Phase Eulerian-Eulerian Model for Prediction of Multiphase Flow in Cyclones. In: XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005.

VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. A New Eulerian-Eulerian Model for Prediction of Multiphase Flow in Cyclones. In: 10 Mediterranean Congress of Chemical Engineering, 2005.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTMAYER, S., MATHIEU, V., JULLEMIER, S., CONTAL, P., MIDOUX, N., RODE, S., LECLERC, J. Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software. Chem. Eng. Proc., p.511-522, 2003.
- AVCI, A., KARAGOZ, I. A mathematical model for the determination of a cyclone performance. Int. Comm. Heat Mass Transfer, v.27, p.263-272, 2000.
- Barth, W. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations. Brenn. Wärme Kraft, v.8, p.1-9, 1956.
- BERNARDO, S. Estudo dos Escoamentos Gasoso e Gás-Sólido em Ciclones pela Aplicação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2005.
- BOHNET, M., GOTTSCHALK, O., MORWEISER, M. Modern design of aerocyclones. Adv. Powder Technol., v.2, p.137-161, 1997.
- BOYSAN, F.; AYERS, W. H., SWITENBANK, J. A Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design. Trans. IChemE, v.60, p.222-230, 1982.
- 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.
- DAVIDSON, M. R. Numerical Calculations of Flow in a Hydrocyclone Operating without an Air Core. Appl. Math. Modelling, v.12, p.119-128, 1988.
- DIETZ, P. W. Collection efficiency of cyclone separator. AIChE Journal, v.27, p.888-892, 1981.

- DUGGINS, R. K., FRITH, P. C. W. Turbulence Anisotropy in Cyclones. *Filtration & Separation*, p.394-397, 1987.
- DYAKOWSKI, T., WILLIAMS, R. A. Modelling Turbulent Flow within a Small-Diameter Hydrocyclone, *Chem. Eng. Sci.*, v.48, n.6, p.1143-1152, 1993.
- ELKAIM, D., MCKENTY, F., REGGIO, M., CAMARERO, R. Control Volume Finite Element Solutions of Confined Turbulent Swirling Flows. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, v.19, p.135-152, 1994.
- FRARE, L. M., GIMENES, M. L., PEREIRA, N. C., MENDES, E. S. Linearização do modelo log-normal para distribuição de tamanho de partículas. *Acta Scientiarum*, v.22, n.5, p.1235-1239, 2000.
- GIDASPOW, D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. San Diego: Ed. Academic Press, 1994.
- 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.
- HOEKSTRA, A. J., DERKSEN, J. J., van Den AKKER, H. E. A. An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones. *Chem. Eng. Sci.*, v.54, p.2055-2065, 1999.
- HOFFMANN, A. C., VAN SANTEN, A., ALLEN, R. W. K. Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones, *Powder Technol.*, v.70, p.83-91, 1992.
- LAUNDER, B. E., SPALDING, D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Comp. Meth. Applied Mech. Eng.*, v.3, p.269-289, 1974.
- LAPPLE, C. E. Gravity and Centrifugal Separation. *Ind. Hygiene Quarterly*, v.11, p.40-48, 1950.
- LEITH, D., LICHT, W. The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors: A New Theoretical Approach. *AIChE Symp.*, v.68, n.126, p.196-206, 1972.

- LIXING, Z. Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion. Beijing: Science Press, 1993.
- LORENZ, T. Heissgasentstaubung mit Zyklonen. VDI-Fortschrittsberichte, Düsseldorf, v.3, n.366, p.1-113, 1994.
- 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, p. 211-227, december 1994.
- MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas. Rio de Janeiro: Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1995.
- Maliska, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Rio de Janeiro: Ed. LTC, segunda edição, 2004.
- 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, p.223-232, 1992.
- Massarani, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.
- Meier, H. F. Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1998.
- MEIER, H. F., MORI, M. Gas-Solid Flow in Cyclones: The Eulerian-Eulerian Approach. Computer & Chemical Engineering, v.22, p.S641-S644, 1998.
- MEIER, H. F., MORI, M. Anisotropic Behavior of the Reynolds Stress in Gas and Gas-Solid Flows in Cyclones. J. Powder Technol., v.101, p.108-119, 1999.

- MEIER, H. F., ROPELATO, K., FORSTER, H., IESS, J. J., MORI, M. Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Berechnung und Auslegung von Zyklonen - Teil 1. ZKG Intern. Germ., v.55, p.64-75, 2002a.
- MEIER, H. F., ROPELATO, K., FORSTER, H., IESS, J. J., MORI, M. Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Berechnung und Auslegung von Zyklonen - Teil 2. ZKG Intern. Germ.,v. 55, p.58-64, 2002b.
- MOTHES, H., LÖFFLER, F. Prediction of particle removal in cyclone separators. Int. Chem. Eng., v.28, n.2. p.51-55, 1988.
- NORILER, D., VEGINI, A. A., SOARES, C., BARROS, A. C., MEIER, H. F., MORI, M. Analysis of a device for pressure drop reduction in cyclones by computational fluid dynamics. Braz. J. of Chem. Eng. v.21, p.93-101, 2004.
- NORILER, D., VEGINI, A. A., MEIER, H. F., MORI, M. Verificação e validação em CFD do escoamento giratório em ciclones a gás. In: XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004.
- 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.
- OGAWA, A. Mechanical Separation Process and Flow Patterns of Cyclone Dust Collectors. Appl. Mech. Ver., v.50, n.3, p.97-130, 1997.
- OTHMER, K. Encyclopedia Chemical Technology. New York: A Wiley Interscience Publication, 3rd edition, v.1, p.667-672, 1978.
- PATANKAR, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Ed. Hemisphere Pub. Co., 1980.
- PATANKAR, S. V., SPALDING, D. B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. Int. J. Heat Mass Transfer, v.15, p.1787-1806, 1972.
- PATTERSON, P. A., MUNZ, R. J. Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures. Canad. J. Chem. Eng., v.67, p.321-328, 1989.

- PATTERSON, P. A., MUNZ, R. J. Gas and Particle Flow Patterns in Cyclones at Room and Elevated Temperatures. *Canad. J. Chem. Eng.*, v. 74, p. 213-221, 1996.
- PERES, A. P. Técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) aplicadas a escoamentos em ciclones. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2002.
- PERICLEOUS, K. A. Mathematical Simulation of Hydrocyclones. *Appl. Math. Modelling*, v.11, p.242-255, 1987.
- PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Singapore: Ed. McGraw Hill Book Co., 7th edition, 1997.
- RODI, W. Examples of Turbulence Models for Incompressible Flows. *AIAA Journal*, v.20, p.872-879, 1976.
- ROTTA, J. C. Statistical Theory of Inhomogeneous Turbulence. *Z. Phys.*, v.129, p.547-559, 1951.
- SHEPHERD, C. B., LAPPLE, C. E. Flow Pattern and Pressure Drop. *Ind. Eng. Chem.*, v.31, n.8, p. 972-984, 1939.
- SILVA, M. A., NEBRA, S. Numerical Calculations of Gas-Solid Flow in a Cyclone, Comunicação pessoal, UNICAMP, 1994.
- SPEZIALE, C. G. Analytical Methods for Development of Reynolds-Stress Closures in Turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v.23, p.107-157, 1991.
- STAIRMAND, C. J. Design and performance of cyclone separators. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, v.29, p. 356-383, 1951.
- STORCH, O., ALBRECHT J., HEJMA, J., KURFUST, J., POJAR, K., URBAN, J. Industrial Separators for Gas Cleaning. *Chem. Eng. Monographs*, v.6, p.92-130, 1979.
- VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. Design of Cyclones by Using CFD Techniques. In: XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2003.

- VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. Eulerian-Eulerian Model for Prediction of Multiphase Flow in Cyclones. In: XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2004.
- VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. Four Phase Eulerian-Eulerian Model for Prediction of Multiphase Flow in Cyclones. In: XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005.
- VEGINI, A. A., MEIER H. F., MORI, M. A New Eulerian-Eulerian Model for Prediction of Multiphase Flow in Cyclones. In: 10 Mediterranean Congress of Chemical Engineering, 2005.
- WALTON, W. H. Cyclone Dust Separators. Germany: Pergamon Press, 1974.
- ZHAO, B., SHEN, H., KANG, Y. Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance. Powder Technol., v.145, p.47-50, 2004.
- ZHOU, L. X., SOO, S. L. Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator. Powder Technol., v.63, p.45-53, 1990.
- ZHOU, L. X., SOO, S. L. On Boundary Conditions of Particle Phase and Collection Efficiency in Cyclones. Powder Technol., v.64, p.213-220, 1991.
- ZHOU, L. X. Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion. Beijing: Ed. Science Press, 1993.