

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**SIMULAÇÃO DA PERDA DE CARGA E DA EFICIÊNCIA DE COLETA EM  
CICLONES ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**

**MARIBEL VALVERDE RAMIREZ**

**Orientador: Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves**

**SÃO CARLOS – SP**

**2009**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**SIMULAÇÃO DA PERDA DE CARGA E DA EFICIÊNCIA DE COLETA EM  
CICLONES ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**

**MARIBEL VALVERDE RAMIREZ**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Química, área  
de Controle Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves

SÃO CARLOS – SP

2009

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

V215sp

Valverde Ramirez, Maribel.

Simulação da perda de carga e da eficiência de coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD) / Maribel Valverde Ramirez. -- São Carlos : UFSCar, 2009. 159 f.

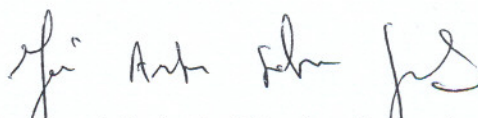
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Engenharia química. 2. Ciclone. 3. Simulação. 4. Dinâmica dos fluídos. 5. Limpeza de gases. I. Título.

CDD: 660 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **MARIBEL VALVERDE RAMIREZ** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 05 DE AGOSTO DE 2009.

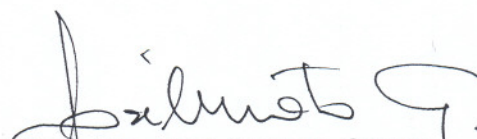
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Antonio Silveira Gonçalves  
**Orientador, PPG-EQ/UFSCar**



Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa  
**EESC/USP**



Prof. Dr. José Renato Coury  
**PPG-EQ/UFSCar**

À minha família, especialmente à minha mãe  
ao meu pai e meus irmãos e avô (in  
memória) pelo carinho e compreensão.

## **AGRADECIMIENTOS**

Ao meu orientador Professor José Antonio Silveira Gonçalves e seu apoio na minha pesquisa de mestrado.

Aos grandes amigos Nilza, Andressa, Amanda, Lana, Abigail, Onias e Nestor do departamento de Engenharia Química pela contribuição para o desenvolvimento deste trabalho, dada principalmente pelos inúmeros momentos de descontração e alegria.

Aos compatriotas peruanos Maritza, Victor, Elmer e José por seu apoio e companheirismo.

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

Ao apoio Financeiro da agencia CNPq através da bolsa de mestrado.

E claro, àquela Força Superior que nos guia e orienta na superação dos obstáculos sempre tão freqüentes em nossa vida.

## Sumário

<b>RESUMO.....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRAC.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b>	
2.1. Funcionamento do Ciclone .....	5
2.1.1 Forças Interfaciais .....	5
2.1. 2. Campos de Velocidade .....	7
2.1. 3. Turbulência .....	10
2.1.4 Eficiência de Separação .....	12
2.1.5 Queda de pressão.....	13
2.2. Visão da modelagem .....	15
2.2.1 Aplicação da técnica de CFD em Ciclones .....	15
2.2.2 Aplicativo computacional .....	21
2.2.3 Código CFD .....	22
2.3 Modelos Matemáticos .....	24
2.3.1 Modelos Euleriano .....	25
2.3.2 Modelos Lagrangeano.....	26
2.3.3 Comparativo Lagrangeano-Euleriano .....	28
2.4. Equações governantes .....	29
2.4.1 Equações de Navier-Stokes .....	29
2.4.2 Equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes .....	30
2.4.3. Modelos de turbulência .....	31
2.4.4 Modelo de turbulência: RNG $k - \varepsilon$ .....	33
2.4.5 Tratamentos junto à parede .....	35

2. 5 Malhas .....	38
2.5.1 Malhas estruturadas .....	39
2.5.2 Malhas não estruturadas .....	40
2.5.3 Malhas híbridas .....	41
2.6 Métodos Numéricos .....	42
2.6.1 Método dos volumes finitos .....	44
2.6.2 Esquema de interpolação .....	46
2.6.3 Algoritmos de resolução de sistemas lineares .....	49
2.6.4 Código FLUENT .....	50
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA</b> .....	<b>56</b>
3.1. Pré-processamento.....	57
3.1.1 Criação da geometria .....	57
3.1.2 Criação da malha .....	66
3.1.3 Definição das fronteiras .....	68
3.2 Processamento .....	69
3.2.1 Simulação da fase contínua: ar .....	69
3.2.2 Simulação da fase dispersa: rocha fosfática .....	71
3.3. Pós-processamento .....	73
3.3.1. Pós-processamento na fase contínua .....	73
3.3.2. Pós-processamento na fase dispersa .....	80
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISE</b> .....	<b>82</b>
4.1 Análises das malhas .....	83
4.2 Dependências da queda de pressão com a malha .....	91
4.3 Análises do escoamento.....	102
4.3.1 Fase contínua .....	102
4.3.2 Fase dispersa .....	114
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES</b> .....	<b>118</b>
<b>CAPÍTULO 6 – BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>120</b>



<b>APÊNDICE A</b> – Gráficos da evolução dos resíduos .....	127
<b>APÊNDICE B</b> – Perfil da malha antes e depois de fazer uso da função .....	137
<b>ADAPTAPÊNDICE C</b> - Gráficos da queda de pressão, velocidade axial, velocidade radial e velocidade tangencial em cada um dos níveis do ciclone mostrados .....	147
<b>APÊNDICE D</b> - Algoritmo gerado na linguagem c++ para ser compilado na função UDF .....	157

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi simular o escoamento das fases continua e particulada em separadores gás-sólido tipo ciclone através da Fluidodinâmica Computacional (CFD). Foram examinados nove ciclones com diferentes geometrias. Todos tinham o mesmo diâmetro principal (0,245 m) e a mesma altura (0,875 m), mas o comprimento da seção cônica variou de 0,235 m até 0,725 m e a altura do vortex finder variou de 0,122 m até 0,612 m. O software comercial utilizado nas simulações foi o Fluent 6.3.26.

Os resultados da simulação são avaliados com base nos dados experimentais obtidos por Scarpa (2000). Dados da queda de pressão e eficiência de coleta do material particulado estão disponíveis para os nove ciclones estudados.

Foram elaboradas malhas do tipo híbrido. A função *adapt* do Fluent foi utilizada para afinar as malhas tanto nas proximidades das paredes quanto no interior do ciclone.

O escoamento gás-partícula no interior do ciclone foi modelado considerando escoamento bifásico euleriano – lagrangeano turbulento tridimensional.

A solução numérica foi obtida utilizando-se o algoritmo SIMPLEC. O modelo de turbulência usado foi o  $k - \varepsilon$ . A interação entre partícula parede foi modelada de duas formas: utilizando a condição padrão do Fluent e a outra foi mediante condições baseadas na comparação de energias envolvidas na interação. Esta última condição foi implantada através de uma função UDF (*user defined function*) definida pelo usuário no Fluent.

Os resultados obtidos demonstram que o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  mais a função *adapt* e a função UDF no Fluent podem ajudar a aproximar os dados numéricos aos experimentais.

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue simular la descarga de un flujo compuesto por fases gaseosa y sólida dentro de un equipo denominado ciclón mediante la técnica numérica denominada Fluido dinámica computacional (CFD). Fueron examinados nueve ciclones con diferentes geometrías. Todos tenían el mismo diámetro principal (0,245 m) y a misma altura (0,875 m), pero la altura de la sección cónica vario de 0,235 m hasta 0,725 m así como también vario la altura del *vortex finder* de 0,122 m hasta 0,612 m. El paquete comercial utilizado en las simulaciones fue el Fluent 6.3.26.

Los resultados de la simulación son analizados teniendo como referencia los datos experimentales obtenidos por Scarpa (2000) donde está disponible datos de la caída de presión y la eficiencia de colecta para los nueve ciclones estudiados.

Fueron elaborados mallas de tipo híbrido. La función *adapt* del Fluent fue utilizado con la finalidad de refinar las mallas tanto en las proximidades de la pared así como en el interior del ciclón.

El flujo gas – partícula en el interior del ciclón fue modelado considerando como un flujo bifásico Euleriano – Lagrangeano, turbulento, tridimensional.

La solución numérica fue obtenida utilizando el algoritmo SIMPLEC. El modelo de turbulencia usado fue  $k - \varepsilon$ . La interacción entre las partículas fue modelada de dos maneras: utilizando la condición patron de Fluent y la otra fue mediante condiciones basadas en la comparación de las energías involucradas en la interacción. Esta última condición fue implantada mediante el uso de una función definida por el usuario UDF (*user defined function*).

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo de turbulencia  $k - \varepsilon$ , mas el uso de las funciones *adapt* y UDF en el paquete comercial Fluent pueden ayudar a aproximar los datos numéricos a los datos experimentales.

## ABSTRACT

The purpose of this work was to simulate, through Computational Fluid Dynamics (CFD), the flow of the continuous and particulate phases in cyclonic gas-solid separators. Nine cyclones of different geometries were studied. All had the same body diameter (0.245 m) and the same total height (0.875 m), but the length of the conical section and the height of the vortex finder varied from 0.235 m to 0.725 m and from 0.122 m to 0.612 m respectively. The commercial CFD software Fluent 6.3.26 was used in the simulations.

The simulated results were evaluated by comparison to the experimental results of Scarpa (2000). Both pressure drop and particulate collection efficiency data for all nine cyclones were available.

A hybrid mesh was used. Fluent's mesh adaption method was used to refine the mesh both near the walls and in the core of the cyclone.

A 3D Eulerian-Lagrangean approach was used to model the gas laden flow in the cyclone. The SIMPLEC algorithm was used to couple velocity and pressure. The turbulence was accounted for by a RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  model.

Particle-wall interaction was modeled by two different approaches: a) By using the standard boundary conditions (reflect, trap, escape) of the Fluent CFD package; and b) By using the critical velocity boundary condition, which was implemented in Fluent by a *User Defined Function* (UDF) written in C++.

The results suggest that the combined use of the RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  turbulence model, automatic mesh adaption and the critical velocity boundary condition was able to provide a reasonable (within 20% in average) prediction of the cyclone performance.

## FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Esquema de um separador tipo ciclone .....	2
<b>Figura 2.1</b> - Perfil de velocidade no ciclone .....	8
<b>Figura 2.2</b> - Curva típica de a eficiência fracionar .....	12
<b>Figura 2.3</b> - Estrutura operacional dos pacotes computacionais CFD .....	22
<b>Figura 2.4</b> - Classificação de modelos para escoamentos multifásicos .....	25
<b>Figura 2.5</b> - Região próxima a superfície sólida .....	36
<b>Figura 2.6</b> - Malha estruturada .....	40
<b>Figura 2.7</b> - Malha não-estruturada .....	41
<b>Figura 2.8</b> - Malha hibrida .....	42
<b>Figura 2.9</b> - Estrutura de uma malha bidimensional de volumes finitos .....	45
<b>Figura 2.10</b> - Resumo dos métodos de solução do método <i>pressure-baset</i> .....	52
<b>Figura 3.1</b> - Representação esquemática da metodologia empregada na simulação do ciclone .....	56
<b>Figura 3.2</b> - Esquema de um ciclone .....	58
<b>Figura 3.3</b> - Ciclones 1, 2 e 3 (Grupo 1), caracterizados por $Z/h \gg 1$ .....	59
<b>Figura 3.4</b> - Ciclones 4, 5 e 6 (Grupo 2), caracterizados por $Z/h \approx 1$ .....	59
<b>Figura 3.5</b> - Ciclones 7, 8 e 9 (Grupo 3), caracterizados por $Z/h \ll 1$ .....	60
<b>Figura 3.6</b> - Seqüência de elaboração da geometria (a) criação das superfícies separadas (b) união do cone com o cilindro (c) união de todas as superfícies criadas .....	62
<b>Figura 3.7</b> - Ciclone dividido em blocos .....	63
<b>Figura 3.8</b> - Parte superior cilíndrica do ciclone dividido em subdomínios .....	64
<b>Figura 3.9</b> - Parte inferior cônica do ciclone dividido em subdomínios .....	65
<b>Figura 3.10</b> - Parte inferior cilíndrica do ciclone dividido em volumes de controle ...	66
<b>Figura 3.11</b> - Malha gerada no ciclone 1 .....	67
<b>Figura 3.12</b> - Condições de contorno no ciclone .....	69
<b>Figura 3.13</b> - Malha inicial gerada no Gambit (ciclone1) .....	76
<b>Figura 3.14</b> - Primeiro nível de refinamento: <i>boundary adaption</i> (ciclone 1) .....	77
<b>Figura 3.15</b> - Segundo nível de refinamento: <i>gradient adaption</i> (ciclone 1) .....	78
<b>Figura 3.16</b> - Terceiro nível de refinamento: <i>y-plus/y-star adaption</i> $y^+ = 5$ (ciclone 1) .....	79

<b>Figura 3.17</b> - Condições de contorno designadas por definição no FLUENT .....	80
<b>Figura 4.1</b> - Evolução dos resíduos (ciclone 1).....	83
<b>Figura 4.2</b> - Localização do máximo ângulo de distorção .....	90
<b>Figura 4.3</b> - Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 1 ....	93
<b>Figura 4.4</b> - Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 2 ....	94
<b>Figura 4.5</b> - Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 3 ....	95
<b>Figura 4.6</b> - Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 4 ....	96
<b>Figura 4.7</b> - Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 5 ....	97
<b>Figura 4.8</b> - Queda de pressão em função a quantidade de malhas no ciclone 6 ....	98
<b>Figura 4.9</b> - Queda de pressão em função a quantidade de malhas no ciclone 7 ....	99
<b>Figura 4.10</b> - Queda de pressão em função a quantidade de malhas no ciclone 8	100
<b>Figura 4.11</b> - Queda de pressão em função a quantidade de malhas no ciclone 9	<b>101</b>
<b>Figura 4.12</b> - Perfil da queda de pressão quando $x=0$ no plano YZ para os ciclones 1, 2 e 3.....	105
<b>Figura 4.13</b> - Perfil da velocidade axial quando $x=0$ no plano YZ para os ciclones 4, 5 e 6.....	106
<b>Figura 4.14</b> - Perfil da velocidade radial quando $x=0$ no plano YZ para os ciclones 7, 8 e 9.....	106
<b>Figura 4.15</b> - Simulação numérica dos campos de velocidade (Fonte: Adaptado de Jiwu and Weijian 2008).....	107
<b>Figura 4.16</b> - Perfil da velocidade axial simulado quando $x=0$ no plano YZ para os ciclones 1, 2 e 3.....	109
<b>Figura 4.17</b> - Perfil da velocidade axial simulado quando $x=0$ no plano YZ para os ciclones 4, 5 e 6.....	110
<b>Figura 4.18</b> - Perfil da velocidade axial simulado quando $x=0$ no plano YZ para os ciclones 7, 8 e 9.....	110
<b>Figura 4.19</b> - Perfil da velocidade tangencial simulado quando $x=0$ no plano YZ nos ciclones 1, 2 e 3.....	112
<b>Figura 4.20</b> - Perfil da velocidade tangencial simulado quando $x=0$ no plano YZ nos ciclones 4, 5, e 6.....	113
<b>Figura 4.21</b> - Perfil da velocidade tangencial simulado quando $x=0$ no plano YZ nos ciclones 7,8 e 9.....	114

<b>Figura A1</b> - Evolução do resíduo ciclone 1 .....	128
<b>Figura A2</b> - Evolução do resíduo ciclone 2 .....	129
<b>Figura A3</b> - Evolução do resíduo ciclone 3 .....	130
<b>Figura A4</b> - Evolução do resíduo ciclone 4 .....	131
<b>Figura A5</b> - Evolução do resíduo ciclone 5 .....	132
<b>Figura A6</b> - Evolução do resíduo ciclone 6 .....	133
<b>Figura A7</b> - Evolução do resíduo ciclone 7 .....	134
<b>Figura A8</b> - Evolução do resíduo ciclone 8 .....	135
<b>Figura A9</b> - Evolução do resíduo ciclone 9 .....	136
<b>Figura B1</b> - Ciclone 1, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	138
<b>Figura B2</b> - Ciclone 2, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	139
<b>Figura B3</b> - Ciclone3, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	140
<b>Figura B4</b> - Ciclone4, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	141
<b>Figura B5</b> - Ciclone5, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	142
<b>Figura B6</b> - Ciclone6, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	143
<b>Figura B7</b> - Ciclone7, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	144
<b>Figura B8</b> - Ciclone8, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	145
<b>Figura B9</b> - Ciclone9, plano ZY quando $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B) .....	146
<b>Figura C1</b> - Ciclone 1 queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	148
<b>Figura C2</b> - Ciclone 2: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	149
<b>Figura C3</b> - Ciclone 3: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	150
<b>Figura C4</b> - Ciclone 4: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	151

<b>Figura C5</b> - Ciclone 5: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	152
<b>Figura C6</b> - Ciclone 6: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	153
<b>Figura C7</b> - Ciclone 7: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	154
<b>Figura C8</b> - Ciclone 8: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	155
<b>Figura C9</b> - Ciclone 9: queda de pressão, velocidade axial e tangencial .....	156
<b>Figura D</b> - Algoritmo gerado na linguagem C++, compilado na função UDF .....	158



## TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Constantes usadas na elaboração do algoritmo acoplado no UDF .....	55
<b>Tabela 3.1</b> - Dimensões dos ciclones simulados .....	61
<b>Tabela 3.2</b> - Quantidade de malhas geradas no GAMBIT .....	68
<b>Tabela 3.3</b> - Condições da simulação numérica .....	70
<b>Tabela 3.4</b> - Queda de pressão experimental e queda de pressão obtida na primeira simulação .....	74
<b>Tabela 3.5</b> - Células elaboradas nas etapas de pré-processamento e pós-processamento .....	75
<b>Tabela 4.1</b> - Critério para análise da malha em função ao ângulo de distorção .....	84
<b>Tabela 4.2</b> - Porcentagem do ângulo de distorção nas células elaboradas no Gambit, ciclones 1, 2, 3, 4 e 5 .....	85
<b>Tabela 4.3</b> - Porcentagem do ângulo de distorção nas células elaboradas no Gambit, nos ciclones 6, 7, 8 e 9.....	86
<b>Tabela 4.4</b> - Porcentagem do ângulo de distorção (QEAS) nas células após o terceiro refinamento no Fluent. Ciclones 1, 2, 3, 4 e 5 .....	87
<b>Tabela 4.5</b> - Porcentagem do ângulo de distorção nas células após o terceiro refinamento no Fluent. Nos ciclones 6, 7, 8 e 9.....	88
<b>Tabela 4.6</b> - Simulação da queda de pressão nos nove ciclones, em Pascal (Pa)...	92
<b>Tabela 4.7</b> - Queda de pressão simulada no FLUENT antes de realizar o refinamento das células e queda pressão experimental (Scarpa, 2000) .....	103
<b>Tabela 4.8</b> - Queda de pressão simulada no FLUENT após o terceiro afinamento das células e queda de pressão experimental (Scarpa, 2000) .....	103
<b>Tabela 4.9</b> - Condições da simulação bifásica .....	115
<b>Tabela 4.10</b> - Eficiência de coleta experimental e coleta simulada no FLUENT Antes de realizar o afinamento das células .....	115
<b>Tabela 4.11</b> - Eficiência de coleta experimental (Scarpa 2000) e eficiência de coleta simulada no FLUENT após o terceiro refinamento das células .....	116

## LISTA DE SÍMBOLOS

A: Altura da entrada, [L].

$A$  = Área projetada do corpo, [L<sup>2</sup>]

a, b, c = Posição de uma partícula num tempo referencial, [L]

B: Largura da entrada, [L]

CFD: Fluido Dinâmico Computacional, [-]

C: altura do coletor de pó [L].

$C_D$  = Coeficiente de arrate.

$\bar{c}$  = concentração média de uma partícula qualquer, [M].

$c(x, t)$  = concentração média em  $x$  no tempo  $t$ , [M].

$C_{1\varepsilon}$  e  $C_{2\varepsilon}$  = Constantes de simulação, [-].

$C$  = constante da camada logarítmica dependente da rugosidade na parede, [-].

$\rho$  = Densidade do fluido, [M L<sup>-3</sup>].

$D$  = Grandeza da força de arraste,

$D_c$  = Diâmetro do ciclone, [L].

$D_e$ : Diâmetro do duto de saída do gás (*vortex*), [L].

$\xi$  = número adimensional chamado coeficiente de pressão, [-].

$\xi_i$  = número adimensional chamado coeficiente de pressão na entrada do ciclone, [-]

$\xi_c$  = Número adimensional chamado coeficiente de pressão no corpo do ciclone, [-].

$\xi_o$  = Número adimensional chamado coeficiente de pressão no duto de descarga, [-]

$\mathcal{E}$  = Eficiência, [-]

$\xi_e$  = Fator de interpolação, [-]

$H$  = Somatória das alturas do cilindro e cônica, [L]

$h^* = \frac{h}{D_c}$ , [-]

$h$  = altura da parte cilíndrica, [L]

$K_i$  = Coeficientes de difusão turbulenta nas direções do  $x, y$  e  $z$

$K$  = constante de Von Kármán

$n$  = Expoente de vórtice [-]

$L$  = Altura do *finder*, [-]

$P(x, t|x', t')$  = função densidade de probabilidade

PDF = função densidade de probabilidade, [-].

QESA = *Quality Equiangle Skew*, [-].

$Q_{gi}$  = Vazão, [ $L^3 T^{-1}$ ]

$q_{max}$ ,  $q_{min}$ : máximo e mínimo ângulo na face, [-]

$q_{eq}$ : ângulo característico da célula, [-].

$q_{eq} = 60$  (triângulos e tetraedros), [-].

$q_{eq} = 90$  (quadriláteros e hexaedros), [-].

$r_c$  = Distancia radial no *vortex finder*, [L]

$r_e$  = Radio de saída de gás, [L]

$Re$  = Numero de Reynolds, [-]

$r$  = Distancia radial do eixo do ciclone, [-]

$S(x', t')$  = O termo fonte, [-].

$S$ : Diâmetro da parte inferior do cone, [-].

$T$  = Temperatura do gás no ciclone, [ $\theta$ ].

$t$  = Tempo, [T].

$t_o$  = Tempo referencial, [T].

$\tau_w$  = Tensão de cisalhamento na parede

$W$  = Vazão mássica, [ $M^3 T^{-1}$ ]

$\Delta P$  = Queda de pressão, [ $M L^{-1} t^{-2}$ ]

$U$  = velocidade media

$\bar{u}_t$  = vetor velocidade média do ar

$\vec{u}$  = vetor velocidade

$u^+$  = velocidade próxima à parede [ $L T^{-1}$ ]

$u_t$  é a velocidade tangencial conhecida na parede, [ $L T^{-1}$ ]

$V_g$  = velocidade características do ciclone, [ $L T^{-1}$ ].

$V_{gi}$  = velocidade característica do valor médio na entrada, [ $L T^{-1}$ ].

$V_{gc}$  = velocidade media axial, [ $L T^{-1}$ ].

$V_{go}$  = media do gás no duto de saída o "*vortex finder*", [ $L T^{-1}$ ]

$v_r$  = velocidade radial, [ $L T^{-1}$ ].

$v_t$  = Velocidade Tangencial, [ $L T^{-1}$ ].

W, E, S e N = Pontos nodais vizinhos para malhas bidimensionais, [-]

x, y, z = eixos de simetria, [-]

$x_i$  = Direção x, [-]

$y^+$  = distância adimensional da parede, [-]

$Z$  = Altura do cone, [L]

### Letras Gregas

$\alpha_\varepsilon$  e  $\alpha_k$  = números inversos de Prandtl efetivo [-]

$\mu_{eff}$  = combinação da turbulência molecular e viscosa [ $M L^{-1} T^{-1}$ ]

$\mu$  = Viscosidade laminar [ $M L^{-1} T^{-1}$ ]

$\mu_t$  = Viscosidade turbulenta [ $M L^{-1} T^{-1}$ ]

$\Delta y$  = distância à parede [L]

$\phi$  = propriedade.

$\Gamma$  = termo difusivo,

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O ciclone é um dos equipamentos básicos para a limpeza dos gases tanto do ponto de vista econômico (devido aos baixos custos de implantação, operação e manutenção), quanto do ponto de vista funcional (pode atingir até altas porcentagens de eficiência dependendo do tamanho de partículas, sua eficiência é constante ao longo de sua vida útil, separam grandes quantidades de matéria, a perda de carga sempre é constante, facilidade de remoção do material coletado, etc.).

O ciclone é um equipamento geralmente destinado à separação de material particulado de uma corrente gasosa e também como pré-coletores, como equipamento auxiliar nos filtros de mangas, etc. Construído basicamente sem peças moveis, apresenta uma entrada lateral e duas saídas orientadas no eixo central do equipamento (Figura 1.1). Uma delas está situada na base do equipamento e que dá acesso a um coletor de sólidos e a outra disposta no topo do equipamento, permite a descarga da corrente fluida com baixa concentração de material particulado.

Os separadores tipo ciclones representam uma das mais simples formas construtivas de equipamento de processo, e um dos poucos equipamentos encontrados em simples e avançadas aplicações industriais. Possui fácil adaptabilidade em uma grande faixa de aplicações que vão a 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.

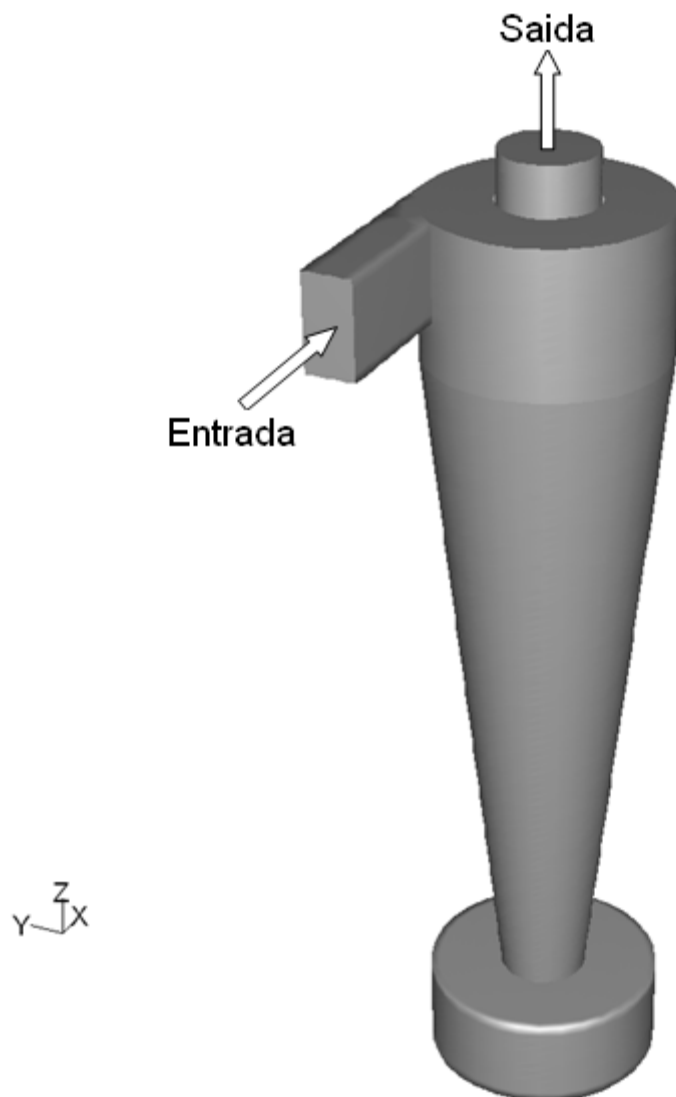


Figura 1.1 Esquema de um separador tipo ciclone

Estes são os motivos do grande interesse em compreender mais detalhadamente o comportamento do escoamento dentro deste equipamento.

A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma ferramenta poderosa e com aplicação em praticamente todos os ramos da engenharia química. Suas vantagens estão relacionadas ao fato de que ela permite investigar o escoamento de fluidos dentro dos equipamentos empregados em processos químicos, prevendo, assim, os perfis internos de velocidade e pressão, sem as desvantagens de custo e tempo relacionadas à realização de experimentos

laboratoriais. A fluidodinâmica computacional pode ser uma alternativa ao processo de otimização experimental do escoamento ao longo do ciclone

A transferência do problema físico para o numérico (código computacional CFD), pode não reproduzir os dados experimentais tendo que existe uma serie de dificuldades na modelagem como, por exemplo, a capacidade limitada do computador usado na modelagem, o tempo empregado nas simulações, etc.

Neste trabalho, foram realizadas simulações numéricas do escoamento bifásico usando o pacote comercial de fluidodinâmica computacional FLUENT 6.3.26.

São dois os parâmetros de maior importância que ajudam a avaliar o funcionamento do ciclone, eles são: a eficiência de coleta do material particulado e a queda de pressão. Com base nas simulações, foi possível estudar-se os perfis de velocidade e pressão no ciclone e comparar os resultados obtidos com dados existentes na literatura, mostrando, assim, que a modelagem utilizada foi satisfatória para avaliar a física do problema bifásico em separador tipo ciclone.

Podemos enunciar os objetivos deste trabalho como se segue:

### **Objetivo geral**

Este trabalho propõe avaliar a eficiência de coleta e a queda de pressão nos ciclones usados para a limpeza de gases mediante o pacote comercial FLUENT

### **Objetivos específicos:**

1. Desenhar as geometrias e as malhas nos ciclones com a melhor qualidade possível para a simulação numérica.
2. Avaliar numericamente os campos de velocidade para cada um dos ciclones simulados
3. Avaliar numericamente a queda de pressão para cada um dos ciclones simulados.

4. Com base aos dados experimentais obtidos por Scarpa (2000) comparar os resultados simulados com os experimentais.
5. Gerar recomendações sobre a metodologia numérica, como ferramenta de análise de dados no ciclone.

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica onde se aborda o funcionamento do ciclone, os trabalhos mais relevantes associados ao tema de modelagem do ciclone com CFD, os modelos matemáticos usados para o estudo de material particulado assim como também os métodos numéricos empregados na simulação.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia empregada nas simulações. Mostram-se passo a passo todas as etapas que foram feitas até chegar aos resultados finais através das etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento.

No capítulo 4 são mostrados e analisados os resultados obtidos das simulações; é feita a análise das malhas, dos escoamentos monofásicos e dos escoamentos bifásicos.

No capítulo 5 o trabalho é finalizado, no qual se apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRAFICA

#### 2.1. Funcionamento do Ciclone

O movimento do gás e das partículas no interior do ciclone tem sido objeto de muitos estudos nos últimos anos, paralelamente ao desenvolvimento do conhecimento dos fluxos turbulentos. Desde a década de 30 até o início da década de 90, foram desenvolvidas inúmeras pesquisas experimentais sobre a queda de pressão e eficiência de coleta. A maior parte dos experimentos em ciclones se desenvolveu entre os anos 1930-1950, destacando especialmente as medidas de velocidade mediante tubo Pitot de Alexander em 1949 e Linden em 1949. (Jil M, 2000)

Atualmente, estas técnicas deram espaço a outros métodos experimentais mais precisos, como Anemometria Laser-Doppler e Fio Quente os quais constituem a base dos modernos modelos semi-empíricos.

Hoje em dia a Fluido Dinâmica Computacional (CFD) está ajudando na determinação do campo fluido e na eficiência de separação no interior do ciclone (Boysan et al., 1982; Zhou e Soo, 1990; Minier et al., 1991) (Jiménez et. al., 2008).

##### 2.1.1 Forças interfaciais

As forças interfaciais são comumente divididas em dois tipos: a força de arraste e outras forças (*drag force* e *non-drag forces*). De acordo com Paladino (2001) essa distinção é feita a partir do fato de que quando um corpo é submerso numa corrente fluida, as forças de não-arraste (massa virtual e sustentação são as mais comumente consideradas) aparecem mesmo quando a fase contínua é considerada invíscida.

As forças de interface geralmente levadas em consideração na modelagem de escoamentos multifásicos dispersos são as forças de arraste, de massa virtual, de sustentação e de dispersão turbulenta. Os três primeiros

aparecem quando um corpo sólido é submerso numa corrente fluida viscosa, independentemente se o regime de escoamento é laminar ou turbulento, enquanto a força de dispersão turbulenta indica a dispersão da fase particulada devido à turbulência da fase contínua.

Em muitas simulações de equipamentos de separação gás – sólido as forças de arraste são as únicas consideradas por estarem sempre presentes e serem em geral dominantes (Avci A., Karagoz 2000).

A força de arraste é função da velocidade de fluxo e da viscosidade do fluido. Sua influência na estrutura do escoamento depende do tipo de problema que se pretende estudar. A forma padrão de expressar a força de arraste sobre um corpo num determinado escoamento é através de um coeficiente de arraste, como segue:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $U$  é a velocidade média,  $D$  é a grandeza da força de arraste e  $A$  é a área projetada do corpo na direção do fluxo.

Paladino (2001) afirma que a força de arraste sobre um corpo pode ser separada em duas parcelas, a força devida ao cisalhamento superficial e aquela exercida pela distribuição de pressão assimétrica no corpo, chamado de arraste de forma. Assim, para baixos números de Reynolds o arraste da partícula é principalmente devido ao atrito superficial. Quando o número de Reynolds aumenta, o arraste de forma vai tendo maior influência, até que para altos valores de  $Re$  o arraste é dominado por este fenômeno. Dessa forma três regimes são amplamente conhecidos:

1.- Regime de Stokes ( $0 \leq Re \leq 0,2$ ). Neste regime, o coeficiente de arraste é dado pela Lei de Stokes.

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (2.2)$$

2.- Região Viscosa ( $0 \leq Re \leq 500 - 1000$ ). Nesta região tanto o atrito superficial quanto o arraste são importantes. Diversas correlações empíricas são avaliadas:

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0,15Re^{0,678})C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0,1Re^{0,75}) \quad (2.3)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + 5,48Re^{-0,573} + 0,36 \quad (2.4)$$

3.- Região inercial ou turbulenta ( $500 - 1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ ). Nesta região o arraste de forma domina totalmente e o coeficiente  $C_D$  se torna praticamente independente do Reynolds assumindo para partícula, um valor aproximado de 0,44.

### 2.1.2 Campos de velocidade

Em muitos fluxos gás - sólido da indústria, como o caso do ciclone, as partículas estão presentes no gás em concentrações suficientemente altas como para que sua presença modifique tanto a turbulência como a velocidade média do gás. Segundo Yuu et al. (1978), ainda em concentrações muito baixas (da ordem de  $0.5 \text{ g/m}^3$ ), os sólidos influenciam de maneira relevante na fase fluida. A modulação da turbulência em presença de partículas é um tema complexo e até a atualidade sem resolver.

O ciclone de entrada tangencial consta de vórtice duplo, no interior perto das paredes internas forma uma corrente helicoidal descendente de gases sujos e o eixo de simetria está composto por um fluxo ascendente de gases limpos. A figura 2.1 mostra os perfis de velocidade no ciclone medidos mediante métodos semi-empíricos por Linden (1949).

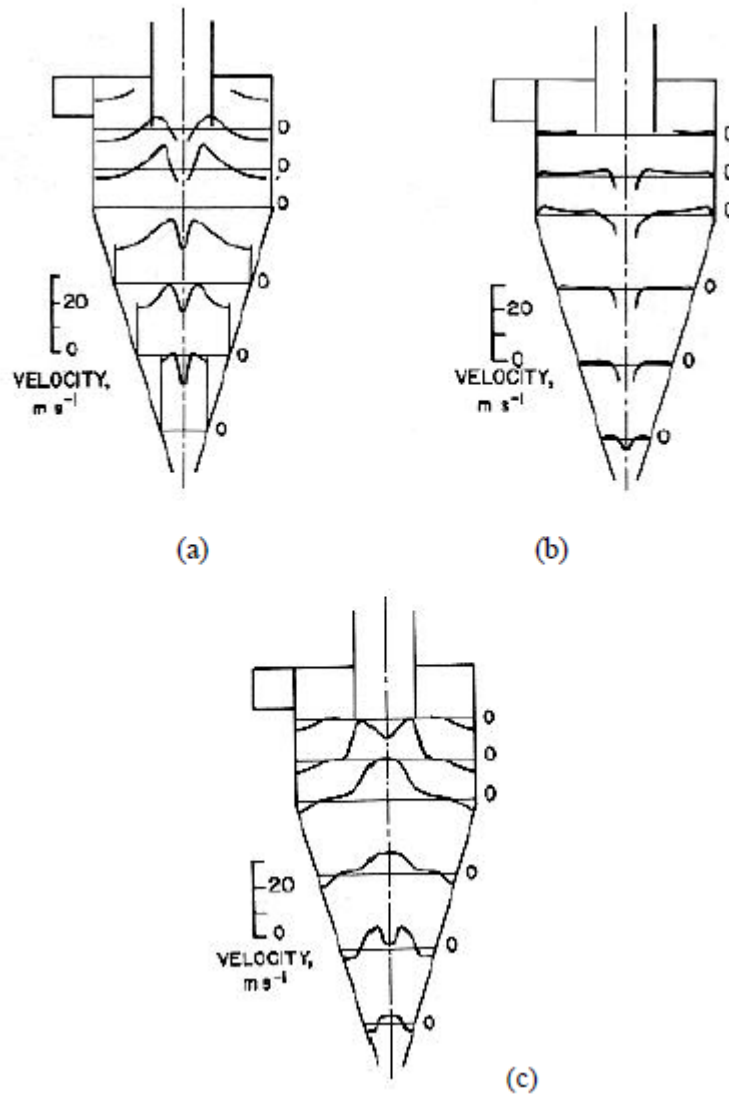


Figura 2.1 Perfil de velocidade no ciclone: (a) tangencial, (b) radial, (c) axial  
(Fonte: Linden. 1949)

### Velocidade tangencial

A velocidade tangencial dos gases (figura 2.1 (a)) aumenta desde um valor mínimo perto da parede até um valor máximo cerca do eixo de simetria. Conforme se aproxima do eixo diminui até cerca de zero no centro.

Em um dos primeiros trabalhos experimentais sobre ciclones, realizado por Shepperd e Lapple (1939), aplicando um balanço de momento angular obtiveram que a velocidade tangencial varia de forma inversa com o raio do

ciclone, com o expoente do raio  $n \approx 0,5$ . Posteriormente, Alexander (1949) obteve de forma experimental uma relação entre dito expoente  $n$  e o diâmetro e a temperatura do gás no ciclone (segundo as seguintes equações).

$$v_t r^n = cte \quad (2.5)$$

$$n = 1 - (1 - 0,67 D_c^{0,14}) \left( \frac{T}{283} \right)^{0,3} \quad (2.6)$$

A primeira equação é válida desde a parede do ciclone  $r = r_c$  até  $r = 0,65 r_c$  (Alexander, 1949), aproximadamente na altura do “*vortex finder*”  $r_c$ . A partir deste ponto até o centro do ciclone se situa o vórtice ascendente de gases (ver figura 2.1).

Em dita zona se produz uma brusca diminuição da velocidade tangencial. As equações anteriores são as mais utilizadas na prática, devido a sua simplicidade e a sua aproximação aos valores experimentais (Patterson e Muns, 1996), e se pode considerar aceitáveis para uma primeira estimação, já que são válidas para concentrações baixas de partículas.

Experimentalmente são confirmados que a velocidade tangencial é uma combinação do vórtice forçado próximo ao eixo do ciclone, e o vórtice livre na região externa da parede, desprezando os efeitos da camada limite da parede. Este tipo de comportamento é conhecido como vórtice do tipo Rankine, de acordo com Ferhat (2001), Karagoz e Avci (2005).

### **Velocidade axial**

No vórtice externo, a velocidade axial dos gases (figura 2.2 c) tem direção descendente ao longo do ciclone. Segundo Linden (1949), esta velocidade é responsável em maior medida que a gravidade do transporte das partículas desde a parede para o dispositivo de recolhida. Pode-se observar

como o sentido da velocidade axial se inverte cerca do corpo central até chegar a valores máximos cerca do duto de saída dos gases limpos, na zona correspondente ao vórtice ascendente. A partir deste ponto, a velocidade axial tende a diminuir em direção ao centro do ciclone.

Os valores positivos e negativos dependem da maneira como os eixos (x, y e z) foram desenvolvidos no desenho gráfico.

### **Velocidade radial**

A velocidade radial da fase contínua é pequena, e é desprezado em muitos estudos, devido a sua contribuição ser mínima quando for comparada às outras duas componentes de velocidade. No vórtice externo se mantém aproximadamente constante com respeito a qualquer seção transversal, sendo seu sentido para o interior do ciclone. No vórtice interno a velocidade radial tem sentido contrário ao vórtice externo e seu valor aumenta rapidamente (em sentido negativo) quando se aproxima ao corpo do ciclone.

O cálculo da velocidade radial no vórtice do ciclone pode efetuar-se por continuidade, assumindo que o gás escoo uniformemente para o interior ao longo da superfície cilíndrica.

$$v_r = \frac{Q_{gi}}{2\pi r_e h^*} \quad (2.7)$$

A velocidade radial média é importante teórica e praticamente para o cálculo da eficiência. De acordo com o princípio de conservação de massa, ela deve ser maior perto do núcleo central.

### **2.1.3 Turbulência**

Os escoamentos se tornam instáveis acima de certo número de Reynolds. Em baixo número de Reynolds, os escoamentos são laminares. Em alto número de Reynolds, os escoamentos tornam-se turbulentos. Um estado

caótico e aleatório de movimento se desenvolve, no qual a velocidade e a pressão se alteram continuamente com o tempo.

A maior parte dos escoamentos na engenharia é turbulenta, portanto, o regime de escoamento turbulento não é só de interesse teórico. No estudo de mecânica dos fluidos é necessário acesso a ferramentas capazes de representar os efeitos da turbulência. Logo, se faz necessário conhecer a física da turbulência e sua modelagem.

O aspecto do escoamento, no caso da turbulência, é caracterizado pela formação de vórtices e pela mistura das camadas fluidas. A velocidade crítica  $V_k$ , na qual o escoamento laminar passa a turbulento, depende do fluido e da geometria das superfícies que o limitam.

O primeiro estudo significativo sobre escoamento turbilhonar foi realizado por Koch em 1958 considerando como fluxo o ar, onde foi observado que a rotação de uma seção de um tubo gerava um decréscimo do escoamento tangencial ao longo do cilindro. Este tipo de escoamento é fisicamente complexo e apresenta um comportamento tridimensional caracterizado por linhas de corrente encurvadas. Vários estudos experimentais mostram que é possível gerar este tipo de escoamento na prática a partir da rotação de um ou os dois cilindros de um espaço anular, pela introdução de uma ou várias entradas tangenciais na base de um conduto, ou ainda pela implantação de hélices ou aletas na entrada de um conduto (Yajnik K. S e Subbaiah M. V.1973)

Os escoamentos turbulentos têm sido vistos como um dos mais importantes e menos compreendidos domínios da dinâmica dos fluidos. Tem sido verificado também que muitos sistemas dinâmicos com menor número de graus de liberdade apresentam características semelhantes aos movimentos turbulentos.

### 2.1.4 Eficiência de separação

A eficiência de separação pode ser definida como a fração de sólidos que são separados após sua passagem pelo ciclone (Leith e Licht 1972). Comumente é expressa em termos de porcentagem, a vazão mássica de sólidos coletados no *overflow* e a vazão mássica alimentada no ciclone de acordo com a seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{partículas que saim do ciclone pelo vortex superior}}}{W_{\text{partículas que ingressam no ciclone}}} \times 100\% \quad (2.8)$$

A separação de partículas é o resultado das forças centrífugas, as quais forçam as partículas em direção a parede. Na figura 1.5 se mostra uma curva típica da eficiência fracionaria.

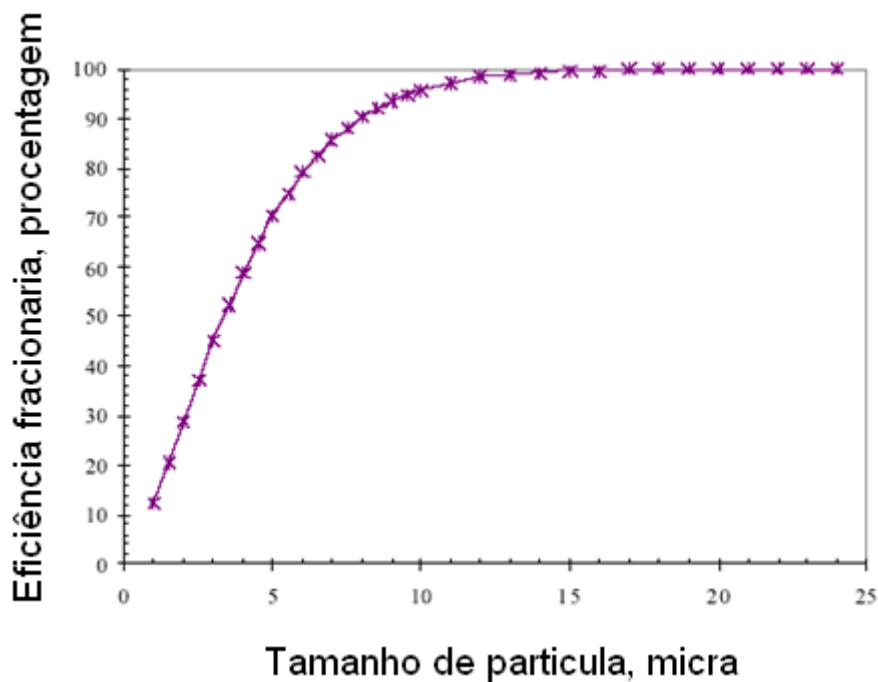


Figura 2.2 Curva típica de a eficiência fracionar (Fonte: Cortés e Gil, 2000)



### 2.1.5 Queda de pressão

A magnitude da queda de pressão ao longo do ciclone representa um custo operacional. As principais contribuições da perda de pressão segundo Sheppherd e Lapple (1939) são as seguintes:

- Perdas (ou recuperação) devidas à aceleração (desaceleração) do fluxo na entrada do ciclone, provocadas por variações na área de entrada.
- Perdas devidas à fricção dos gases com as paredes do ciclone.
- Perdas devidas à fricção dos gases com o duto de saída
- Perdas (ou recuperação) causadas por aceleração (o desaceleração) do gás por variações na geometria da saída.
- Recuperação da energia de rotação do gás em pressão no duto de saída.

Desprezando a variação da energia potencial e cinética que sofre o gás, a variação da pressão do gás é formulada da seguinte maneira:

$$\Delta P = \xi \rho_g \frac{v_g^2}{2} \quad (2.9)$$

$$\xi = \xi_i + \xi_c + \xi_o \quad (2.10)$$

A variável  $\xi$ , é um número adimensional chamado coeficiente de pressão. Comumente usado para termos relacionados com a queda de pressão. Na entrada  $\xi_i$ , no corpo do ciclone,  $\xi_c$ , e no duto de descarga,  $\xi_o$ . Existe discrepância na bibliografia sobre o termo relevante da queda de pressão. Para alguns autores como Sheppherd e Lapple (1939), Stairmand (1951), Alexander (1949) e Casal e Martinez-Benet (1989), a contribuição mais importante é a correspondente à entrada e ao corpo do ciclone. E outros autores como Barth (1956) e Muschelknautz (1972) consideram que tem maior

influência na queda de pressão o duto de saída do gás “*vortex finder*”. (Fonte: Cortés e Gil, 2000).

Todos os modelos consideram que o coeficiente da queda de pressão depende unicamente dos parâmetros geométricos (Bingtao. 2004).

Na Equação 2.9,  $V_g$  é a velocidade características do ciclone. Igualmente, segundo o termo relevante considerado na queda de pressão. Existem as seguintes formulações:

$$V_{gi} = \frac{Q_{gi}}{ab} \quad (2.11)$$

$$V_{gc} = \frac{Q_{gi}}{\pi D_c^2/4} \quad (2.12)$$

$$V_{go} = \frac{Q_{gi}}{\pi D_e^2/4} \quad (2.13)$$

A equação de  $V_{gi}$  (equação 2.11) velocidade característica do valor médio na entrada é considerada por Sherpperd e Lapple (1939) e Stairmand (1951). E  $V_{gc}$  (equação 2.12) velocidade media axial que depende do diâmetro do ciclone.

Outros modelos como os de Barth (1956) e Muschelknautz (1972), consideram como velocidade carateristica a velocidade media do gás no duto de saída o “*vortex finder*”  $V_{go}$  (equação 2.13). Considera-se separadamente os modelos baseados nas condições de entrada, os baseados nas condições de saída e os baseados na meia axial do diâmetro do ciclone (Hoffman 2002).

## 2.2. Visão da modelagem

A modelagem é a representação matemática de um sistema real, mas esta não é perfeita. Uma modelagem deve, dentro do possível, ser válida com experiências práticas ou calibrada com observação no campo ou laboratório.

A simulação nos computadores permite fazer avaliações dos parâmetros do modelo sem maiores perdas de tempo, além do que o estado do sistema pode ser conhecido em qualquer momento e até pode-se observar processos impossíveis de visualizar na vida real. Em geral, o enfoque da modelagem de fenômenos físicos (como a turbulência) é feita nas simulações de CFD mediante modelos estatísticos. (Fluent 6.3 Documentation).

### 2.2.1 Aplicação da técnica de CFD em Ciclones

Os códigos computacionais CFD permitem obter conhecimentos mais profundos sobre o campo de velocidade, o campo de pressão e turbulência nos separadores tipo ciclone, de forma a permitir a otimização do desempenho do equipamento.

Este nível de conhecimento só é possível com a solução completa das equações de conservação (massa e movimento), sujeitas a modelos rigorosos de turbulência.

As modernas técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD) permitem a predição de fenômenos como a reversão do escoamento, escoamentos de alta vorticidade, existência de zonas de recirculação, entre outros (Meier e Mori, 1997).

**Boysan et al. (1982)**, foi a primeira apresentação da aplicação das técnicas de CFD para a simulação de ciclones na qual os autores utilizaram as equações médias temporais de Navier-Stokes para a fase contínua acopladas a um modelo de turbulência anisotrópico, por intermédio da combinação do modelo  $k - \varepsilon$  padrão (Launder et al., 1974) e os tensores algébricos de Rotta

(1976). Os modelos numéricos empregados corresponderam a uma versão do então novo método (na época) dos volumes finitos. Trata-se de um trabalho de vanguarda, ao se levar em conta os poucos recursos computacionais existente na época, tanto no que se refere aos métodos numéricos bem como aos próprios computadores. O resultado referente ao campo de escoamento do gás foi discutido e comparado com dados experimentais encontrados na literatura, o movimento da partícula é considerado e as eficiências de coleta calculadas foram comparadas com aquelas obtidas por Stairmand (1951) e por Mothes et al. (1981). Os autores utilizaram um modelo euleriano-lagrangeano para o desenvolvimento do trabalho. O modelo euleriano é usado para descrição dos princípios de conservação da massa e quantidade de movimento para todas as fases e o modelo lagrangeano é usado para descrição da trajetória das partículas e dados sobre eficiência de coleta do ciclone, a geometria do sistema, foi tratada como sendo bidimensional em coordenadas cilíndricas. Os autores se apresentam como pioneiros do procedimento de desacoplamento das fases (contínua e descontínua) para o escoamento em fase diluída. Os autores conseguiram resultados que indicaram ser possível construir um modelo capaz de prever o complexo comportamento do escoamento gasoso no ciclone, incluindo a reprodução, a níveis satisfatórios, de predição da queda de pressão, perfis de velocidade tangencial e axial e eficiência de coleta (ambos qualitativa e quantitativamente). Ainda, foi possível obter um modelo para o comportamento da fase particulada, sendo este usado para prever a eficiência de coleta de ciclones.

**Cristea et al. (1994)** fizeram um estudo preliminar da simulação tridimensional (3D) num ciclone, de um escoamento multifásico turbulento proveniente de uma suspensão pré-aquecida de um forno de cimento. Eles apresentaram pela primeira vez um trabalho realizado com o código comercial denominado FLUENT, na versão 4.2. Buscou-se avaliar a performance de ciclones através de separação e queda de pressão. O artigo apresentou alguma informações sobre a simulação bidimensional (2D) – simetria axial, considerando invariantes as propriedades termodinâmicas e de transporte dentro do ciclone. Os principais objetivos deste estudo concentraram-se em avaliar a influência do refinamento da malha, esquemas de discretização, tipo

de modelo de turbulência e condições de contorno para uma correta simulação do processo físico. O modelo dos tensores de Reynolds foi usado para turbulências, pois o modelo  $k - \epsilon$  padrão não pode ser usado por não comportar efeitos anisotrópicos da viscosidade turbulenta. Os autores concluíram que, no caso da simulação o refinamento da malha não influencia a distribuição dos componentes radial e axial de velocidade, de modo que se pode trabalhar com uma malha não refinada e um esquema de discretização do tipo QUICK. Uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados, nos modelos 2D e 3D, foi obtida neste trabalho, no que se refere aos dados de componentes da velocidade média e flutuante, eficiência e performance do ciclone. Porém algumas discrepâncias foram encontradas entre os resultados obtidos pelo modelo e os dados experimentais no estudo do vórtice do escoamento. O código FLUENT fornece resultados da simulação numa velocidade maior do que aquela obtida com outros códigos comerciais da fluidodinâmica computacional avaliados anteriormente. Os autores ressaltaram que a boa concordância obtida restringiu-se particularmente ao tipo de estudo realizado, o qual incluiu escoamentos multifásicos diluídos apenas. Não foi considerado o efeito de interação partícula – partícula na fase particulada. Conseqüentemente, os autores alertam para a realização de novos trabalhos visando o aprofundamento de pesquisas nestas deficiências apontadas.

**Cristea et al. (1998)** descreveram a simulação 3D de um escoamento ciclônico bifásico concentrado, medindo os componentes vetoriais da velocidade média e flutuante, queda de pressão e eficiência global de coleta para a fase contínua (gás) e dispersa (particulada). A simulação numérica foi realizada usando FLUENT/Uns, um código baseado no método dos volumes finitos. O modelo de turbulência usado foi o RSM (*Reynolds-Stress-Model*); o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade foi o SIMPLE e esquema de interpolação UPWIND, baseado no método dos volumes finitos. Um modelo euleriano -lagrangeano foi adotado para a simulação do escoamento bifásico disperso, devido à alta concentração de sólidos presentes na corrente gasosa. A solução convergente do campo de escoamento da fase contínua foi usada para realizar a simulação do escoamento da fase descontínua, expressa num modelo lagrangeano. Os resultados computacionais apresentaram boa

concordância com os dados experimentais (obtidos com a utilização de “Laser Doppler Anemometer” LDA) para os componentes da velocidade média na fase contínua; a influência do campo de velocidades flutuantes das fases contínuas e descontínua foi razoavelmente bem prevista com o uso do modelo de turbulência RSM, permitindo-se a observação de regiões de formação de vórtice (livre e forçado) e zonas de recirculação interna no ciclone. As trajetórias numericamente simuladas para as partículas de diferentes tamanhos forneceram subsídios úteis para o projeto de ciclones como separadores de partículas.

**Meier (1998)** apresentou, em sua tese de doutorado, uma modelagem fenomenológica, baseada nos princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento, sob a ótica das médias volumétricas, e generalizada para representar o escoamento multifásico vorticial em ciclones. O modelo geral foi particularizado a partir de hipóteses adicionais, dando origem a três modelos distintos. O primeiro dedicado à simulação do escoamento de ar insento de partículas – Modelo Euleriano Monofásico Bidimensional (BEM) – considerou que a fase sólida não exerce influência sobre a fase gasosa, sendo adequado para analisar fenômenos como alta preservação de vorticidade, reversão de escoamento, zonas de recirculação, anisotropia dos tensores de Reynolds e efeitos do sistema coletor de sólidos sobre o campo de escoamento do gás. O segundo modelo considerou que as partículas poderiam ser caracterizadas como esféricas e com um diâmetro constante, e que o aglomerado de partículas comportava-se como um fluido invíscido, sob um referencial Euleriano – Modelo Euleriano Euleriano Bifásico e Bidimensional (EEBB) – permitindo a atribuição de efeitos da fase sólida sobre a fase gasosa, tais como a atenuação do escoamento vorticial e a conseqüente queda de pressão possibilitando a avaliação da queda de pressão em ciclones. E finalmente, a terceira versão acoplou o modelo EEBB com um modelo Lagrangeano – O modelo Euleriano – Euleriano – Lagrangeano Bidimensional (EELB) – possibilitando a predição da trajetória das partículas dependendo de seu diâmetro e de sua posição inicial na entrada do ciclone, a partir de um campo de escoamento do gás obtido sob a influência da fase particulada. Com o conhecimento das trajetórias para cada diâmetro de partículas, obteve-se o

subsídio necessário à predição da curva de eficiência de coleta e da eficiência global do ciclone. Foi desenvolvido um programa computacional baseado na aplicação do método dos volumes finitos com acoplamento pressão – velocidade do tipo SIMPLE e malhas deslocadas, para a solução segregada das equações provenientes dos três modelos. Os principais resultados deste trabalho mostraram que a metodologia empregada, baseada na técnica da fluidodinâmica computacional, mostrou-se apta aos estudos de melhoria de desempenho de ciclones, quantificada, principalmente por reproduzir a queda de pressão e eficiência de coleta. O autor, porém, aponta para a necessidade de realizar modelagem e simulação de ciclones em três dimensões.

**Hoffmann et al. (2001)**, estudaram a influência do comprimento (H) do corpo do ciclone na eficiência e na queda de pressão. Eles realizaram testes experimentais em ferramentas de CFD. A variação do comprimento (H) do ciclone foi de 0,67 a 1,37 metros, variando-se o comprimento da seção cilíndrica. Na simulação, foi usado um pacote de CFD, com esquema de interpolação 2D SUDS. O modelo de turbulência usado foi um modelo híbrido entre um modelo algébrico e um modelo completo dos tensores de Reynolds. A eficiência cresceu com o aumento do comprimento do ciclone, porém quando este ultrapassou  $\frac{H-S}{D} = 5.65$ , a eficiência diminuiu dramaticamente. Os autores acreditam que esta queda na eficiência é resultado do posicionamento do vórtex quando o comprimento do ciclone é aumentado. A queda de pressão diminuiu com o aumento do tamanho do ciclone, pois quando o ciclone é aumentado, aumenta também o fator de fricção na parede, diminuindo a intensidade da rotação, causando um decréscimo na queda de pressão, efeito esse semelhante ao caso do aumento de carregamento dos sólidos (Hoffmann et al., 1991). Os resultados obtidos através da fluidodinâmica computacional mostraram-se em concordância com aqueles obtidos experimentalmente.

**Peres et al. (2002)** avaliaram a turbulência mediante o modelo DNS (Diferencial Stress Model) estudando o escoamento no ciclones de forma experimental e numericamente. Foi utilizado o CFX 4.4 para a simulação, e na parte experimental foi determinada a distribuição radial dos componentes da

velocidade tangencial através de dados de pressão. Os resultados obtidos mostram boa concordância com os dados experimentais, porém ocorreram problemas quanto a convergência e estabilidade na solução numérica, que podem ser minimizados escolhendo-se procedimentos apropriados.

**Corrêa (2003)** analisaram experimentalmente e numericamente o tempo de residência das partículas dentro do ciclone usado como secador. Foi utilizado o CFX 4.4 para a simulação, os modelos de turbulência empregados foram: o  $k - \epsilon$  padrão, o  $k - \epsilon$  RNG, e o modelo de tensores diferenciais (DNS). No acoplamento pressão – velocidade foi usado o método SIMPLEC, esquema de interpolação UPWIND e as equações foram resolvidas com o algoritmo AMG (algebraic multi-grid). Nesse caso, a influência da fase sólida na fase fluida não foi considerada. Os autores concluíram que as variáveis de maior influência foram o tempo de residência e a concentração volumétrica de sólidos, tanto a nível experimental quanto simulado.

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

**Gimbun et al. (2005)** apresentam um trabalho para avaliar a influência da temperatura e da velocidade de entrada na queda de pressão em ciclones. Para isto, eles utilizam o código computacional FLUENT 6.1. Para corroborar os dados obtidos, estes foram comparados com correlações empíricas. O modelo de turbulência usado foi o RNG  $k - \epsilon$ . O modelo proposto apresentou boa concordância entre os dados calculados empiricamente e os simulados para os perfis de temperatura e velocidade. Concluíram que a queda de



pressão é diretamente proporcional à velocidade e inversamente proporcional à temperatura.

**Xiang et al (2005)** estudaram o escoamento de ciclones de diferentes alturas através da fluidodinâmica computacional. Para isto foi usado o código FLUENT 5.5 e o modelo de turbulência usado foi RSM (Reynolds Stress Model), as malhas empregadas foram do tipo hexaédricas. Os resultados mostram que a velocidade tangencial diminuiu quando a altura do ciclone é aumentada, portanto em ciclones “grandes” a eficiência de coleta é baixa.

**Vergini et. al (2007)** estudaram a simulação do escoamento multifásicos na fase sólida. Primeiro avaliando estudos já feitos por Paterson e Munz (1996) e logo depois ampliando a escala em ciclones de tipo industrial numa torre de ciclones de uma indústria de cimento. O comportamento anisotrópico da turbulência foi modelado mediante o modelo  $k - \varepsilon$  padrão, o modelo simulado foi de tipo multifásico euleriano-euleriano. Os resultados na eficiência de coleta foram próximos aos experimentais assim como na queda de pressão.

### 2.2.2. Aplicativo computacional

Fluida dinâmica computacional (CFD) é a análise de sistemas envolvendo o escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados (Versteeg & Malalasekera, 1995).

A simulação numérica via técnicas da fluidodinâmica computacional requer a codificação de um programa em uma linguagem estruturada do tipo FORTRAN, por exemplo. Este programa ou conjunto de subprogramas resulta em um código computacional responsável pela obtenção dos resultados numéricos, o qual pode ser classificado em comercial ou não. Na linha dos códigos comerciais tem-se a disposição inúmeros pacotes todos eles estão em base a códigos fechados como, por exemplo: FLUENT, CFX, FIDAP e PHOENICS. Dentre os códigos CFD não comerciais temos o OpenFOAM como uma alternativa devido ao fato de ser gratuito e distribuído com código aberto. (Fonte: CFD on-line).

### 2.2.3 Código CFD

Os códigos CFD são estruturados sobre algoritmos numéricos que podem lidar com problemas de escoamento de fluidos. Para fornecer fácil acesso a seu poder de resolução, todos os pacotes comerciais de CFD incluem sofisticadas interfaces ao usuário para a entrada dos parâmetros do problema e para o exame dos resultados. Um código CFD geralmente contém três etapas principais: um pré-processador, um solver e um pós-processador (Figura 2.3).



Figura 2.3 Estrutura operacional dos pacotes computacionais CFD (Fonte: manual do Fluent)

A seguir é feita uma breve análise das funções de cada uma das etapas.

#### Pré - Processamento

O pré-processamento consiste da entrada de um problema de escoamento em um programa CFD por meio de uma interface com o usuário e a subsequente transformação desta entrada em uma forma apropriada para o uso do solver. As atividades do pré-processamento incluem:

- Definição da geometria da região de interesse: o domínio.
- A geração da malha – a subdivisão do domínio em um número de subdomínios menores: uma malha de volumes de controle.
- Seleção dos fenômenos físicos ou químicos que precisam ser modelados
- Definição das propriedades do fluido
- Especificação das condições de contorno apropriadas
- Especificação dos parâmetros numéricos

A solução para um problema de escoamento (velocidade, pressão, temperatura. etc.) é definida nos nós dentro de cada volume de controle. A precisão de uma solução por CFD é regida pelo número dos volumes de controle ou seja as malhas. Em geral, quanto maior é o número deste, melhor é a precisão da solução. Entretanto, não só a precisão da solução, mas também o custo computacional e o tempo de cálculo são dependentes do refino da malha. Boas malhas são freqüentemente não uniformes: são mais refinadas em áreas onde ocorrem grandes variações de ponto a ponto e é mais grosseira em regiões com relativa menor mudança. Portanto, é necessário conciliar a precisão desejada com o custo computacional na geração de malhas.

No caso do presente trabalho, a geração de malhas foi feita com o pacote computacional GAMBIT com o qual foi possível gerar a geometria em 3D e gerar as malhas no mesmo software. As condições de contorno também foram geradas no GAMBIT.

### **Solver**

A principal técnica de solução numérica empregada no CFD é o método dos volumes finitos. O algoritmo numérico deste método consiste nos seguintes passos:

- Integração formal das equações governantes do escoamento do fluido sobre todos os volumes de controle do domínio de solução
- Discretização envolvente a substituição de uma variedade de aproximações do tipo de diferenças finitas por termos nas equações integradas representando o processo de escoamento tais como convecção, difusão e termos fonte. Isto converte equações integrais num sistema de equações algébricas.
- Solução das equações algébricas por métodos iterativos.

A relação entre o algoritmo numérico e o princípio físico da conservação forma um dos principais atrativos do método dos volumes finitos.

## **Pós - Processamento**

Como no pré-processamento, um grande trabalho de desenvolvimento tem ocorrido no campo do pós-processamento com o aumento do poder computacional, juntamente com a excelente capacidade gráfica dos computadores atuais, os pacotes CFD são equipados com ferramentas versáteis de visualizações. Estas incluem:

- Gráficos vetoriais.
- Gráficos de contorno.
- Gráficos de superfície.
- Rastreamento de partícula.
- Saída em cores dos dados.
- Animações para resultados dinâmicos.

## **2.3 Modelos Matemáticos**

Há anos que a ciência procura resolver as equações oriundas de leis de conservação tanto de forma analítica quanto numérica, mas, devido às características intrínsecas das mesmas, soluções analíticas não são possíveis de modo geral, principalmente quando se trata de obter resultados de situações reais em casos de equações não lineares (Mancuso et al., 2008).

Dentre os modelos matemáticos de dispersão do material particulado existem duas principais abordagens baseados nos modelos multifásicos no ciclone: a abordagem Lagrangeana e a abordagem Euleriana (Paladino 2001, ver Figura 2.4).

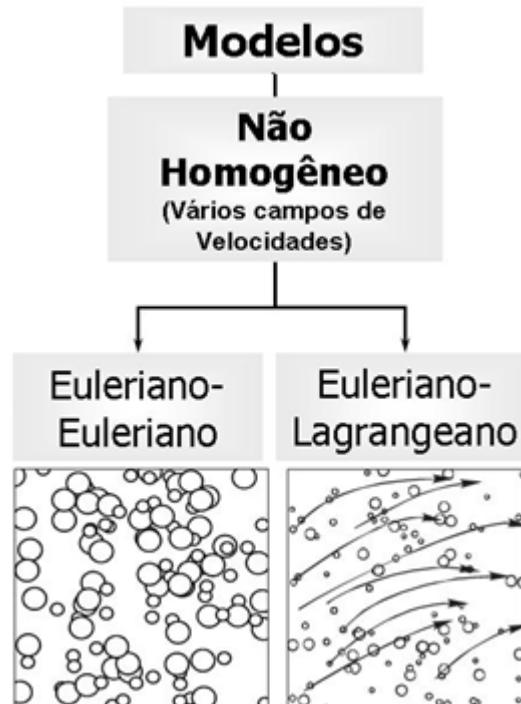


Figura 2.4 Classificação de modelos para escoamentos multifásicos (Fonte: Adaptado Paladino 2001).

### 2.3.1 Modelo Euleriano

O sistema de coordenadas é fixo no espaço, as propriedades do fluido como densidade, temperatura, velocidade e pressão são calculadas em um ponto  $(x, y, z)$  fixo no espaço num dado tempo  $t$ .

Na abordagem Euleriana, a dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial parcial para a conservação da massa da substância considerada, sendo resolvida em uma malha fixa no espaço. Ela fornece valores médios de concentração, para as partículas consideradas, em um ponto no espaço.

A partir das equações de conservação é possível obter um modelo matemático da dispersão de uma fonte, dadas as apropriadas condições iniciais e de contorno. A equação de advecção-difusão para o transporte de um componente é a equação de conservação da massa de um componente é dada por:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = -\frac{\partial (\overline{u'_i c'_i})}{\partial x_i} + \bar{S} \quad (2.14)$$

Onde  $\bar{c}$  é a concentração média de uma partícula qualquer,  $\bar{u}_i$  o vetor velocidade média do ar nas direções do  $x, y$  e  $z$ ,  $\bar{S}$  os termos fontes e sumidouros,  $\overline{u'_i c'_i}$  os fluxos turbulentos de concentração,  $t$  o tempo e  $x_i$  as direções  $x, y$  e  $z$ .

Na maior parte dos modelos Eulerianos os fluxos turbulentos de massa do componente são modelados através da hipótese da viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*), dada por:

$$\overline{u'_i c'_i} = -K_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

Onde  $K_i$  são os coeficientes de difusão turbulenta nas direções do  $x, y$  e  $z$ . Nesta hipótese admite-se que o transporte turbulento causado pelas flutuações da velocidade possa ser interpretado como uma difusão turbulenta. A turbulência é um fenômeno comumente dominante em relação ao transporte laminar. Assim, a contribuição da difusão molecular pode ser desprezada na equação. Na resolução, são empregados esquemas numéricos do tipo volumes finitos Maliska (2004). Os valores de concentração são obtidos para cada um dos volumes ou pontos de uma malha. O principal desafio na solução desta equação é a determinação dos coeficientes de difusão turbulenta  $K_i$ . Estas difusividades são dependentes da posição e do tempo e ao contrário dos coeficientes de difusão molecular, não são funções do fluido, mas sim do estado do escoamento, que por sua vez é determinado pelo grau de estabilidade do meio.

### 2.3.2 Modelo Lagrangeano

O sistema de coordenadas é baseado na posição de uma partícula em um tempo  $t$ , relativo à sua posição  $(a, b, c)$  em um tempo de referência  $t_0$ .

Coordenadas Lagrangeanas são fisicamente mais naturais na descrição do movimento do fluido, no entanto são mais difíceis no tratamento matemático.

A aproximação Lagrangeana é uma técnica alternativa para obter as concentrações médias sem precisar resolver a equação (2.14). No esquema Lagrangeano formula-se um modelo de trajetórias para o movimento das partículas de fluido. O elemento partícula de um fluido é um pequeno volume de controle que viaja na velocidade local do meio fluido e, portanto, é claro, a solução do escoamento turbulento que transporta estas partículas deve ser conhecido. A dimensão deste pequeno volume é grande quando comparada com as escalas moleculares e pequena em relação a menor escala de movimento. As partículas movem-se seguindo os vórtices turbulentos, descrevendo trajetórias aleatórias,

A equação Lagrangeana fundamental para a dispersão do material particulado é dada por:

$$c(x, t) = \int_0^t \int P(x, t|x', t') S(x', t') dx' dt' \quad (2.16)$$

Onde  $c(x, t)$  é a concentração média em  $x$  no tempo  $t$ ,  $S(x', t')$  o termo fonte e  $P(x, t|x', t')$  a função densidade de probabilidade (PDF) das partículas, que representa a probabilidade de uma partícula de fluido que estava em  $x'$  no tempo  $t'$  alcançar  $x$  no tempo  $t$ . A equação 2.16 representa uma descrição rigorosa dos processos de transporte e de difusão expressa em uma notação probabilística, onde o parâmetro chave é a PDF. Para determinar a PDF é necessário liberar um número de partículas suficientemente grandes, seguir suas trajetórias e calcular quantas delas alcançam a vizinhança de  $x$  no tempo  $t$ . Portanto, se trajetórias reais das parcelas de ar podem ser obtidas, o cálculo simples da densidade dos pontos de trajetórias fornece uma estimativa da concentração.

Os modelos Lagrangeanos de partículas são ferramentas cada vez mais utilizadas hoje em dia no estudo do material particulado disperso. Estes

modelos são baseados na equação generalizada de Lagevin. A posição de cada partícula, em cada passo de tempo, é obtida pela integração numérica das seguintes equações:

$$du_i = a(x_i, u_i, t)dt + b(x_i, u_i, t)dn \quad 2.17$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i \quad 2.18$$

Onde  $u_i$  é a velocidade das partículas,  $x_i$  a variável espacial,  $t$  o tempo,  $dn$  uma variável randômica. O primeiro termo do lado direito da equação (2.17) é um termo determinístico representando o arrasto viscoso do escoamento sobre as partículas e o segundo em termo estocástico representando acelerações randômicas causadas por flutuações de pressão.

### 2.3.3 Comparativo Lagrangeano-Euleriano

A abordagem Lagrangeana em alguns aspectos é mais intuitiva do que a Euleriana. Mas esta última é melhor para se trabalhar analiticamente, utilizando as derivadas parciais, como os gradientes de pressão e viscosidade. Além de ser mais fácil realizar aproximações numéricas utilizando as derivadas parciais em um ponto fixo, do que em um conjunto arbitrário de partículas em movimento.

Numericamente, a visão de Lagrange corresponde a um sistema de partículas, podendo ou não existir uma malha conectando estas partículas. Já a visão de Euler, corresponde à utilização de grades fixas no espaço, e esta estrutura não se modifica a medida que o fluido passa sobre ela, o que modifica são as características analisadas naquele ponto.

A seguir são apresentados os conceitos teóricos assim como as equações que são resolvidas pelo solver FLUENT.



## 2.4 Equações governantes

As equações governantes para o caso do ciclone com escoamento gasoso são as equações de Navier-Stokes para fluido incompressível de regime transiente.

### 2.4.1. Equações de Navier-Stokes

A solução de problemas de fluxo de fluidos é tipicamente resolvida mediante as equações de Navier-Stokes. Todos os programas de CFD estão baseados nas equações de Navier-Stokes. Foram nomeadas assim depois de que Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes descreveram mediante equações o movimento e a quantidade das substâncias fluidas (tais como líquidos e gases).

#### Equação de Continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.19)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica,  $t$  o tempo e  $\vec{u}$  o vetor velocidade.

O primeiro termo representa a variação da densidade do fluido no tempo, enquanto o segundo termo diz quanto escoo de massa através do contorno do elemento, é o termo convectivo.

#### Conservação da quantidade de movimento

Aplicando-se a segunda lei de Newton num elemento infinitesimal, obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (2.22)$$

Onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes cartesianas do vetor velocidade  $\vec{u}$ .

#### 2.4.2 Equações médias de Reynolds

As equações médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier Stokes - RANS) são desenvolvidas em tempos médios, descrevem o transporte de quantidades na média do fluido onde são modeladas todas as escalas de turbulência. As variáveis são obtidas mediante decomposição instantânea, onde a velocidade instantânea é escrita como uma soma de uma velocidade média e uma velocidade de flutuação ( $\vec{u} = \vec{U} + \vec{u}'$ ). Isto é substituído dentro da equação de Navier Stokes obtendo-se o seguinte rearranjo.

Equação de Continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (2.23)$$

Equação de Reynolds

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] - \left[ \frac{\partial(\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] - \left[ \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \overline{v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho W \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] - \left[ \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] \quad (2.26)$$

onde  $U$ ,  $V$  e  $W$  são as componentes cartesianas do vetor velocidade média  $\vec{U}$ .

Como resultado deste processo de média temporal, aparecem termos adicionais que precisam ser solucionadas, conhecidos como tensores de Reynolds.

### 2.4.3 Modelos de Turbulência

A turbulência é um fenômeno observado em escoamentos com altos números de Reynolds, geralmente acima de 3000, é um processo complexo, principalmente porque é um fenômeno tri-dimensional, transiente e caótico, e pode ter um efeito significativo nas características do escoamento.

Devido a limitações de memória e capacidade computacional, ainda não é possível discretizar os domínios dos modelos práticos de tal forma que o menor elemento da malha seja menor ou igual ao menor vórtice que dissipa sua energia de forma térmica, sem causar movimento nas partículas fluidas ao seu redor (escala de *Kolmogorov*) e dessa forma utilizar a simulação numérica direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*). Assim, são necessários modelos que tentem reproduzir a maneira randômica com a qual a turbulência influencia as propriedades do fluido, os chamados modelos de turbulência. Contudo, ainda não existe um modelo geral, que produza bons resultados para as diversas formas de escoamentos turbulentos.

O fluxo no interior do ciclone possui caráter turbulento, é necessário usar modelos apropriados para descrever os seus efeitos sobre o escoamento. Na hipótese de Boussinesq, a transferência de quantidade de movimento turbulenta é análoga ao transporte cinético molecular, ou seja, o fluxo é proporcional ao gradiente de velocidade. Desta forma, acopla-se o efeito da turbulência como um incremento na viscosidade molecular da fase gasosa na equação do movimento.

Os modelos de turbulência podem ser normalmente classificados como (Wilcox, 1993):

- **Modelos Algébricos.** Esses modelos são baseados na hipótese de Boussinesq, que estabelece o conceito de viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ .

Nestes modelos, uma equação algébrica, baseadas em escalas turbulentas características é empregada para a determinação do valor da viscosidade turbulenta.

- **Modelos de uma equação:** Nesses modelos, uma equação diferencial de transporte é resolvida para uma determinada propriedade turbulenta. Em geral, a energia cinética turbulenta  $k$  é adotada como a propriedade turbulenta de referência. Uma segunda propriedade, normalmente uma escala de comprimento, é então fornecida por meio de uma expressão algébrica. Os modelos a uma equação empregam, igualmente, a hipótese de viscosidade turbulenta.
- **Modelo de duas equações “ $k - \varepsilon$ ”:** Os modelos a duas equações utilizam duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas configurando-se assim como modelos de fechamento completos. Esses modelos adotam, tipicamente, uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta,  $k$ , juntamente com uma equação de transporte para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa  $\varepsilon$ .
- **Modelo de Reynolds Stress “RSM”** Também chamados de modelos de fechamento de segunda ordem, esses modelos utilizam equações de transporte explícitas para os componentes do tensor de Reynolds. Entretanto, mesmo nesses modelos, ainda se faz necessária a adoção de uma equação de transporte complementar para  $\varepsilon$  de modo a se obter o fechamento completo do problema.

A correta simulação de escoamentos turbulentos é limitada pela necessidade de se utilizar um adequado modelo de turbulência no fechamento dos termos de tensões de Reynolds.

No caso do modelo de turbulência na simulação do ciclone será usado o modelo  $k - \varepsilon$  RNG, pois este modelo apresenta boas equações para modelar a viscosidade turbulenta em escoamentos com curvaturas e espirais.

#### 2.4.4 Modelo de turbulência: RNG $k - \varepsilon$

O modelo  $k - \varepsilon$  RNG (grupo de renormalização) é usado para eliminar o efeito de turbilhões de escala pequena sobre as equações de *Navier-Stokes*, por meio da remoção sucessiva de escalas mais freqüentes a partir da escala de dissipação viscosa. Após cada iteração na qual uma banda restrita de escalas é removida, os valores remanescentes constituem um sistema modificado de equações de *Navier-Stokes*, na qual há uma viscosidade efetiva modificada que se torna sucessivamente maior que a viscosidade molecular original. Através deste procedimento de eliminação de escalas, a teoria RNG conduz a uma equação diferencial para viscosidade efetiva, que se interpola entre a viscosidade molecular,  $\mu$ , nas pequenas escalas de comprimento, e a viscosidade turbilhonar,  $\mu_t$ , nas escalas de comprimento dos turbilhões, correspondendo aos números de Reynolds altos de escoamentos completamente turbulentos.

As equações de transporte para  $k$  e  $\varepsilon$  foram propostas por Yakhot e colaboradores em 1986 e baseiam-se em rigorosas técnicas estatística *Renormalization Group Theory*. O modelo RNG  $k - \varepsilon$  possui um termo adicional na equação de transporte, a taxa de dissipação de turbulência ( $\varepsilon$ ), responsável pela significativa melhora na precisão dos escoamentos rapidamente forçados ou espiralados. Pela teoria RNG, tal modelo fornece uma fórmula analítica para o cálculo dos números turbulentos de Prandtl. (CFD Online)

As equações de transporte para  $k$  e  $\varepsilon$  (Fluente Documentation), são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + P_b - \rho \varepsilon \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon\bar{u}_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \end{aligned} \quad (2.28)$$

Onde  $\alpha_\epsilon$  e  $\alpha_k$  são os inversos números de Prandtl efetivo para  $k$  e  $\epsilon$ , respectivamente. A viscosidade turbulenta é modelada como:

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (2.29)$$

Sendo  $\hat{v} = \mu_{eff} / \mu$  e  $C_v \approx 100$

O termo  $R_\epsilon$  é modelado como:

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (2.30)$$

Sendo  $\eta = (k/\epsilon) \sqrt{2S_{ij} S_{ij}}$ ,  $\eta_0 = 4,38$  e  $\beta = 0,012$

A equação de transporte para  $\epsilon$  pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.31)$$

Sendo

$$C_{2\epsilon}^* \equiv C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.32)$$

$\mu_{eff}$  é a combinação da turbulência molecular e viscosa ( $\mu_{eff} = \mu_0 + \mu_t$ ) e as constantes de modelação  $C_{1\epsilon} = 1.42$ ;  $C_{2\epsilon} = 1.68$

### 2.4.5 Tratamento junto à parede

Nas regiões do domínio onde há baixa turbulência, especialmente próximo às superfícies sólidas onde a relação de viscosidades (laminar e turbulenta)  $\frac{\mu}{\mu_t} \gg 1$  não é satisfeita. Duas aproximações são comumente usadas para modelar o escoamento nesta região próxima à parede:

- O método de função de parede;
- O método de baixo número de Reynolds.

Na aproximação pela função de parede, as formulas empíricas proporcionam condições de contorno próximo à parede para as equações médias de transporte e de turbulência. Estas fórmulas conectam as condições de parede (isto é, a tensão de cisalhamento na parede) às variáveis dependentes no nó da malha próximo à parede que se presume estar na região completamente turbulenta da camada limite. Uma das maiores vantagens da aproximação por funções de parede é que esta aproximação conserva recursos computacionais valiosos (memória, tempo de processamento, etc.) e evita a necessidade de se levar em conta os efeitos viscosos no modelo de turbulência

Já o método de baixo número de Reynolds requer uma malha bem refinada na zona próxima à parede. Armazenamento e tempo computacional são usualmente maiores. Ambos os métodos são disponíveis no Fluent 6.3.26.

Os valores calculados junto às paredes são cruciais para a determinação do problema em geral. Para isso, há uma expressão usada para determinar as propriedades do escoamento nessa região conhecida como a “Lei da Parede”.

A Lei da Parede é uma das mais famosas relações determinadas empiricamente em escoamentos turbulentos próximos a superfícies sólidas. Medidas mostram que, para ambos os escoamentos, internos e externos, a velocidade na linha da corrente no fluxo próximo à parede varia com o

logaritmo da distância da superfície. Este comportamento é conhecido como Lei de Parede.

A observação dos limites das camadas turbulentas com altos números de Reynolds revela uma descrição útil, aproximada da estatística turbulenta próxima à parede. Encontra-se que os efeitos da inércia do fluido e do gradiente de pressão são pequenos próximos à parede. Conseqüentemente, as estatísticas do escoamento próximas à superfície no limite de uma camada turbulenta são estabelecidas por dois mecanismos primários. O primeiro é a taxa na qual a quantidade de movimento é transferido à superfície, por unidade de área por unidade de tempo, que é igual ao tensor (*stress*) viscoso. O segundo mecanismo é a difusão molecular de quantidade de movimento, que desempenha um papel importante muito próximo à parede. Observações também indicam que os detalhes dos turbilhões distantes da superfície são de pequena importância às estatísticas do escoamento junto à parede.

A região próxima a superfície sólida pode ser dividida em três camadas distintas: a Subcamada Viscosa, Camada Logarítmica e na camada onde ocorre o escoamento turbulento cada uma com um perfil de velocidade característico, conforme apresentado na Figura 2.5.

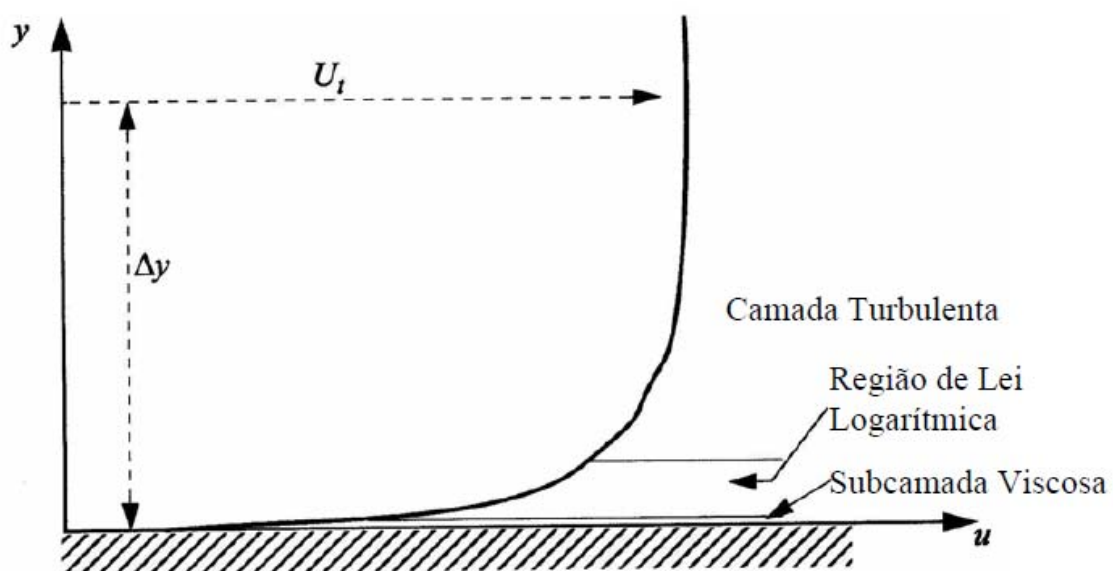


Figura 2.5 Região próxima a superfície sólida.



Na subcamada viscosa, o escoamento é quase laminar, e a viscosidade (molecular) tem grande importância na quantidade de movimento e transferência de calor. Na camada mais externa, chamada de camada completamente turbulenta, a turbulência tem maior importância. Finalmente, há uma região entre a subcamada viscosa e a camada completamente turbulenta onde os efeitos da viscosidade molecular e da turbulência possuem igual importância. A figura 2.5 ilustra estas subdivisões na região próxima à parede.

A relação logarítmica é dada por:

$$u^+ = \frac{u_t}{u_\tau} = \frac{1}{K} \ln(y^+) + C \quad (2.33)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau \Delta y}{\mu} \quad (2.34)$$

$$u_t = \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.35)$$

Onde  $u^+$  é a velocidade próxima à parede,  $u_\tau$  é a velocidade de fricção,  $u_t$  é a velocidade tangencial conhecida na parede a uma distância  $\Delta y$  da parede,  $y^+$  é a distância adimensional da parede,  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento na parede,  $K$  é a constante de Von Kármán e  $C$  é a constante da camada logarítmica dependente da rugosidade na parede.

No entanto, como a equação 2.33 tem o problema de tornar-se singular em pontos de separação (onde a velocidade próxima à parede,  $u_\tau$ , aproxima-se de zero), usa-se uma escala alternativa de velocidade -  $u^*$  - ao invés de  $u^+$  na região logarítmica:

$$u^* = C_\mu^{1/2} K^{1/2} \quad (2.36)$$

Esta escala tem a propriedade de não tornar-se nula se  $u_t$  tende a zero (em fluxos turbulentos, a energia cinética turbulenta nunca é completamente zero)  $u_t$  pode ser obtida da seguinte maneira:

$$u_t = \frac{u_\tau}{\frac{1}{K} \ln(y^*) + C} \quad (2.37)$$

O valor absoluto da tensão de cisalhamento da parede,  $\tau_w$ , é obtido de

$$\tau_w = \rho u^* u_\tau \quad (2.38)$$

Onde

$$y^* = \frac{\rho u^* \Delta y}{\mu} \quad (2.39)$$

Uma das maiores desvantagens deste procedimento é que as predições dependem da localização do ponto mais próximo da parede, e é sensível à malha junto à parede; refinar a malha não necessariamente dá uma solução única de maior precisão.

O problema de inconsistência na função de parede no caso de malhas finas pode ser solucionado com o uso de uma função de parede escalável (que pode ser aplicável em malhas arbitrariamente finas e permitindo realizar consistentemente o refino da malha independente do número de Reynolds da aplicação).

## 2.5 Malhas

A geração de malhas é citada freqüentemente como a parte mais importante e que consome maior tempo na análise de CFD. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise, independente do tipo de algoritmo usado para resolver as equações do escoamento. Adicionalmente, os códigos CFD serão mais robustos e eficientes ao usar uma malha bem construída.

Uma malha é a representação discreta de um domínio geométrico em um conjunto de subdomínios formado por triângulos ou quadriláteros em duas dimensões, e tetraedros e hexaedros em três dimensões. Em virtude destas características, as malhas são largamente empregadas em diversas áreas, como por exemplo, na modelagem de superfícies (topografia, geografia) e de volumes (geologia, geofísica), visando proporcionar representações mais compactas. Em simulações de processos físicos as malhas são essenciais para a solução de equações diferenciais parciais ao se empregar os métodos numéricos disponíveis em diversas aplicações das engenharias e da geologia. Dentre os modelos de malhas disponíveis destacam-se os modelos citados no trabalho de Vieira (2001), Oliveira (2005) Duarte (2006).

### **2.5.1 Malhas estruturadas**

Todos os elementos adicionados têm os mesmos formatos geométricos, produzindo assim, uma boa conectividade entre os elementos. A “conectividade” é identificada pela união de dois elementos pelo mesmo nó, ou seja, é o elemento na qual cada vértice, exceto nas bordas da malha, tem uma vizinhança local isomórfica.

As malhas estruturadas apresentam uma considerável vantagem sobre outros métodos por permitir ao usuário um alto grau de controle. Além disso, elementos quadriláteros e hexahédricos permitem ao usuário condensar pontos nas regiões de altos gradientes de fluxo de interesse e também gerar regiões menos densas quando for necessário.

Embora a topologia de elementos seja fixa, a grade pode ser modelada para sofrer alterações como torcer ou esticar. Geradores de malhas bem estruturadas utilizam equações elípticas sofisticadas para aperfeiçoar a forma da malha automaticamente buscando a uniformidade e ortogonalidade. Tempos de geração de malhas para casos de geometrias complexas são normalmente medidos em semanas até meses.

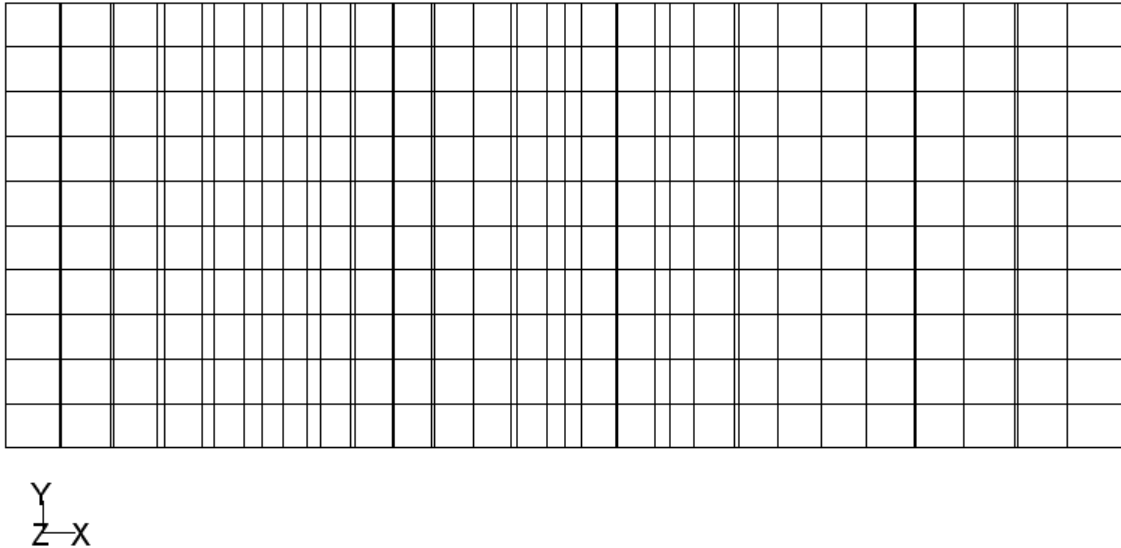


Figura 2.6 Malha estruturada

### 2.5.2 MALHAS NÃO ESTRUTURADAS

A malha é formada pela combinação de células triangulares e quadriláteras (ou tetraédricas e pirâmides em três dimensões), onde os pontos da malha não podem ser identificados com linha de coordenadas tal como ilustra a seguinte figura 2.8. Os métodos de malhas não-estruturadas utilizam uma coleção arbitrária de elementos para preencher o domínio. Como o arranjo de elementos não tem nenhum padrão discernível. Este tipo de grades geralmente utilizam triângulos em 2D e tetraedros em 3D. Como ocorrem com as malhas estruturadas, os elementos podem sofrer deformações para se ajustar ao domínio. Uma vez definido o domínio no qual se deve gerar a malha, pode-se adicionar triângulos automaticamente na superfície e tetraedros no volume com pouca contribuição do usuário. Isto é mais facilmente obtido devido à maior flexibilidade na conexão dos elementos de malhas.

A vantagem das malhas não estruturadas é que eles são muito automatizadas e requerem menos esforço e menos tempo para construção. A principal desvantagem de malhas não-estruturadas é a falta de controle do usuário sobre a disposição da malha. Notadamente, o usuário nestes casos se restringe a definir os limites e tamanho das células. Os elementos triangulares

e tetraédricos apresentam o problema de não se acomodarem bem às deformações do corpo (Simões 2005).

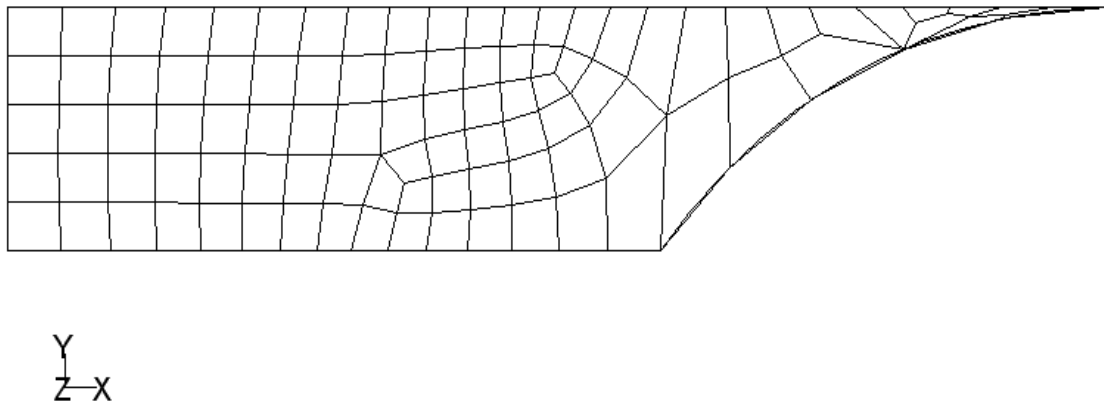


Figura 2.7 Malha não-estruturada

### 2.5.3 Malhas híbridas

A vantagem de métodos de malhas híbridas é a utilização das propriedades positivas de elementos de grade estruturadas nas regiões de mais detalhamento e de malhas não-estruturadas onde o perfil a ser analisado for de menor interesse. A habilidade para controlar a forma e distribuição de malhas localmente é uma ferramenta poderosa que pode render malhas excelentes e garantir resultados satisfatórios. As desvantagens dos métodos híbridos é que eles exigem muita prática e experiência na geração de malhas em corpos com geometrias complexas. Os métodos de malhas híbridas com frequência apresentam problemas de conexão nas malhas devido a geometrias complexas.

Este artifício, aliado ao sistema de coordenadas generalizadas, possibilita uma maior versatilidade do mapeamento do domínio físico completo, o qual se denomina de multibloco. A solução das malhas híbridas se dá interativamente, bloco a bloco, onde a transferência das informações é realizada pela superposição dos domínios (Maliska,2005).

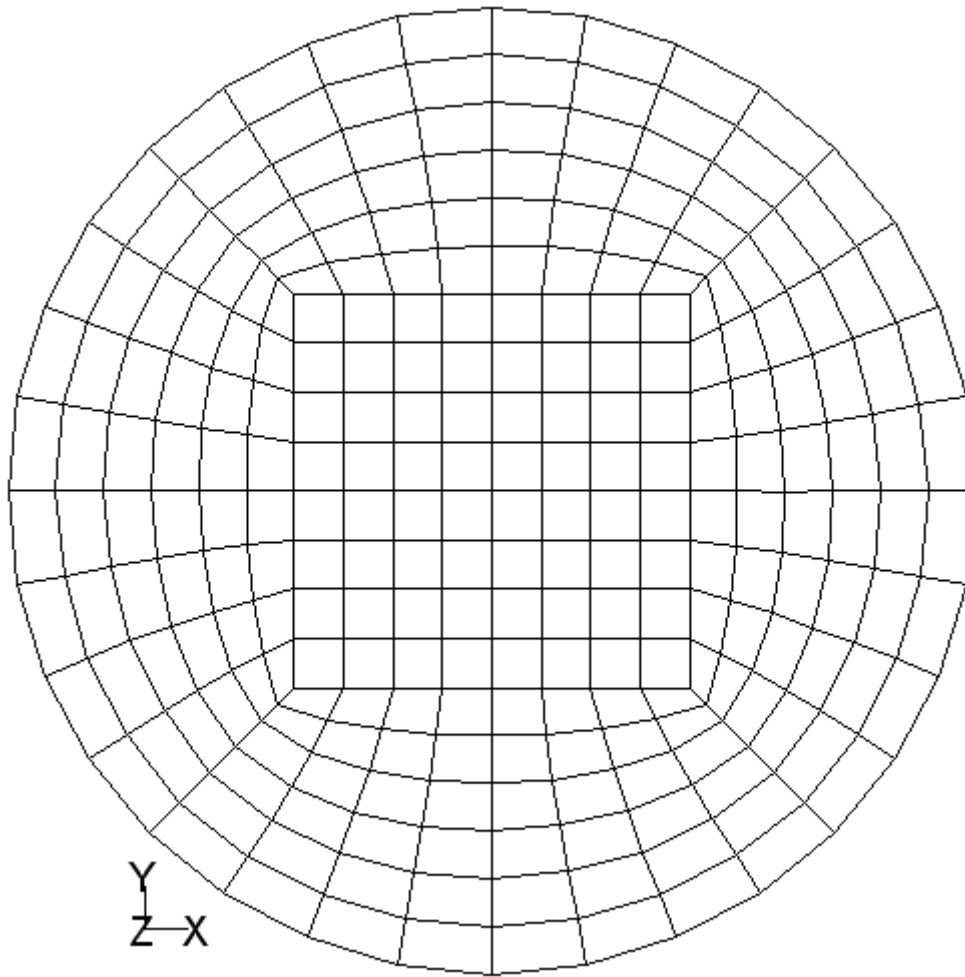


Figura 2.8 Malha Híbrida

## 2.6 Métodos numéricos

Escoamentos e fenômenos relacionados podem ser descritos por equações diferenciais parciais, que podem ser resolvidas analiticamente apenas para um número limitado de tipos de escoamentos. As soluções analíticas conhecidas são extremamente úteis na compreensão do escoamento fluido, mas raramente podem ser utilizadas diretamente em aplicações práticas. O método normalmente empregado é a utilização de simplificações das equações. Para obter uma solução aproximada numericamente, deve-se utilizar um método de discretização, que aproxima as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, que pode então ser resolvidas em um computador. As equações são aplicadas em domínios espaciais e/ou temporais

diminutos, tal que a solução numérica dê resultados em posições discretas no espaço e no tempo.

Para a simulação de um equipamento através da CFD, é necessária a elaboração de uma geometria que corresponda àquela que se deseja simular, determinar as condições de operacionais presentes no equipamento e calcular o problema. Para a primeira etapa neste trabalho, foi utilizado o pré - processador GAMBIT, para as outras etapas do processamento se utilizou o processador FLUENT.

Dentre os métodos numéricos disponíveis para a resolução de problemas de cálculo em engenharia existem métodos estabelecidos como o Método dos Elementos Finitos (FEM) e o Método dos Volumes Finitos (FVM). O Método dos Elementos Finitos é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. Foi originalmente desenvolvido para a solução de problemas de elasticidade e de análise estrutural na engenharia civil e aeronáutica. O Método dos Volumes Finitos também resolve numericamente sistemas de equações diferenciais parciais, baseado na resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento em um determinado volume de controle.

Nas simulações apresentadas neste trabalho, foi utilizado o método dos Volumes Finitos, que está implementado no pacote computacional FLUENT.

O método dos volumes finitos tem-se mostrado mais adequado do que outros métodos como diferenças finitas ou elementos finitos que tiveram grande divulgação na década de 70. Mas, mesmo com relação ao método dos volumes finitos, existiu alguma discussão em torno da possibilidade de obtenção de campos irrealis de pressão mesmo que satisfazendo a continuidade (Patankar, 1980). Entretanto, vários métodos foram propostos, os quais minimizavam este problema com o uso de malhas co-localizadas para escoamentos monofásicos.

### 2.6.1 Métodos dos volumes finitos

O Método dos Volumes Finitos é uma forma de discretização que usa como princípio a forma integral das equações de conservação. O domínio de solução é subdividido em um número finito de volumes de controle, e as equações de conservação são aplicadas a cada volume. No Método dos Volumes Finitos co-localizado, um nó computacional fica no centróide de cada volume de controle em que o valor de uma variável deve ser calculado. A interpolação é usada para expressar valores da variável na superfície do volume de controle em termos dos valores nodais. Integrais de superfície e de volume são aproximadas usando formulações apropriadas. Como resultado, obtém-se um sistema de equações algébricas para cada obtenção dos valores de uma variável em todos os volumes de controle (Duarte, 2006)

O Método dos Volumes Finitos é conservativo por natureza, uma vez que integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) são as mesmas para volumes de controle que compartilham a mesma face.

Todos os termos que precisam ser aproximados possuem significados físicos. A Figura 2.9 mostra a representação de um volume de controle (nomeado P), e a nomenclatura dos pontos nodais vizinhos – W, E, S e N para malhas bidimensionais.





As equações a serem resolvidas têm a mesma forma geral apresentada pela seguinte equação:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{Termo transiente}} + \underbrace{\Delta \cdot (\rho \vec{U} \phi)}_{\text{Termo convectivo}} - \underbrace{\Delta \cdot (\Gamma \Delta \phi)}_{\text{Termo difusivo}} = \underbrace{S}_{\text{Termo fonte}} \quad (2.40)$$

Onde:

$\rho$  : é massa específica

$\phi$  : propriedade.

$\Gamma$  : termo difusivo,

$S$  : termo fonte,

Integrando a equação anterior sobre os volumes de controle, se obtém:

$$\underbrace{\int \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{Termo transiente}} + \underbrace{\int \rho \phi \vec{U} \cdot \vec{n} dA}_{\text{Termo convectivo}} - \underbrace{\int \Gamma \Delta \phi \cdot \vec{n} dA}_{\text{Ter. difusivo}} = \underbrace{\int S dV}_{\text{Ter. fonte}} \quad (2.41)$$

Cada termo proveniente da integração da equação 4.1 é discretizado no espaço usando-se, por exemplo, uma diferenciação central de segunda ordem (Patankar, 1980).

### 2.6.2 Esquema de interpolação

Na literatura existe uma grande quantidade de informação sobre os esquemas de interpolação tradicionais e os esquemas numéricos de alta ordem para a interpolação (usados para definir as variáveis nas faces dos volumes de controle). As referências mais citadas incluem Patankar (1980), Maliska (1995), Versteeg e Malalasekera (1995).

O tratamento dos termos convectivos determina a precisão das soluções dos modelos das equações. Estes termos são difíceis de tratar porque

sistemas com muita complexidade tendem a ser menos robustos ou mais lentos.

Para calcular os fluxos difusivos e convectivos, o valor de  $\phi$  e de seus gradientes normais às faces da célula são necessários. Eles devem ser expressos em termos dos valores nodais existentes  $\phi_L$ , e para isso existem diversos métodos de interpolação.

### **Interpolação por diferenças centrais (CDS)**

É um possível esquema utilizado para determinar os valores de  $\phi$  no centro das faces do volume de controle é a interpolação linear entre dois nós adjacentes (chamado de *central differencing scheme*). No ponto  $e$  da malha Cartesiana têm-se:

$$\Phi_e = \Phi_E \xi_e + \Phi_P (1 - \xi_e) \quad (2.42)$$

Onde os índices  $e$  e  $E$  referem-se aos pontos localizados sobre a interface e o centro do volume de controle posicionado à esquerda do volume de controle que está sendo calculado (P); o fator de interpolação linear  $\xi_e$  é definido como:

$$\xi_e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \quad (2.43)$$

Para o caso especial onde as faces do volume de controle encontram-se no meio da distancia entre os pontos nodais, têm-se  $\Phi_e = \frac{\Phi_E + \Phi_P}{2}$ .

A suposição de um perfil linear entre os nós P e E também oferece a aproximação mais simples do gradiente:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_e \approx \frac{\Phi_E - \Phi_P}{x_E - x_P} \quad (2.44)$$

Este é o método de segunda ordem mais simples, e também o mais utilizado.

### Interpolação upwind (uds)

É outro método bastante utilizado consiste em aproximar  $\Phi_e$  por seu valor no nó à montante da face  $f$  (o volume depende da direção do escoamento); esta aproximação é chamada de *upwind differencing scheme* (UDS). Terão sempre os coeficientes positivos na equação discretizada, isto resolve o problema de estabilidade, introduz um problema de precisão. Nesse esquema, estão,  $\Phi_e$  é aproximado como:

$$\Phi_e = \begin{cases} \Phi_P & \text{se } (um)_f > 0 \\ \Phi_E & \text{se } (um)_f < 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

Esta é a única aproximação que não gera resultados oscilatórios incondicionalmente. Entretanto, é numericamente difusivo; picos ou variações rápidas são amortecidas e, desde que este é um esquema de primeira ordem, são necessárias malhas refinadas para a obtenção de soluções precisas.

### Interpolação higher-order upwind

Este é um esquema do tipo *upwind*, com precisão de segunda ordem devido à extrapolação de uma face em dois pontos; assim,  $\Phi_w$  é dado por:

$$\Phi_w = \frac{3}{2}\Phi_w - \frac{1}{2}\Phi_{ww} \quad (2.46)$$

Onde  $w$  refere-se ao centro do volume de controle posicionado à direita do volume de controle que está sendo calculado;  $ww$  posicionado dois volumes de controle à direita;

Este esquema é menos compacto que o anterior pela presença do termo  $\Phi_{ww}$ , que dá a maior precisão ao método.

### 2.6.3 Algoritmos de resolução de sistemas lineares

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

O sistema de equações pode, depois de estar determinado, ser resolvido através de dois procedimentos: de forma direta ou de forma iterativa. Nos métodos diretos, necessita-se fazer a inversão da matriz completa; por isso, requerem o uso dos elementos de todos os elementos da matriz de coeficientes (inclusive os elementos nulos), influenciando bastante na taxa de convergência do método.

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

Após  $i$  iterações, têm-se uma solução aproximada  $\Phi^i$  que satisfaz o sistema de equações aproximadas (com um resíduo nulo  $\mathcal{R}$ ):

$$\mathcal{A}\Phi^i = \Phi - \mathcal{R}^i \quad (2.47)$$

Assim, a cada iteração, têm-se um erro de convergência

$$\varepsilon^i = \Phi - \Phi^i \quad (2.48)$$

Onde  $\Phi$  é a solução exata. O resíduo é então:

$$\mathcal{A}\varepsilon^i = \mathcal{R}^i \quad (2.49)$$

Ao longo de um processo iterativo,  $\mathcal{R}$  e  $\mathcal{E}$  tendem a zero. Considere um esquema iterativo, escrito na seguinte forma:

$$\mathcal{M}\Phi^{i+1} = \mathcal{N}\Phi_i + \mathcal{B} \quad (2.50)$$

Na convergência,  $\Phi^{i+1} = \Phi^i = \Phi$ , obtendo-se

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{A} &= \mathcal{M} - \mathcal{N} \\ \mathcal{B} &= \mathcal{Q} \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

O método de Jacobi: é o mais simples, onde  $\mathcal{M}$  é a matriz diagonal cujos elementos são os elementos da diagonal de  $\mathcal{A}$ . Cada variável é determinada, assim, a partir dos valores já calculados para os seus vizinhos:

$$\Phi_p^{i+1} = \frac{S_p - \sum_L a_L \Phi_L^i}{a_p} \quad (2.52)$$

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

Na versão SOR (*Successive Over-Relaxation*) do método de Gauss-Seidel, a convergência é acelerada fazendo-se com que no somatório  $\sum_L a_L \Phi_L^i$  presente na equação, os valores de  $\Phi_L$  sejam tomados como  $\Phi_p^{i+1}$ , se estes forem disponíveis.

#### 2.6.4 Código FLUENT

O FLUENT resolve na forma linearizada o sistema de equações de transporte discretizadas, utilizando um algoritmo de resolução do tipo Gauss-Seidel ponto-a-ponto, em conjunto com o método algébrico de malhas múltiplas. Os termos difusivos das equações são discretizadas pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem (Mei, 1999).

Na simulação do caso ciclone os termos convectivos nas faces dos volumes de controle foram interpolados pelo esquema QUICK de terceira ordem. A pressão nas faces dos volumes de controle foram obtidas mediante o esquema PRESTO (PREssure STaggering Option) que utiliza uma malha deslocada para calcular a pressão nas faces dos volumes de controle.

O FLUENT apresenta três tipos de algoritmos para a resolução do sistema de equações:

1. Segregado “SEGREGATED”;
2. Acoplado implícito “COUPLED IMPLICIT” e
3. Acoplado explícito “COUPLED EXPLICIT”.

Todas estas formulações podem proporcionar resultados precisos para uma grande variedade de fluidos, mas em alguns casos um tipo é melhor do que outro. As diferenças entre o modo SEGREGATED e o COUPLED estão na maneira em que as equações são resolvidas. Os algoritmos SEGREGATED resolvem as equações de maneira seqüencial (segregadas umas das outras), e o algoritmo COUPLED resolve de maneira simultânea. A Figura 2.10 apresenta de maneira esquemática dois tipos de algoritmos presentes no FLUENT.

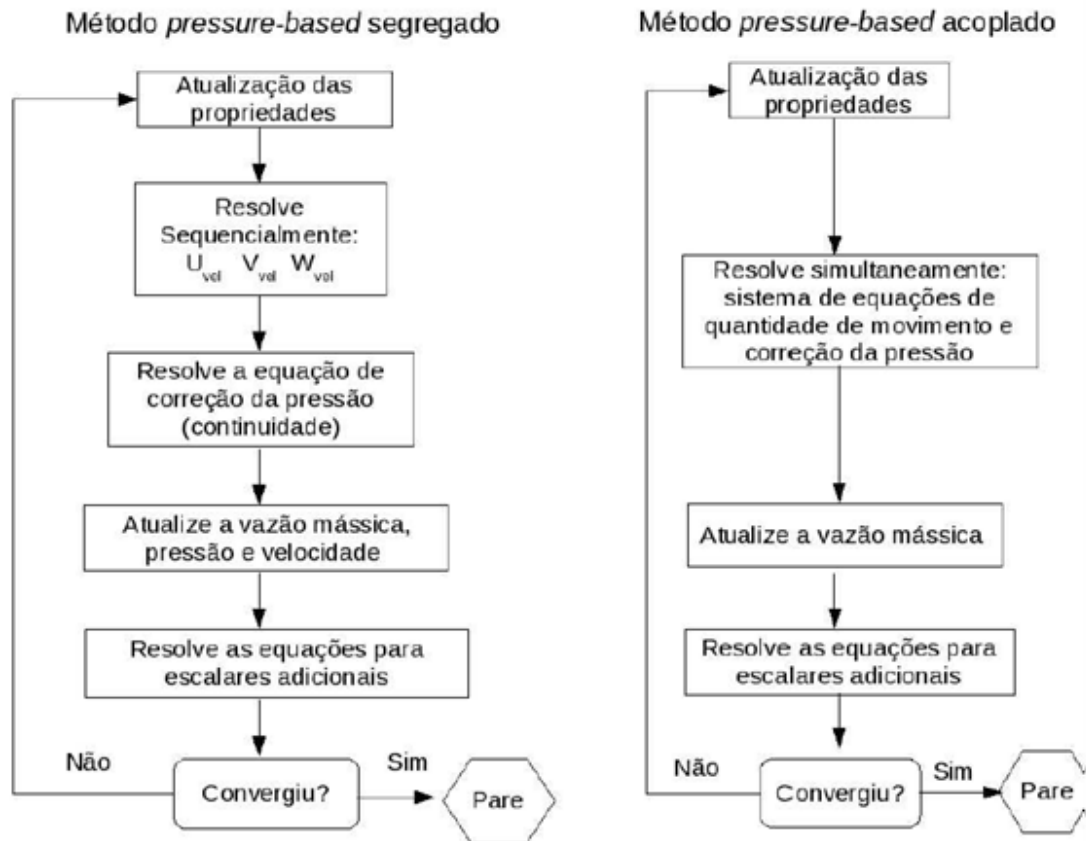


Figura 2.10 Resumo dos métodos de solução do método pressure-based (Manual do Fluent).

### Método Pressure-Based Solver

O método pressure-based solver emprega um algoritmo que pertence aos métodos de projeção (Manual do Fluent). No método de projeção, a restrição de conservação da massa (equação da continuidade) para os campos de velocidade é alcançada resolvendo uma equação para pressão (ou pressão corrigida). A equação para pressão é derivada das equações da continuidade e quantidade de movimento de tal forma que os campos de velocidade, corrigidos pela pressão, satisfaçam a continuidade. Uma vez que as equações governantes são não lineares e acopladas entre si, o processo de solução é iterativo de modo que o conjunto das equações governantes é resolvido repetidamente, até que a solução convirja.



### **Algoritmo *pressure-based* segregado**

No algoritmo segregado as equações governantes para as variáveis de solução (por exemplo,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ,  $T$ , etc.) são resolvidas uma após a outra. Cada equação governante, enquanto está sendo resolvida, é desacoplada ou segregada das outras equações, daí o nome. O algoritmo segregado é eficiente em termos de memória, uma vez que as equações discretizadas só precisam ser guardadas uma de cada vez na memória. No entanto, a solução convergente é relativamente lenta. Com o algoritmo segregado, cada iteração consiste em um passo (figura 2.10), os passos são repetidos até que os critérios de convergência sejam encontrados.

### **Algoritmo *pressure-based* acoplado**

No algoritmo *pressure-based* acoplado, os passos 2 e 3 da solução segregada são substituídos por um único passo em que o sistema de equações acopladas é resolvido. As equações restantes são resolvidas de uma forma separada como no algoritmo segregado.

Uma vez que as equações de quantidade de movimento e a continuidade são resolvidas de maneira acoplada, a taxa de convergência da solução melhora significativamente quando comparadas com o algoritmo segregado. No entanto, a exigência de memória aumenta de 1,5 a 2 vezes em relação a do algoritmo segregado, isto ocorre porque o sistema discreto de todas as equações da quantidade de movimento e da continuidade baseada na pressão devem ser armazenados quando os campos de velocidade e pressão são resolvidos (em vez de uma única equação, como é o caso do algoritmo segregado) (manual do Fluent).

As duas aproximações são aplicáveis a todos os tipos de fluidos desde os incompressíveis até os fortemente compressíveis, mas o método de formulação *SEGREGATED* normalmente é utilizado para fluxos incompressíveis e o algoritmo *COUPLED* pode proporcionar um melhor desempenho para fluxos de alta velocidade compressíveis.

### **Algoritmos adicionais usados na simulação do ciclone:**

Na etapa do pós-processamento foi necessário incluir e/ou adicionar alguns algoritmos, foram utilizados dois tipos de funções a mais:

- Adição da função *adaption* para refino das malhas;
- Adição de um algoritmo fazendo uso da função UDF (*User Defined Function*) para a condição de contorno referente ao choque de uma partícula com uma parede.

### **Função ADAPTION**

Foi utilizada uma malha do tipo híbrida (mistura: estruturado e não estruturado), do tipo uniforme na direção axial e radial.

Os resultados da queda de pressão serviram para realizar a avaliação das malhas nos nove ciclones simulados. A função *adaption* que faz uso da lei da parede refinou a malha nas regiões onde o modelo precisava realizar mais cálculos.

### **Função UDF**

Esta função utiliza um dos recursos adicionais do programa FLUENT, a função a ser definida pelo usuário UDF (*User Defined Function*). Um programa gerado pelo usuário utilizando variáveis calculadas e definidas na linguagem C ++, e acoplado ao programa principal. Esta função permite que o usuário inclua determinadas características específicas de seu problema.

Utilizou-se a sub-rotina para cálculo da eficiência de coleta nas paredes da caixa coletora, do cone e do cilindro. O programa permite calcular as energias cinéticas de superfície envolvidas em cada colisão entre uma partícula e uma superfície que no caso do ciclone seria a parede interna.

O programa implementado foi baseado nos trabalhos apresentados por: Zhang et al. (2005) e Seville et al.,(1997) onde implementaram uma condição de contorno clássica, conhecida como condição da “velocidade crítica”. Através de um balanço de energia para a interação partícula-parede, envolvendo a energia cinética da partícula e a energia de atração entre as superfícies da partícula e da parede, uma velocidade crítica pode ser determinada, abaixo da

qual a partícula fica aprisionada. Uma variante mais simples desta abordagem foi utilizada por Swanson et al. (1996), em que uma probabilidade de adesão era estabelecida. Em cada choque, um número randômico era gerado, e, caso tal número fosse menor do que a probabilidade de adesão, a partícula era aprisionada.

Tabela 2.1 Constantes usadas na elaboração do algoritmo acoplado no UDF

Diâmetro da partícula	1,33 $\mu m$
Densidade da partícula	3030 Kg/m <sup>3</sup>
Raio de Poisson para a partícula	0,32
Raio de Poisson para a parede	0,183
Modulo de Young para a partícula	3.096x10 <sup>5</sup> MPa
Modulo de Young para a parede	1.08x10 <sup>5</sup> Mpa

## CAPITULO 3

# METODOLOGIA

A Metodologia empregada no desenvolvimento das simulações é mostrada esquematicamente na Figura 3.1. A metodologia foi dividida em três etapas.

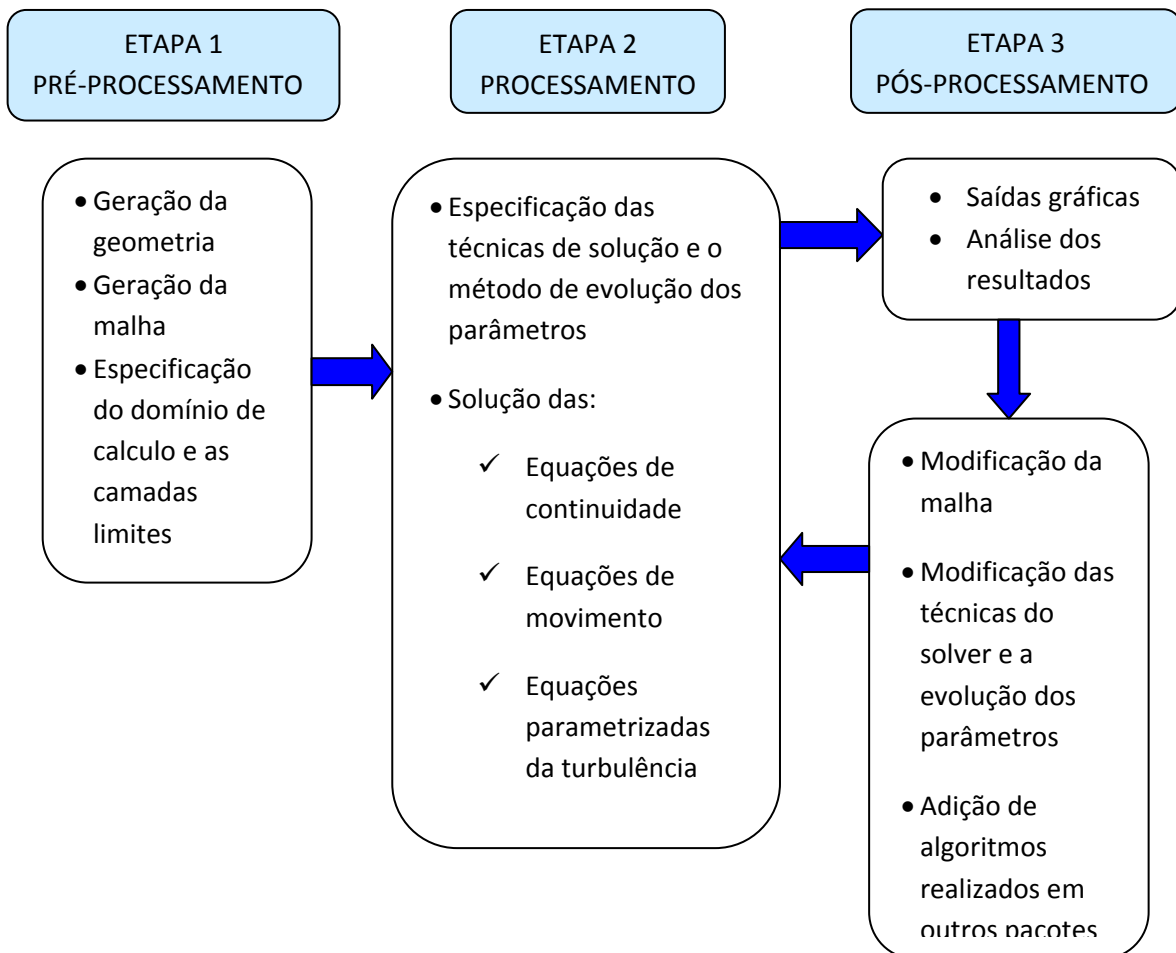


Figura 3.1. Representação esquemática da metodologia empregada na simulação do ciclone.

### 3.1. Pré-processamento

#### 3.1.1. Criação da geometria

O ciclone é um dispositivo constituído basicamente do acoplamento de superfícies: uma cônica e uma cilíndrica. A parte cilíndrica tem anexado um duto de alimentação. Este duto de alimentação é de seção retangular e está unido ao cilindro em forma tangencial.

No esquema do ciclone figura 3.2, as letras representam:

- Dc: Diâmetro do ciclone.
- De: Diâmetro do duto de saída do gás (*vortex*).
- L: Altura do *finder*.
- h: altura da parte cilíndrica.
- H: somatória das alturas do cilindro e cônica.
- S: Diâmetro da parte inferior do cone.
- A: Altura da entrada.
- B: Largura da entrada.
- C: altura do coletor de pó.
- Z: Altura do cone.

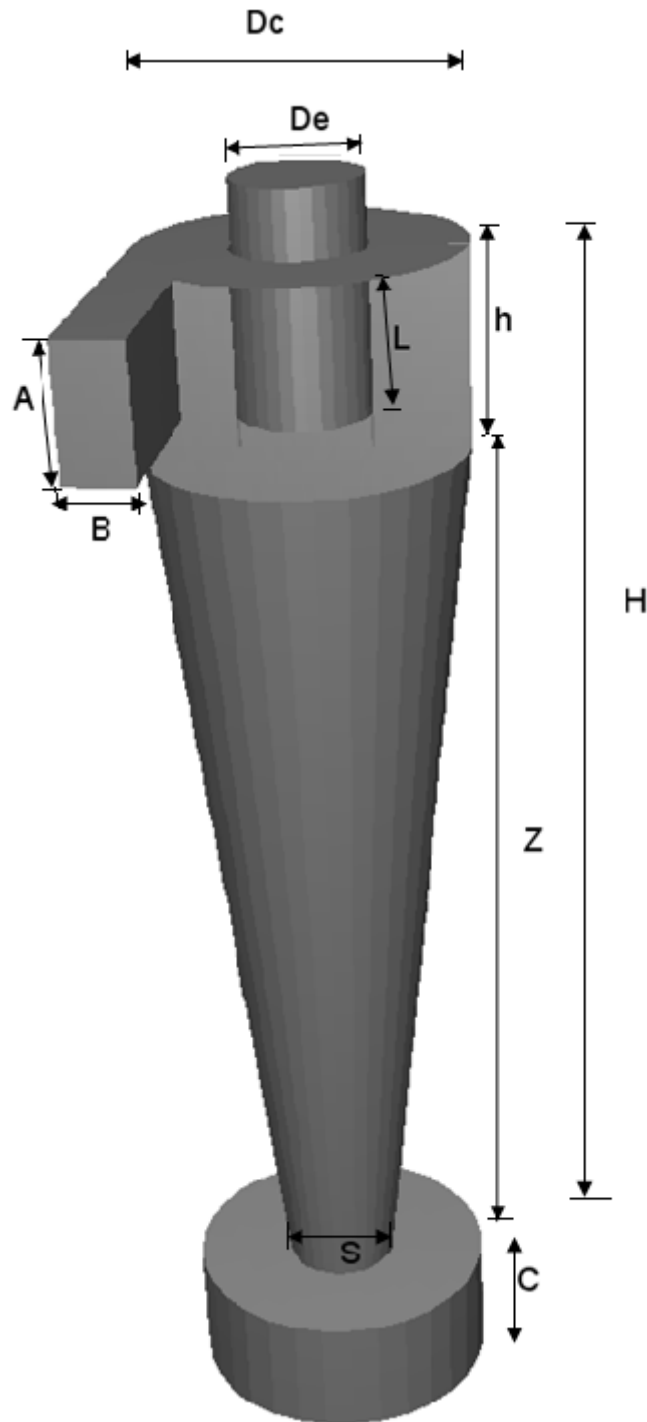


Figura 3.2. Esquema de um Ciclone.

Nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 são mostrados as geometrias dos ciclones que foram simulados com base nos dados fornecidos na dissertação de Scarpa (2000). Na Tabela 3.1 encontram-se as dimensões características dos ciclones a serem analisados.

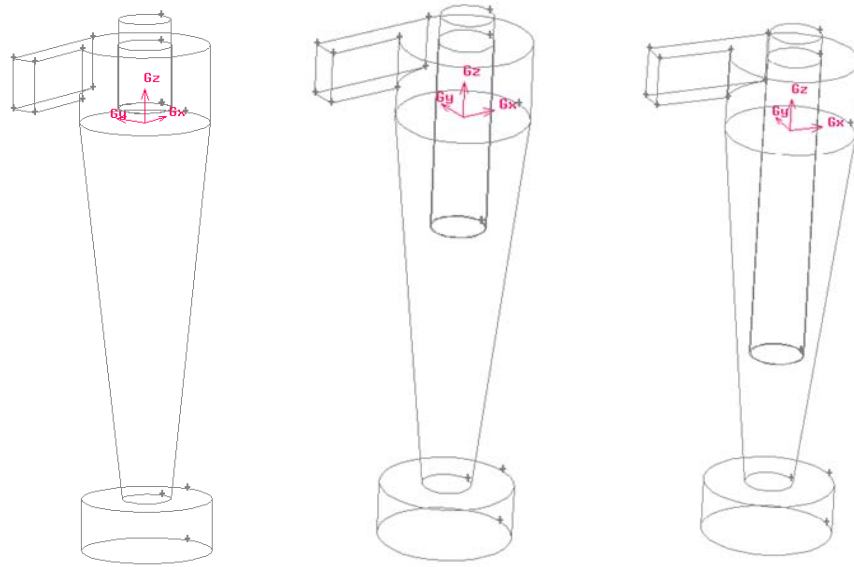


Figura 3.3. Ciclones 1, 2 e 3 (Grupo 1), caracterizados por  $Z/h \gg 1$ .

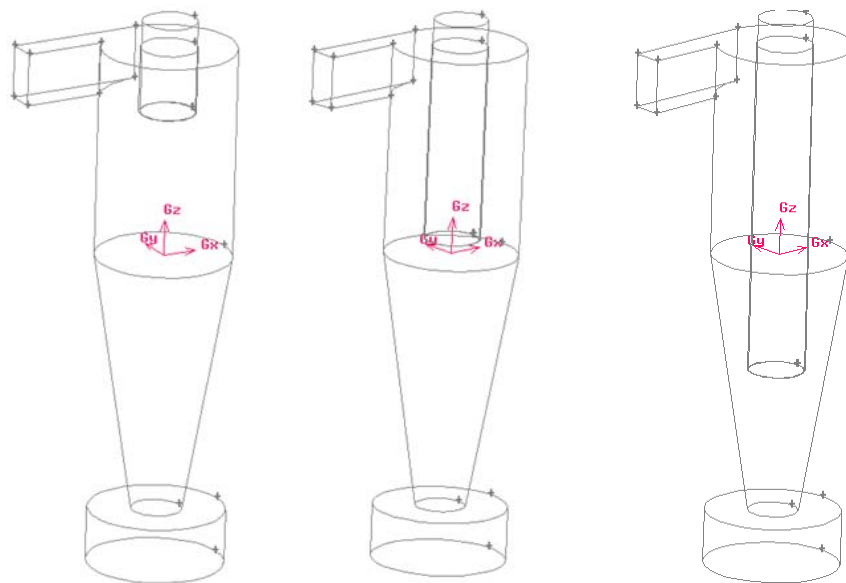


Figura 3.4. Ciclones 4, 5 e 6 (Grupo 2), caracterizados por  $Z/h \approx 1$ .

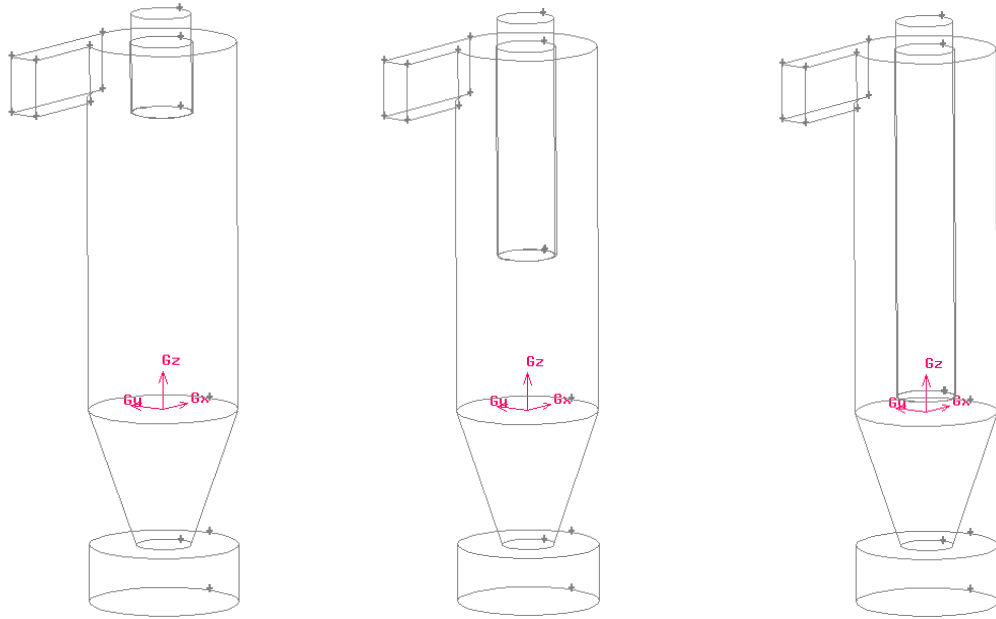


Figura 3.5. Ciclones 7, 8 e 9 (Grupo 3), caracterizados por  $Z/h \ll 1$ .

Os nove ciclones estão agrupados em três grupos da seguinte maneira:

**Primeiro Grupo:** Os ciclones 1, 2 e 3. Têm a mesma altura na parte cilíndrica ( $h = 0,15$  m) e na parte cônica ( $Z = 0,725$  m). O que varia em cada um deles é a altura do duto de saída de ar ( $L$ ):  $L_1 = 0,122$  m;  $L_2 = 0,367$  m;  $L_3 = 0,612$  m.

**Segundo Grupo:** Os ciclones 4, 5 e 6. Os três têm a mesma altura na parte cilíndrica ( $h = 0,395$  m) e na superfície cônica a altura é  $Z = 0,48$  m. O valor da altura do duto de saída varia nos três ciclones na mesma porção que o primeiro grupo.  $L_1 = 0,122$  m;  $L_2 = 0,367$  m;  $L_3 = 0,612$  m.

**Terceiro Grupo:** Os ciclones 7, 8 e 9. Os três ciclones têm a mesma altura na superfície cilíndrica ( $h = 0,64$  m); e a altura na superfície cônica é  $Z = 0,235$  m). O valor da altura do duto de saída de ar varia em cada um deles na mesma proporção que os dois grupos anteriores.  $L_1 = 0,122$  m;  $L_2 = 0,367$  m;  $L_3 = 0,612$  m.



Tabela 3.1 Dimensões dos ciclones simulados. Todas as medidas estão em metros (m).

Dimensão	Grupo I			Grupo II			Grupo III		
	Ciclone 1	Ciclone 2	Ciclone 3	Ciclone 4	Ciclone 5	Ciclone 6	Ciclone 7	Ciclone 8	Ciclone 9
Dc	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245	0,245
De	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
L	0,122	0,367	0,612	0,122	0,367	0,612	0,122	0,367	0,612
h	0,150	0,150	0,150	0,395	0,395	0,395	0,640	0,640	0,640
H	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
S	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
A	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
B	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051
C	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Z	0,725	0,725	0,725	0,480	0,480	0,480	0,235	0,235	0,235

A geometria foi gerada para representar o domínio de estudo, em um espaço tridimensional, utilizando o software GAMBIT versão 2.4.6. Foram geradas superfícies cilíndricas, cônica, e retangulares e logo depois estas foram unidas tal como mostra a figura 3.6

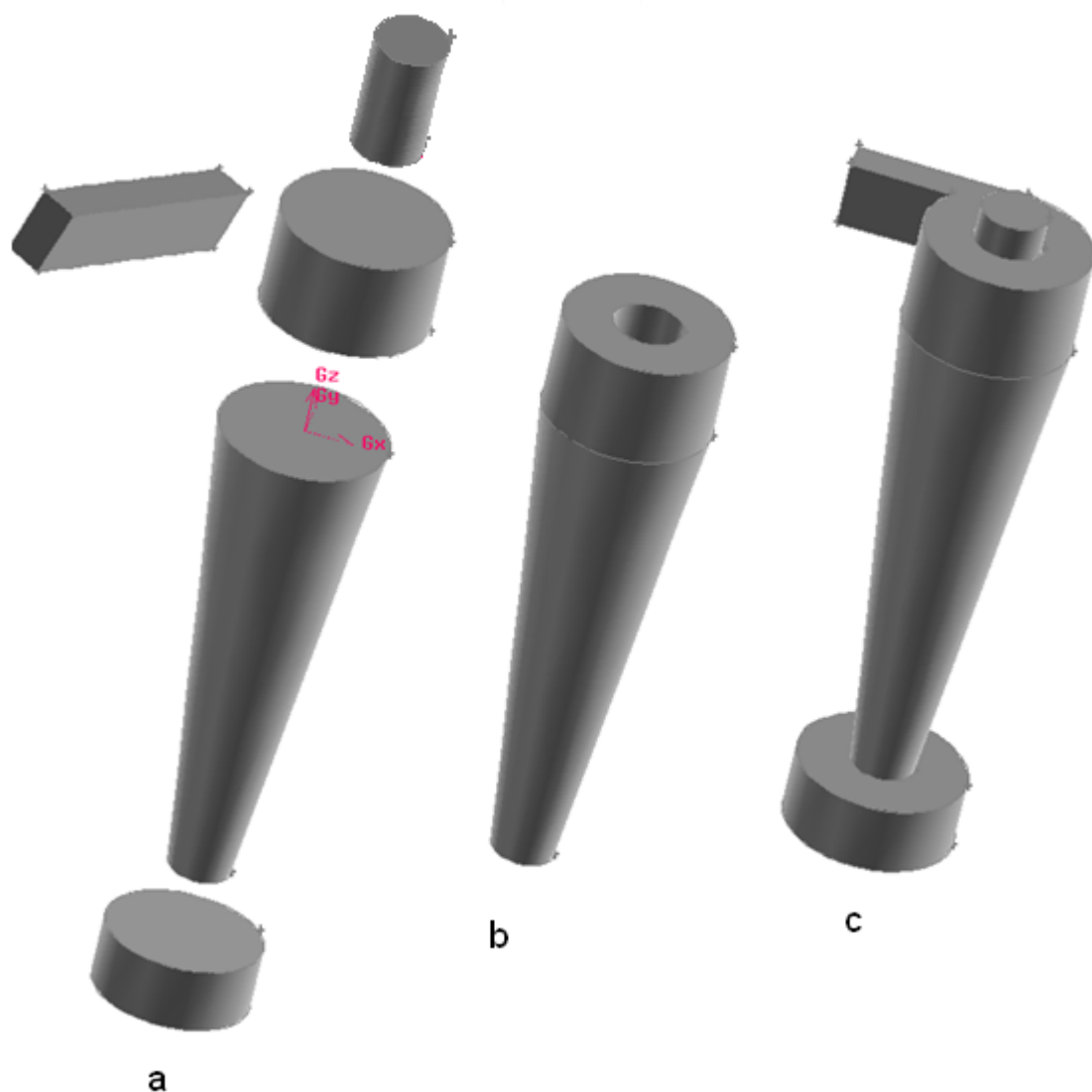


Figura 3.6. Sequência de elaboração da geometria (a) criação das superfícies separadas (b) união do cone com o cilindro (c) união de todas as superfícies criadas.

Uma vez elaborada a geometria o ciclone foi subdividido em vários blocos menores fazendo uso da função SPLIT VOLUME no software GAMBIT, nestes blocos foram elaboradas as malhas. Cada um dos ciclones foi dividido em 13 blocos ou subdomínios, segundo as Figuras 3.7 à 3.10.

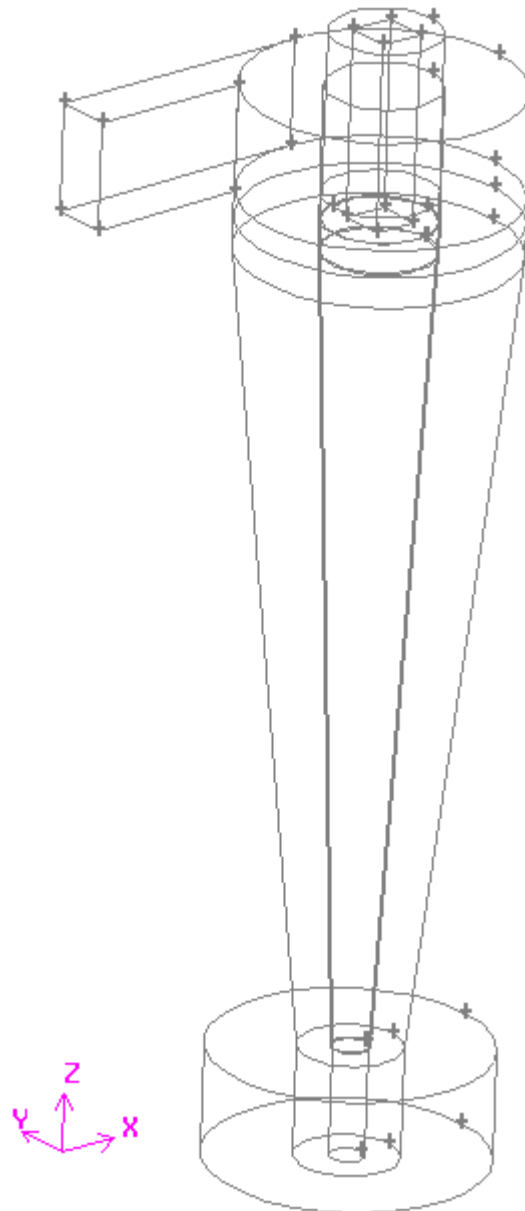


Figura 3.7. Ciclone dividido em blocos.

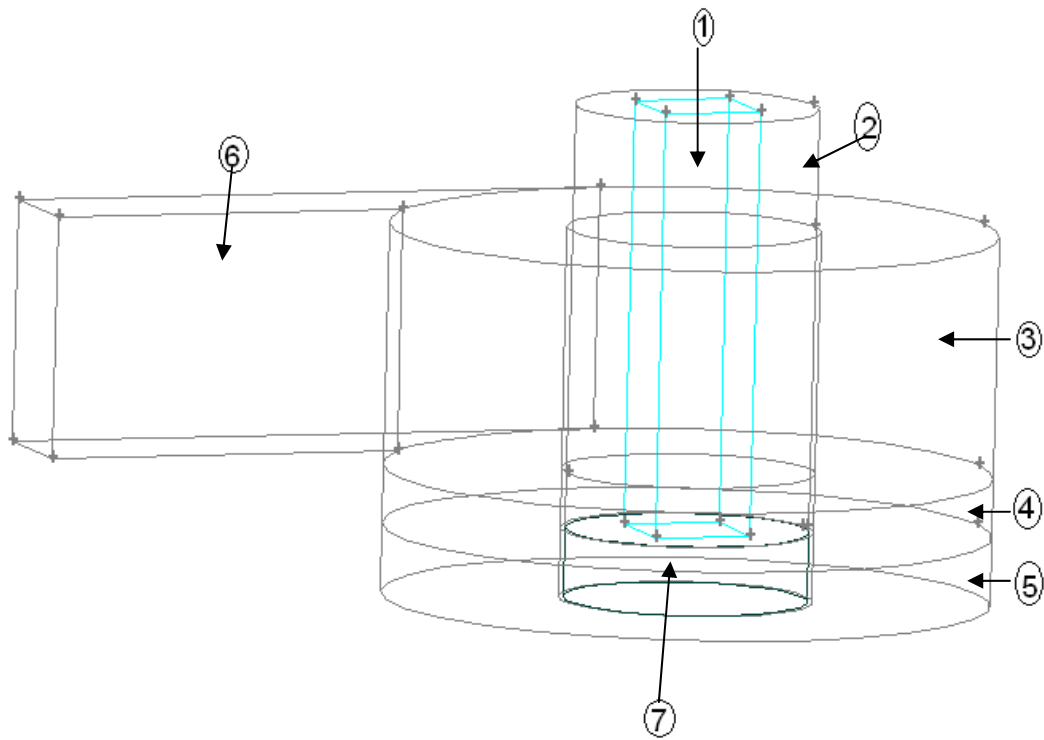


Figura 3.8. Parte superior cilíndrica do ciclone dividido em subdomínios.

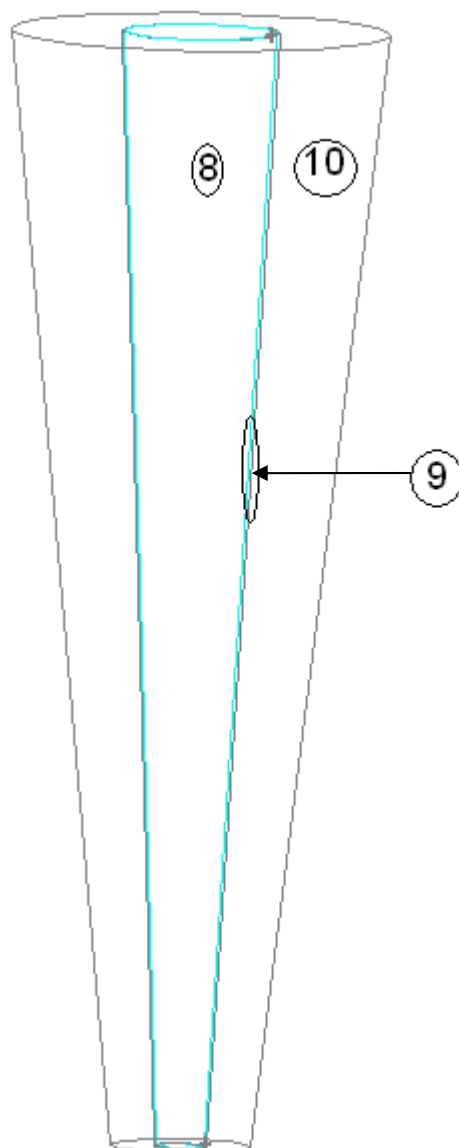


Figura 3.9. Parte inferior cônica do ciclone dividido em subdomínios.

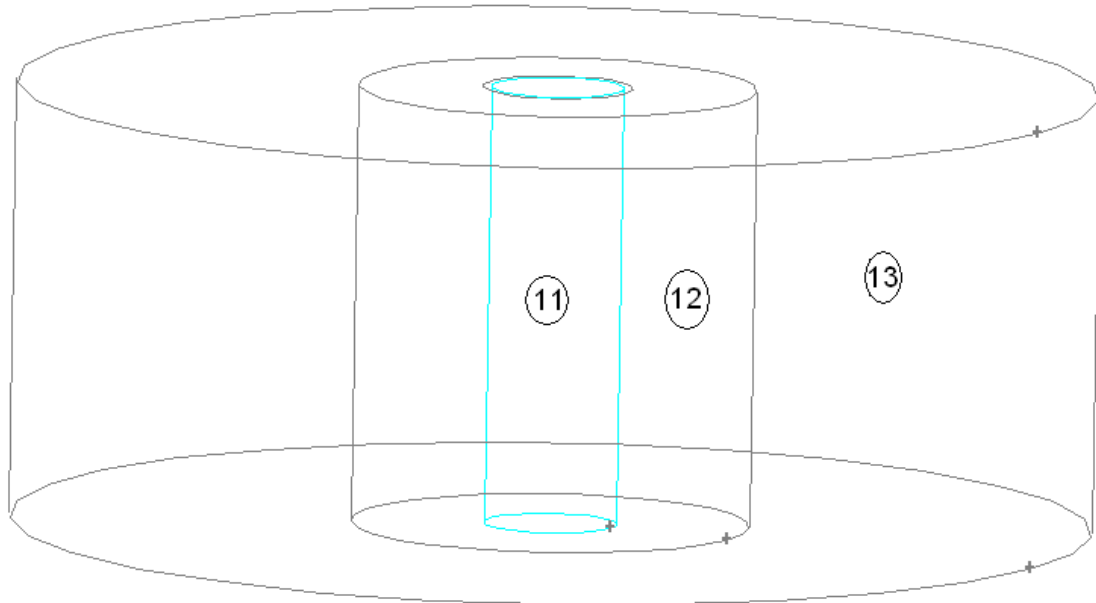


Figura 3.10. Parte inferior cilíndrica do ciclone dividido em volumes de controle.

### 3.1.2 Criação da malha

Uma vez pronta a geometria se procedeu a criar as malhas. A precisão da simulação numérica do ciclone é função da qualidade da malha. De fato, a malha representa o domínio de cálculo onde as equações de Navier-Stokes discretizadas serão resolvidas numericamente; a definição dela é, portanto, tão importante quanto o algoritmo de resolução. Os pontos de cálculo sucessivos devem imperativamente estar próximos, onde as propriedades locais do escoamento variam rapidamente. De outro lado, para regiões com propriedades quase uniformes, os pontos podem estar espaçados. A malha deve ficar refinada dentro do ciclone e particularmente perto das paredes nas superfícies cônicas e cilíndricas onde teoricamente, há fortes gradientes de velocidade, queda de pressão e captura do material particulado.

No GAMBIT a elaboração das malhas foi realizada bloco a bloco na seguinte ordem: duto de saída do ar, parte cilíndrica, cone, caixa coletora de pó e finalmente no duto de entrada tangencial do ar e pó. A malha do ciclone pode ser visualizada em toda a superfície tal como se mostra a Figura 3.11.

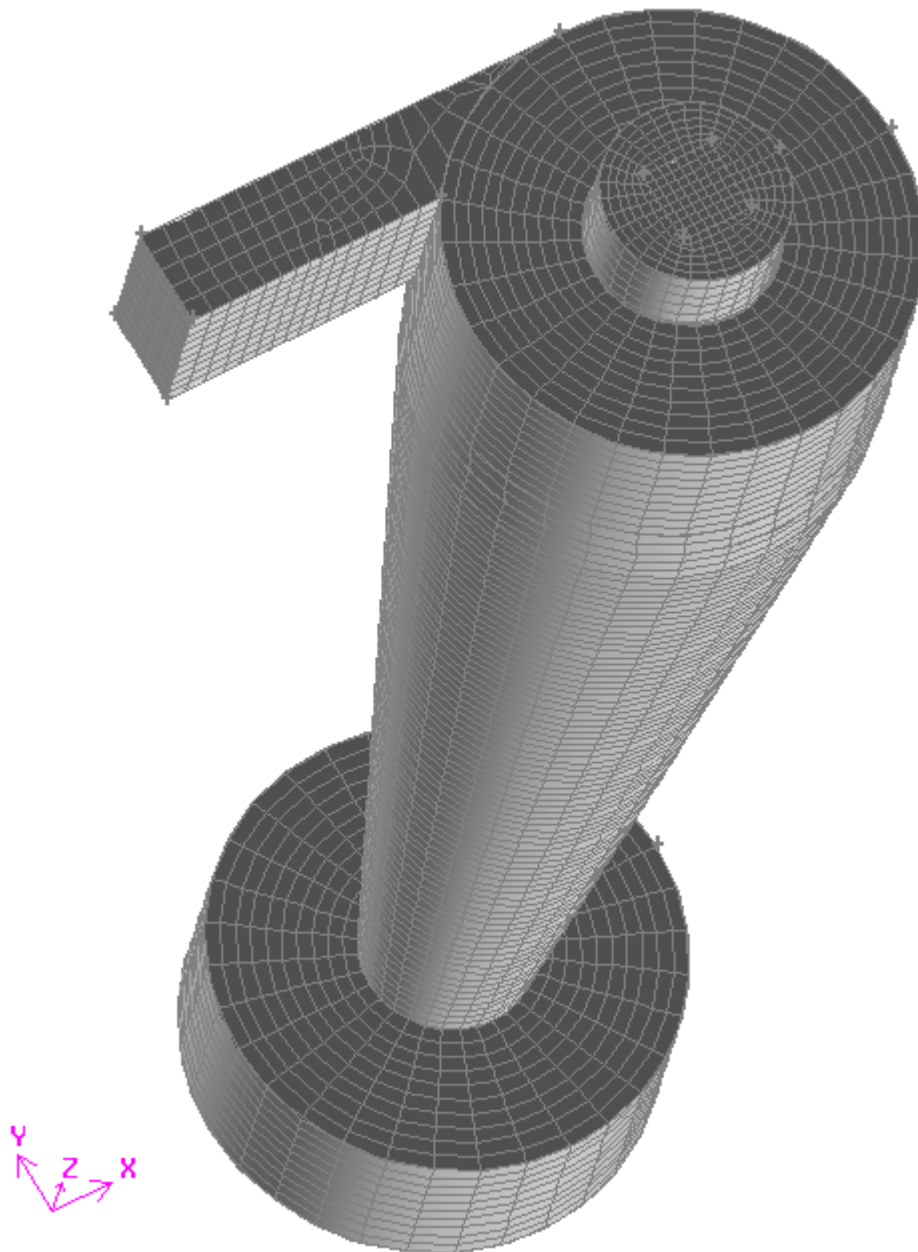


Figura 3.11 Malha Gerada no Ciclone.

O tipo de malha em 2D foi QUAD/MAP e em 3D HEX/COOPER. A densidade das malhas elaboradas é constante e estão em função do comprimento do volume de controle (do bloco) e do raio do ciclone. A quantidade de células obtidas na etapa do pré-processamento no GAMBIT está mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Quantidade de células geradas no GAMBIT.

Número do Ciclone	Quantidade de células geradas no GAMBIT
Ciclone 1	64514
Ciclone 2	63800
Ciclone 3	67378
Ciclone 4	62498
Ciclone 5	63810
Ciclone 6	63010
Ciclone 7	64610
Ciclone 8	63810
Ciclone 9	63042

### 3.1.3. Definição das fronteiras

Para completar a etapa de pré-processamento é necessário definir as superfícies correspondentes às fronteiras do ciclone. Fazendo uso da função “*specify boundary types*” no software GAMBIT 2.4, se especificou o tipo de superfície da seguinte maneira (ver Figura 3.12):

- *Velocity inlet*: Implementa uma condição de fluxo a partir de um valor atribuído ao vetor velocidade.
- *Pressure outlet*: Permite definir a condição de pressão na fronteira.
- *Wall*: Define uma condição de contorno de não deslizamento, ou seja, velocidade nula, sobre a(s) fronteira(s), que não foram automaticamente definidas como parede (*wall*).



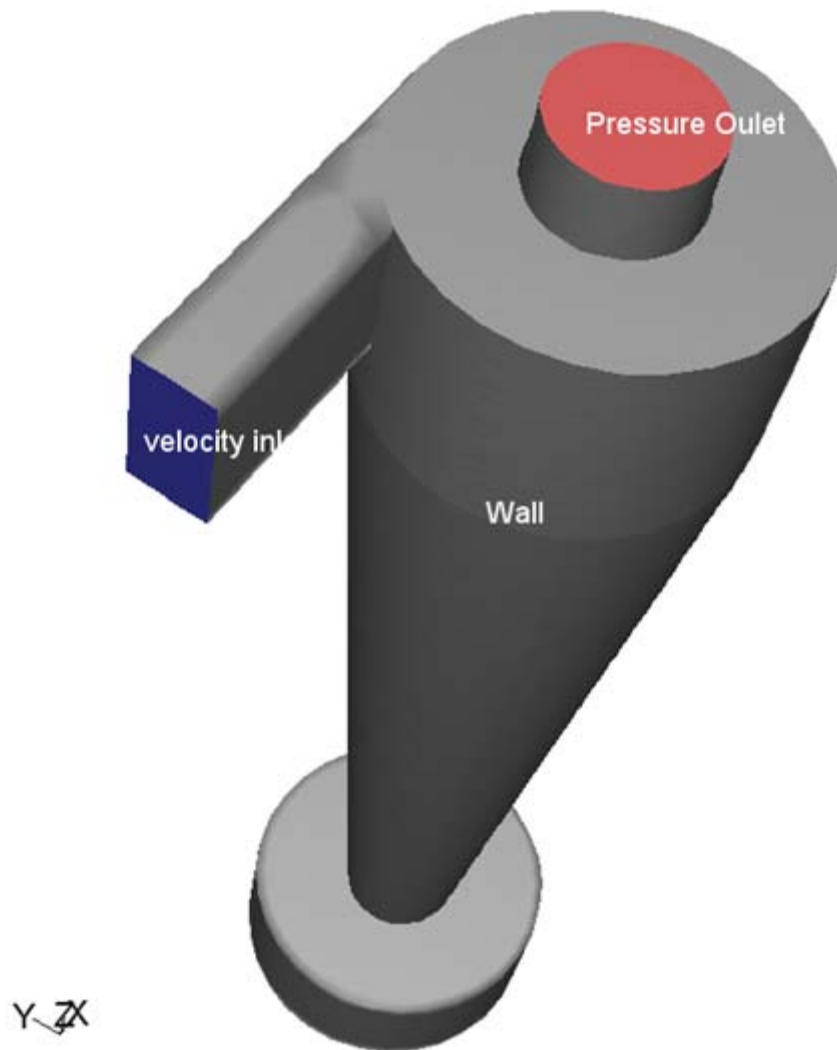


Figura 3.12. Condições de Contorno no Ciclone

### 3.2. Processamento

A tabela 3.3 mostra as principais propriedades das fases que escoam no ciclone, as condições operacionais utilizadas e os principais algoritmos escolhidos para as simulações. No FLUENT as equações diferenciais são discretizadas pelo método dos volumes finitos.

Tabela 3.3. Condições da simulação numérica.

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	DESCRIÇÃO
Dimensão espacial	Tridimensional
Coordenadas	Cartesianas
Tipo de escoamento	Turbulento
Dependência em função da temperatura	Isotérmico
Empuxo	Vetor gravidade (0;0;-9.81)
Tipo de fluido	Incompressível
Descrição das fases	
Fase contínua	Ar
Fase dispersa	Material particulado (rocha fosfática)
Dependência com relação ao tempo	Estado Estacionário
Propriedades físicas constantes	
Ar	Densidade = 1,142 (Kg/m <sup>3</sup> )
	Viscosidade= 1,85x10 <sup>-5</sup> (Kg/m.s)
Rocha fosfática	Densidade= 3030 (Kg/cm <sup>3</sup> )
	Diâmetro da partícula: 1,33 ( $\mu$ m)
Modelos de acoplamento pressão-velocidade	SIMPLEC
Modelo de turbulência	RNG K-E
Velocidade de entrada no ciclone	10,2 (m/s)

### 3.2.1 Simulação da fase contínua: ar

Dados preliminares:

- ✓ Intensidade turbulenta = 5%
- ✓ Diâmetro hidráulico na entrada do ciclone = 0,067 m.
- ✓ Diâmetro hidráulico na saída do ar do ciclone = 0,098 m

#### Processo

As simulações foram realizadas no código computacional FLUENT. Este código aplica a técnica dos volumes finitos a uma malha centrada para resolver as equações que descrevem o escoamento. No caso do ciclone as equações que foram resolvidas são: a equação de continuidade e as equações de Navier-Stokes após operação da média no tempo, que já foram abordadas nos pontos 2.4 e 2.5.

- **Parâmetros e considerações iniciais do “solver”**

O “*solver*” (ou método de cálculo numérico) empregado foi “*pressure based/implicit*” que é o tipo de “*solver*” mais adequado para o estudo do escoamento incompressível a baixa velocidade.

- **O modelo matemático**

Foi usado o modelo matemático RNG  $k - \epsilon$  para a simulação da turbulência nos nove ciclones estudados.

- **Condições preliminares para a modelagem dos ciclones:**

- ✓ Pressão de referência foi considerada igual à zero. A aceleração da gravidade foi considerada nas condições de operação ( $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ).
- ✓ Condições de contorno, as mesmas que foram designadas na etapa de pré-processamento (no GAMBIT): *velocity inlet* (10,2 m/s), *pressure outlet* (valor igual a zero) e *wall* (que considera

para toda a parede externa do ciclone a função de não deslizamento).

- **Controle da solução**

Nesta etapa as equações calculadas são aquelas do escoamento e da turbulência

- ✓ Acoplamento pressão-velocidade: *SIMPLEC*.
- ✓ Fatores de relaxação: foram utilizados os fatores que o FLUENT assumiu como padrão (*default*).
- ✓ O esquema de discretização:
  - Pressão: *PRESTO*.
  - Momento: *QUICK*.
  - Energia cinética turbulenta: *second order upwind*.
  - Taxa de dissipação turbulenta: *second order upwind*.

### **Inicialização do cálculo**

A inicialização da solução foi calculada a partir da entrada no duto tangencial do ciclone com velocidade absoluta igual a 10,2 m/s. O software FLUENT calcula diretamente a velocidades axial, radial e tangencial, assim como a pressão e as energias cinéticas turbulentas e a taxa de dissipação turbulenta.

### **Critério de convergência**

Depois de definir os parâmetros de simulação, tem que se impor um critério de convergência que indique quando se considera que a simulação atingiu o estado estacionário e é estável.

O programa FLUENT tem definido um critério de convergência por padrão (*default*), mas pode se modificar dependendo do tipo de simulação. No caso da simulação do ciclone temos considerado que a simulação converge quando os valores dos resíduos dos parâmetros envolvidos estejam abaixo de 0,001 (como mostra as figuras do Apêndice A).

Os valores residuais são o resultado de dividir o valor atual de uma variável pelo valor da iteração anterior. Quando este valor é muito pequeno significa que as variações entre iterações são mínimas e, portanto o escoamento torna-se estável.

### 3.2.2 Simulação da fase dispersa: rocha fosfática

Uma vez que o modelo da fase continua convergiu se procede a considerar a fase dispersa mediante a função “*discrete phase model*”. Realiza-se a injeção do material particulado para cada diâmetro especificando as características do material, mediante a função “*particle tracks*” se analisa o comportamento de cada partícula em função das variáveis de maior interesse.

### 3.3. Pós-Processamento

Nesta etapa foram analisados os resultados obtidos tanto na simulação da fase continua como da fase dispersa, comparando os mesmos com os resultados experimentais.

#### 3.3.1. Pós-Processamento na fase continua

A primeira etapa da simulação se fez a simulação da fase continua usando como parâmetro de análise os resultados da queda de pressão. Os dados obtidos na primeira simulação com as primeiras células gerada no GAMBIT (ver tabela 3.4) reportaram boa aproximação com os valores experimentais da queda de pressão para os ciclones 1, 2, 5, 9 cujas variações são menores a 10%, já nos ciclones 3, 4, 6, 7 e 8 os valores reportados apresentaram porcentagens de diferença maiores do que 10%, com a finalidade de diminuir dita diferencia se fez uso da “*adapt*” no FLUENT tendo como referência os trabalhos realizados por Kim e Lee (2001).

O modelo de turbulência  $k - \epsilon$  fornece melhores resultados para escoamentos turbulentos afastados das paredes (Hrenya,1995).

Foi feita o uso de a função adaptar nas paredes com a finalidade de reproduzir melhor o comportamento dos escoamentos próximos das paredes.

Tabela 3.4. Queda de pressão experimental e queda de pressão obtida na primeira simulação.

Ciclone	Queda de Pressão Experimental (Pa)	Primeira simulação da queda de pressão (Pa)
Ciclone 1	578,59	577,76
Ciclone 2	588,40	577,55
Ciclone 3	441,30	588,67
Ciclone 4	490,33	424,25
Ciclone 5	529,56	497,36
Ciclone 6	460,91	546,70
Ciclone 7	500,14	474,30
Ciclone 8	480,53	363,62
Ciclone 9	460,91	464,28

### **Pós-processamento: função ADAPT**

Identificou-se o problema de baixo nível de refinamento da malha em regiões de grande gradiente como são as paredes do cilindro do cone e da caixa coletora de partículas. Encontrados os pontos críticos do problema, volta-se ao passo referente, corrige-se depois da análise e reinicia-se a simulação.

O Princípio de funcionamento da FUNÇÃO ADAPT está baseado na “lei da parede”. O refinamento da malha é feita em quatro etapas:

1. Primeiro nível de afinamento: “*boundary adaption*”, nas paredes do cone e do cilindro.
2. Segundo nível de afinamento: “*gradient adaption*”, realizado no volume de controle onde a gradiente de pressão precisava afinar
3. Terceiro nível de afinamento: “*y-plus/y-star adaption  $y^+ = 5$* ”, nas paredes do cone e do cilindro.

Tabela 3.5 Células elaboradas nas etapas de Pré-Processamento e Pós-processamento.

CICLONE	Pré-Processamento	Pós-Processamento		
	Malhas geradas no GAMBIT	Primeiro afinamento da malha	Segundo afinamento da malha	Terceiro afinamento da malha
1	64514	83876	117518	195351
2	63800	83162	113192	191025
3	67378	81572	142899	219836
4	62498	81188	126037	201203
5	63810	83172	118550	196376
6	63010	82372	152533	230366
7	64610	83972	117621	195482
8	63810	83172	114672	192533
9	63042	82404	141736	219562

O refinamento da malha proporcionou maior estabilidade aos resultados assim como também reduziu a porcentagem de erro em relação aos valores experimentais em alguns dos ciclones simulados. O incremento na quantidade de células computacionais, não apresentou incrementos significativos nos tempos computacionais.

A seguir é mostrado nas Figuras 3.13 até 3.17 o perfil da malha na ordem ao refinamento efetuado.

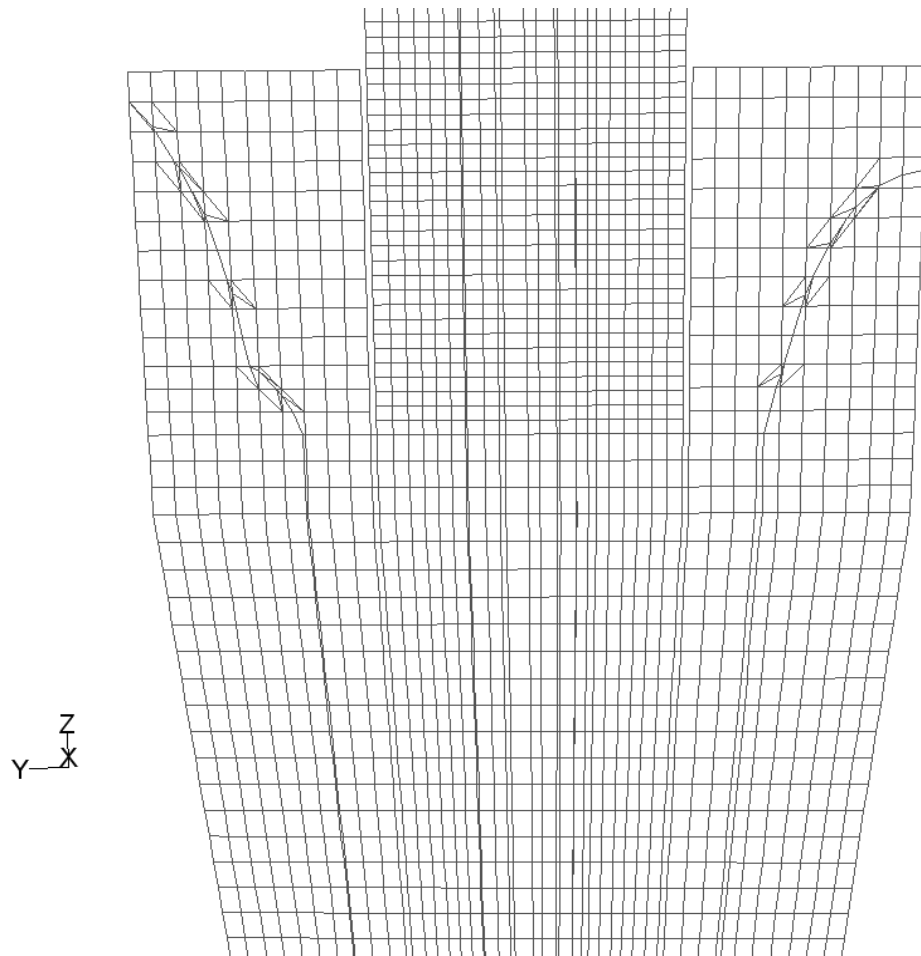


Figura 3.13. Malha inicial gerada no Gambit (ciclone1).



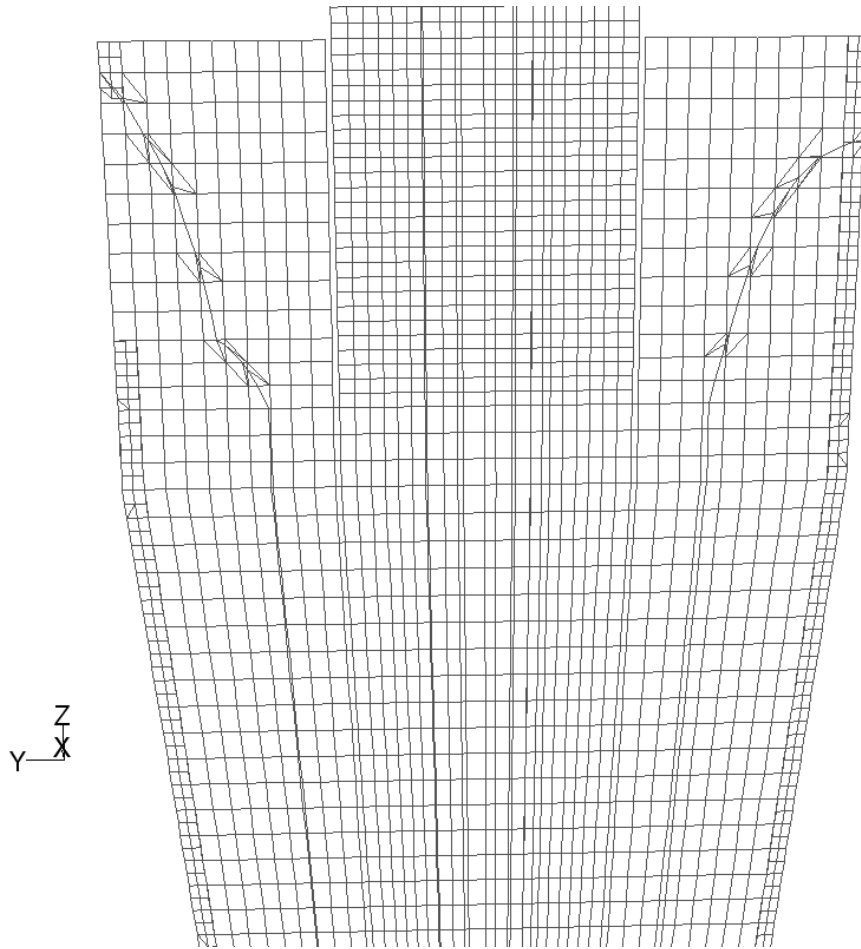


Figura 3.14. Primeiro nível de refinamento: *boundary adaption* (ciclone 1)

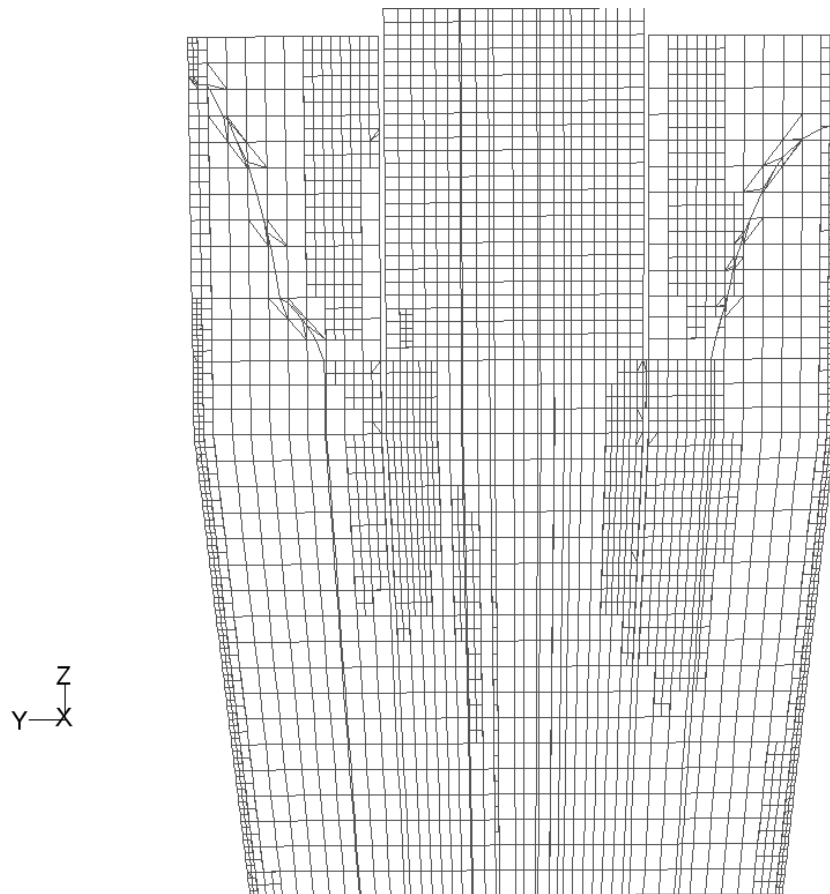


Figura 3.15. Segundo nível de refinamento: *gradient adaption* (ciclone 1).

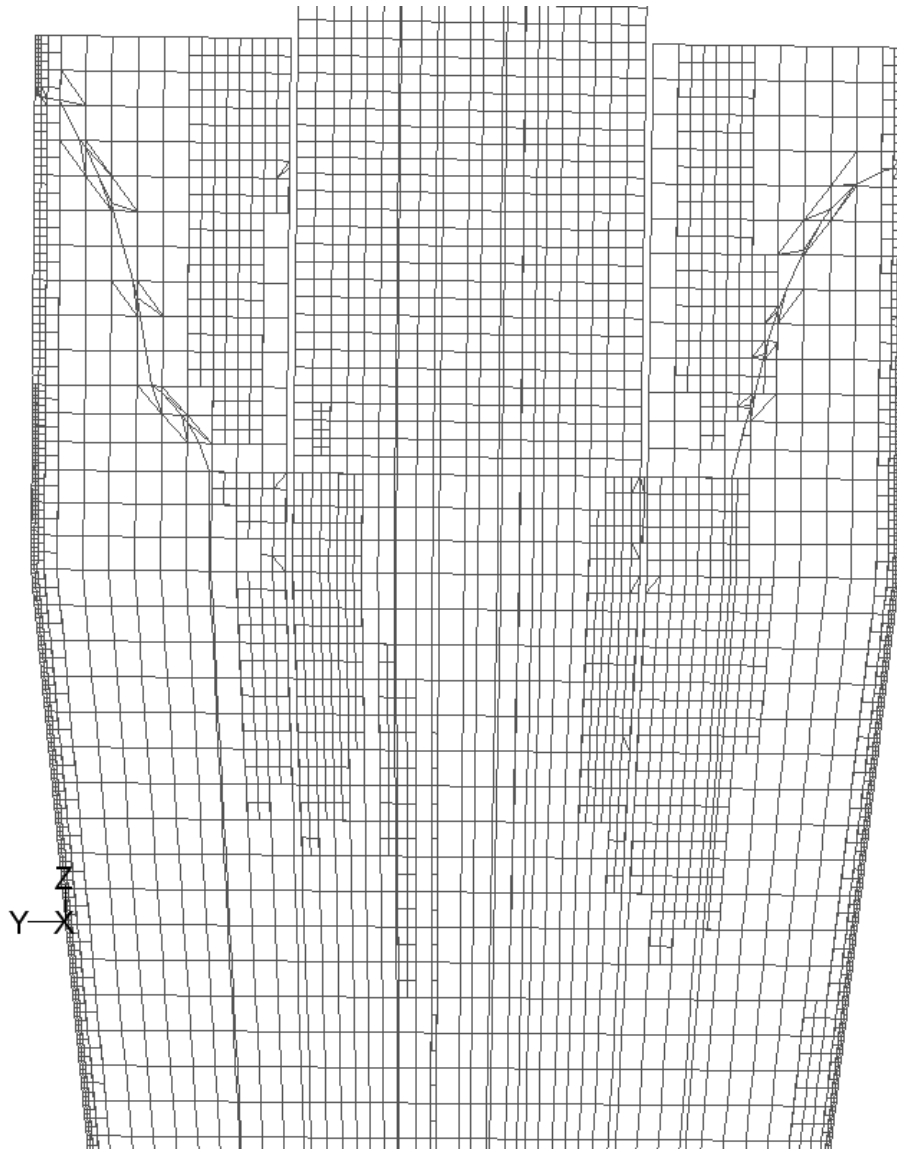


Figura 3.16. Terceiro nível de refinamento: *y-plus/y-star adaption*  $y^+ = 5$  (ciclone 1).

No apêndice B são mostrados os perfis das malhas refinadas no FLUENT. Para cada um dos ciclones simulados, se mostram o perfil antes de aplicar a função “*adapt*” e o perfil depois de aplicar a função “*adapt*”. O FLUENT refina tanto as paredes como as regiões do centro onde se requer malhas mais finas.

### 3.3.2. Pós - Processamento na fase dispersa

Na fase dispersa o parâmetro de interesse é a eficiência de coleta do material particulado. No software FLUENT é usado dentro da função da camada limites a função DPM (*Discrete Phase Model Conditions*) o qual considera por condição padrão os seguintes critérios nas superfícies (Figura 3.17)

- Na parede do cilindro: “*trap*”
- Na parede do cone: “*trap*”
- Na parede do coletor: “*trap*”
- No duto de entrada tangencial de ar e pó: “*reflect*”
- No duto superior de saída do ciclone: “*reflect*”
- Na face de entrada do ciclone: “*escape*”
- Na face de saída do ciclone: “*escape*”

A condição “*trap*” sugere que a partícula fica retida na superfície.

A Condição “*reflect*” sugere que a partícula bate na superfície, mas não fica retida, continuando a se movimentar, mas em nova direção.

A condição “*escape*” sugere que a partícula sai do domínio e é considerada não coletada.

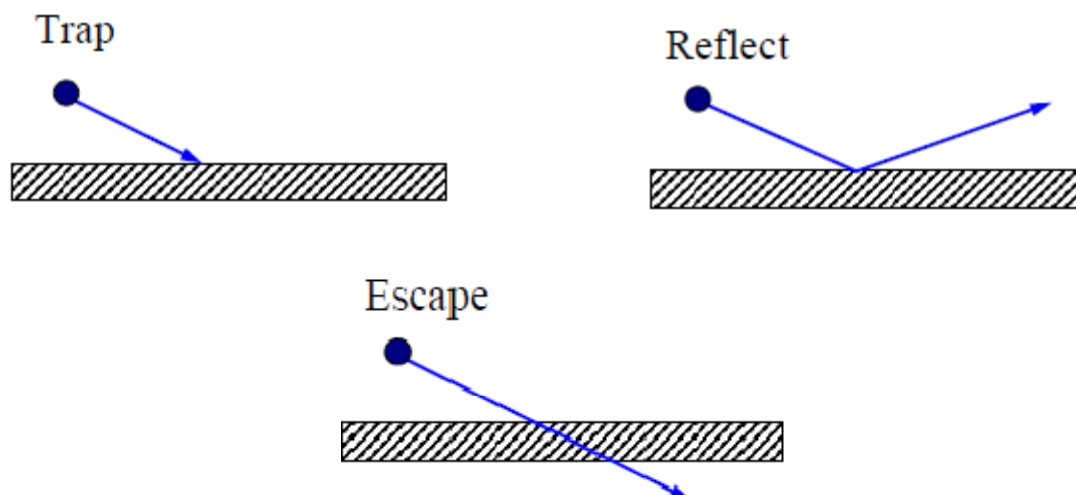


Figura 3.17 Condições de contorno designadas por definição no FLUENT  
(Fonte: Manual do FLUENT 6.2.26.)

Os valores obtidos da eficiência de coleta (tabela 4.10) com as condições de contorno padrão do FLUENT ainda distam dos valores experimentais. Procedeu-se a fazer uso da função UDF, escrita na linguagem C ++, com a finalidade de modificar e adaptar as condições de fronteira considerando os critérios de energia cinética e energia de superfície para as partículas que batem na parede do ciclone (mais detalhes do algoritmo estão no apêndice D). Tal condição de contorno é conhecida como condição da “velocidade crítica”. Através de um balanço de energia para a interação partícula-parede, envolvendo a energia cinética da partícula e a energia de atração entre as superfícies da partícula e da parede, uma velocidade crítica pode ser determinada, abaixo da qual a partícula fica aprisionada. A cada choque testava-se se a velocidade da partícula estava acima da crítica, em cujo caso a partícula era rebatida. Caso a velocidade estivesse abaixo da crítica, a partícula era aprisionada. Em caso de rebatimento, a velocidade da partícula rebatida era uma fração do espelho da velocidade de choque. Um coeficiente de rebatimento foi usado para calcular tal fração.

A função UDF (*user defined function*) compila o programa elaborado na linguagem C++ através da função “*compiled UDFs*” para considerar o algoritmo no cálculo da eficiência de coleta da partícula.

# Capítulo 4

## Resultados e Análise

Os resultados das simulações serão mostrados para a fase continua assim como também para a fase dispersa para cada uma das nove geometrias simuladas.

O critério de convergência adotado nestas simulações foi à diferença de resíduos. Os resíduos das seis equações envolvidas no passo do escoamento precisavam atingir valores menores que  $10^{-3}$  que foi o critério designado para a convergência. Nos gráficos do apêndice A são apresentadas as escalas de resíduos para os nove ciclones simulados, observa-se que todos os ciclones simulados alcançaram o critério de convergência ( $10e^{-3}$ ) em media em torno de 1000 iterações.

Na figura 4.1 se observa a evolução dos resíduos do ciclone 1, a presença de picos na figura é devido ao uso da função “*adapt*” para as 6 equações simuladas. Depois de realizada o refinamento a quantidade de células aumenta então a nova simulação é feita sobre a nova quantidade de células.

A primeira simulação foi feita com a malha gerada no GAMBIT. Após esta atingir o critério de convergência, procedeu-se a fazer o primeiro refinamento da malha. Este primeiro refinamento da malha, novamente teve que atingir o critério de convergência para que o segundo refinamento da malha fosse feito. Uma vez atingida à nova convergência, realizou-se o terceiro refinamento e simulou-se até alcançar novamente o critério de convergência. Não foi possível continuar o afinamento da malha devido a limitações apresentadas na capacidade de simulação do computador. Só foi possível refinar as células com função “Adapt” ate  $Y^+=5$  nas paredes das superfícies cilíndricas o e do cone em cada um dos ciclones simulados.

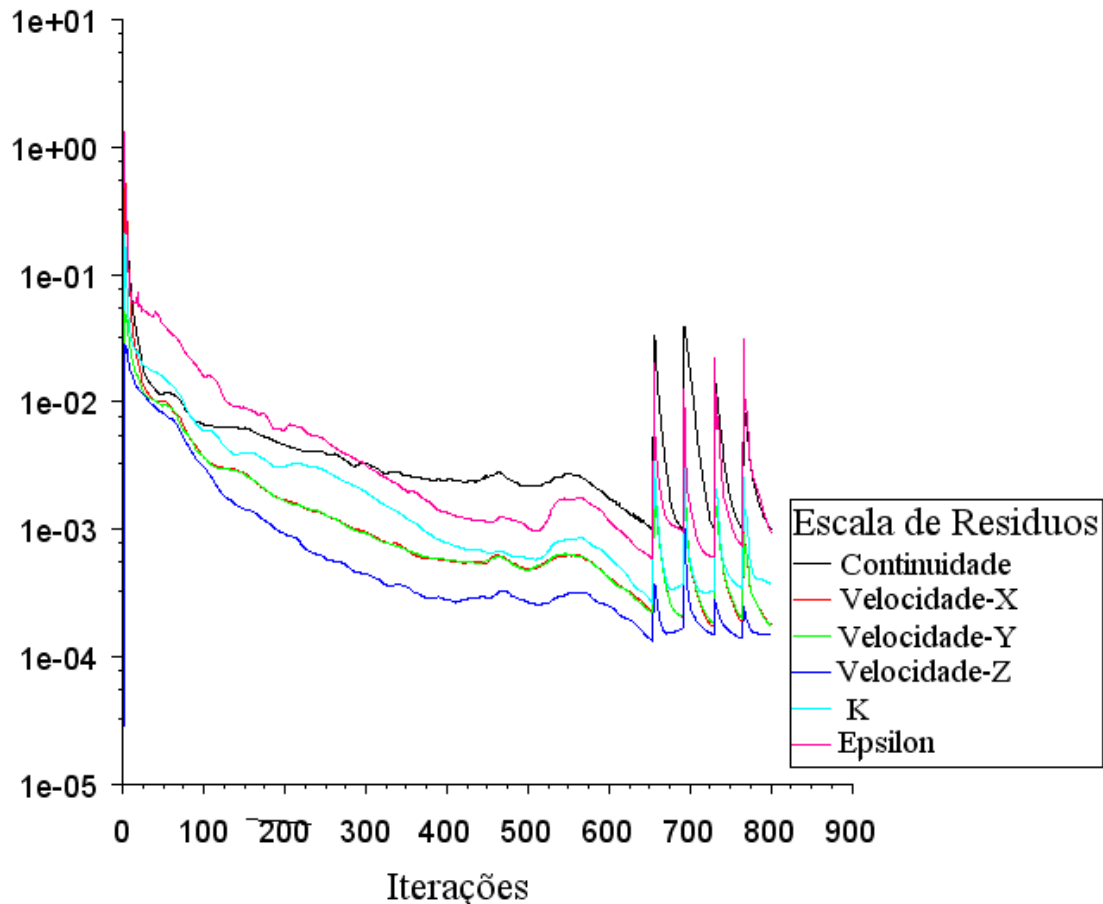


Figura 4.1. Evolução dos resíduos (ciclone 1)

#### 4.1. ANÁLISE DAS MALHAS

As malhas foram elaboradas com cuidado para mantê-las com boa qualidade. As formas de se avaliar as malhas variam desde medir as suas arestas, verificar se todas são iguais, até verificar o quanto os ângulos internos do volume de controle distanciam-se de 90 graus, também determinar quanto cada um dos volumes de controle que a compõe se aproxima de um cubo. Outro parâmetro de avaliação também é a razão de crescimento, que relaciona o tamanho de volumes de controle adjacente.

Neste trabalho efetuou-se a análise das células em função do ângulo de distorção “*Equiangle Skew: QESA*” que é um parâmetro reportado diretamente pelo FLUENT. Segundo o critério da análise do ângulo de distorção para geometrias em 3D, tal ângulo de distorção pode ser até 0,4 para se considerar

a malha de alta qualidade. Este parâmetro é calculado pelo Fluent mediante a seguinte equação:

$$Q_{EAS} = \max \left[ \frac{q_{max} - q_{eq}}{180 - q_{eq}}, \frac{q_{eq} - q_{min}}{q_{eq}} \right] \quad 4.1$$

Onde:

$q_{max}$ ,  $q_{min}$ : máximo e mínimo ângulo na face.

$q_{eq}$ : ângulo característico da célula.

$q_{eq} = 60$  (triângulos e tetraedros).

$q_{eq} = 90$  (quadriláteros e hexaedros).

Tabela 4.1. Critério para análise da malha em função ao ângulo de distorção (Fonte: Gambit 2.4 Documentation).

QEAS	Qualidade
QEAS=0	Perfeito
0<QEAS≤0.25	Excelente
0.25<QEAS≤0.5	Bom
0.5<QEAS≤0.75	Regular
0.75<QEAS≤0.9	Deficiente
0.9<QEAS≤1.0	Muito Deficiente
QEAS=1	Degenerado

A qualidade das células geradas no Gambit é mostradas nas tabelas 4.2 e 4.3 onde se reporta a quantidade de células e a porcentagem do ângulo de distorção *Quality EquiAngle Skew* (QESA) para os nove ciclones simulados. Já nas tabelas 4.4 e 4.5 são mostradas após o terceiro refinamento no Fluent.



Tabela 4.2. Porcentagem do ângulo de distorção nas células elaboradas no Gambit, ciclones 1, 2, 3, 4 e 5.

Ângulo de distorção menor que	Ciclone 1		Ciclone 2		Ciclone 3		Ciclone 4		Ciclone 5	
	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%
< 0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
< 0,093	52720	81,719	54801	85,882	53526	85,732	50649	81,041	51126	80,122
< 0,188	8286	12,844	6371	9,984	6100	9,770	9880	15,808	10440	16,361
<0, 282	602	0,933	735	1,152	597	0,956	383	0,613	286	0,448
<0,376	1816	2,815	1101	1,725	1378	2,207	1160	1,856	1468	2,301
<0,469	673	1,043	241	0,378	135	0,216	124	0,198	36	0,056
<0,564	327	0,507	471	0,738	608	0,974	212	0,339	364	0,570
<0,658	30	0,046	30	0,047	30	0,048	30	0,048	30	0,047
<0,752	20	0,031	20	0,031	20	0,032	20	0,032	20	0,031
<0,846	10	0,016	10	0,016	10	0,016	10	0,016	10	0,015
<0,939	28	0,043	28	0,044	28	0,045	28	0,045	28	0,044
=0,939	2	0,003	2	0,003	2	0,003	2	0,003	2	0,003
TOTAL	64514	100	63810	100	62432	100	62498	100	63810	100

Tabela 4.3. Porcentagem do ângulo de distorção nas células elaboradas no Gambit, nos ciclones 6, 7, 8 e 9

Ângulo de distorção menor que	Ciclone 6		Ciclone 7		Ciclone 8		Ciclone 9	
	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%
< 0,002	0	0	0,0000	0	0	0	0	0
< 0,093	47481	75,355	46852	72,515	47036	72,981	45069	71,490
< 0,188	12693	20,144	12769	19,763	12835	19,915	13207	20,949
<0, 282	601	0,954	3253	5,035	2515	3,902	2389	3,789
<0,376	1394	2,212	1127	1,744	1419	2,202	1695	2,689
<0,469	135	0,214	247	0,382	138	0,214	36	0,057
<0,564	616	0,978	272	0,421	417	0,647	556	0,882
<0,658	30	0,048	30	0,046	30	0,047	30	0,048
<0,752	20	0,032	20	0,031	20	0,031	20	0,032
<0,846	10	0,016	10	0,015	10	0,016	10	0,016
<0,939	28	0,044	28	0,043	28	0,043	28	0,044
=0,939	2	0,003	2	0,003	2	0,003	2	0,003
TOTAL	63010	100	64610	100	64450	100	63042	100

Tabela 4.4. Porcentagem do ângulo de distorção nas células após o terceiro refinamento no Fluent. Ciclones 1, 2, 3, 4 e 5

Ângulo de distorção menor que	Ciclone 1		Ciclone 2		Ciclone 3		Ciclone 4		Ciclone 5	
	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%
< 0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
< 0,093	183223	93,792	179059	93,546	206575	93,956	133809	66,505	129187	65,786
< 0,188	8620	4,413	8939	4,670	9463	4,304	64308	31,962	64471	32,830
<0, 282	602	0,308	1350	0,705	1227	0,558	1053	0,523	634	0,323
<0,376	1816	0,929	1226	0,640	1623	0,738	1437	0,714	1581	0,805
<0,469	673	0,345	267	0,139	233	0,106	234	0,116	47	0,024
<0,564	327	0,16	482	0,252	653	0,297	271	0,135	366	0,186
<0,658	30	0,015	30	0,016	30	0,014	31	0,015	30	0,015
<0,752	20	0,010	20	0,011	20	0,009	20	0,009	20	0,010
<0,846	10	0,005	10	0,005	10	0,005	10	0,005	10	0,005
<0,939	28	0,014	28	0,015	28	0,013	28	0,014	28	0,014
=0,939	2	0,001	2	0,001	2	0,001	2	0,001	2	0,001
TOTAL	195351	100	191413	1000	219864	100	201203	100	196376	100

Tabela 4.5. Porcentagem do ângulo de distorção nas células após o terceiro refinamento no Fluent. Ciclones 6, 7, 8 e 9

Ângulo de distorção menor que	Ciclone 6		Ciclone 7		Ciclone 8		Ciclone 9	
	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%
< 0,002	0	0	0,0000	0	0	0	0	0
< 0,093	139666	60,606	146061	73,314	146845	74,945	147797	67,315
< 0,188	86590	37,574	19886	9,985	18329	9,355	40738	18,554
<0, 282	1408	0,611	31526	15,829	27925	14,252	28400	12,935
<0,376	1760	0,764	1127	0,566	1896	0,968	1892	0,863
<0,469	257	0,112	247	0,124	336	0,171	75	0,034
<0,564	679	0,295	272	0,137	516	0,263	570	0,259
<0,658	30	0,013	30	0,015	31	0,016	30	0,014
<0,752	20	0,009	20	0,010	20	0,010	20	0,009
<0,846	10	0,004	10	0,005	10	0,005	10	0,004
<0,939	28	0,012	28	0,014	28	0,014	28	0,013
=0,939	2	0,001	2	0,001	2	0,001	2	0,001
TOTAL	230450	100	199164	100	195938	100	219562	100

Analisando a qualidade do ângulo de distorção nos três primeiros ciclones (1, 2 e 3) segundo as tabelas 4.2 e 4.4, se observa o seguinte:

- No foi possível obter em nenhum dos ciclones desenhados células perfeitas, com  $QEAS = 0$ .
- Células com excelente qualidade ( $0 < QEAS \leq 0,25$ ) foi obtida em grande porcentagem nos ciclones 1, 2 e 3. Observa-se que as células elaboradas no Gambit com excelente qualidade estão nos seguintes porcentagens: 94%, 95% e 95% respectivamente. Já as células que foram refinadas no fluent apresentam os seguintes porcentagens: 98%, 98% e 98% respectivamente; então se afirma que o refinamentos nestes 3 primeiros ciclones melhorou a qualidade do ângulo de distorção, e aumentou a quantidade de células onde serão resolvidas as equações da dinâmica dos fluidos
- Células com boa qualidade foram obtidas em baixa porcentagem ( $0,25 < QEAS \leq 0,5$ ): 4%, 3% e 3% respectivamente. Já nas células refinadas no Fluent apresentam as seguintes porcentagens: 1,4%, 1,4% e 1,4% respectivamente. O refinamento feito com o Fluent sobre as células diminuiu a porcentagem dos ângulos de distorção devido a que aumentou a quantidade de células com excelente ângulo de distorção.
- Células com qualidade regular ( $0,5 < QEAS \leq 0,75$ ) se obtiveram muito pouca quantidade, no Gambit foi obtida nas seguintes porcentagens: 0,5%, 0,7% e 0,9%. Já após o refinamento no Fluent foi da seguinte maneira: 0,1%, 0,2% e 0,2%. O refinamento feito nas células diminuiu a porcentagem dos ângulos com qualidade regular.
- Células com qualidade deficiente ( $0,75 < QEAS \leq 0,9$ ) foram obtidas em quantidades baixas. No Gambit se obteve para os três ciclones (1, 2 e 3) as seguintes porcentagens: 0,04%, 0,04% e 0,04%. Já após o refinamento se obteve as seguintes porcentagens: 0,01%, 0,01% e 0,01%. A porcentagem dos ângulos de distorção com deficiente qualidade diminuiu.
- Células com qualidade muito deficiente ( $0,9 < QEAS \leq 1,0$ ) foram obtidas quantidades pequenas nos seguintes porcentagens: 0,04%, 0,04% e 0,04%. Após o refinamento no Fluent foi nas seguintes porcentagens:

0,01%, 0,01% e 0,01%. Nas tabelas 4.2 e 4.4 se observa na parte inferior das tabelas o seguinte valor “= 0,939” que representa o máximo valor de ângulo de distorção com que foi elaborada a célula mais deficiente. Dois foram as células obtidas com este ângulo de distorção elevado, mas para realizar as simulações este valor obtido se encontra dentro dos faixa aceitável da simulação, se aquele valor máximo teria sido superior ou igual a 1,0 as aproximações mediante as simulações não poderiam ter sido feitas ou os valores reportados seriam muito distantes dos valores experimentais. Na seguinte figura se mostra as duas células onde estão ângulos com a maior distorção.

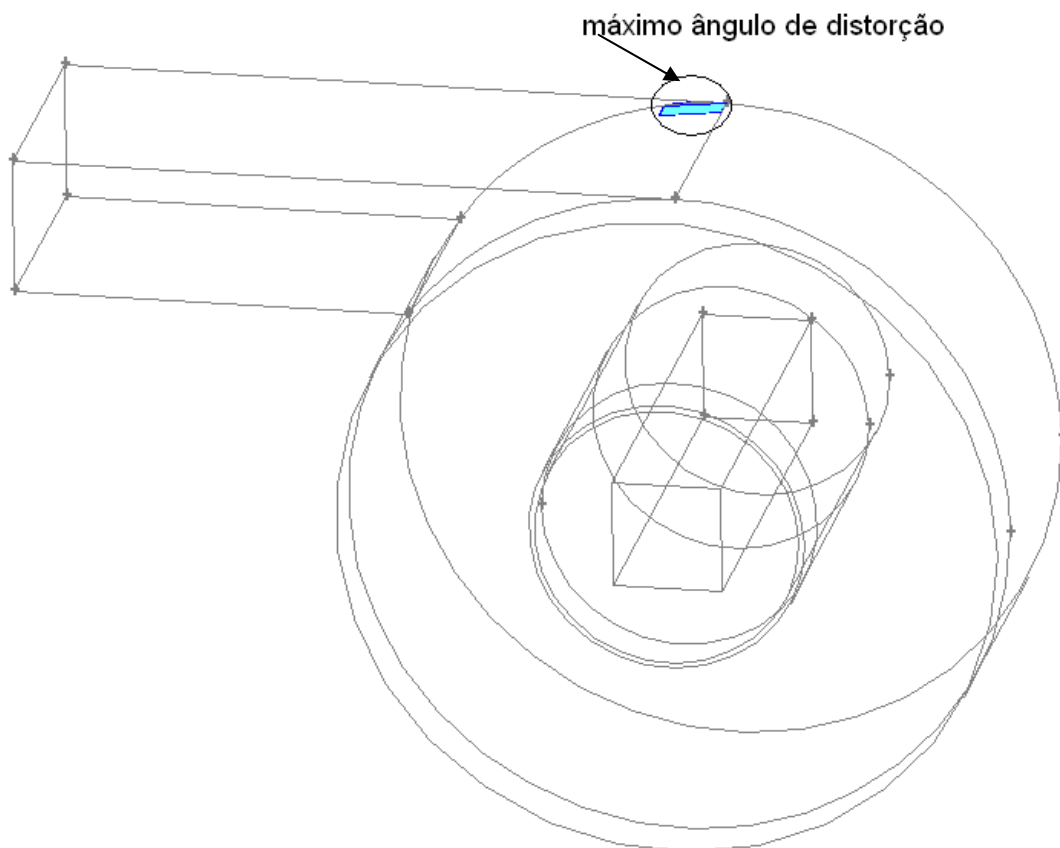


Figura 4.2 Localização do máximo ângulo de distorção.

## 4.2 Dependências da queda de pressão com a malha

Uma análise de dependência da solução com a malha é necessário por dois motivos: primeiro buscar soluções independentes da malha e segundo quando existem limitações ao refino da malha por limitações de máquina, se ter pelo menos por extrapolação, uma noção da grandeza do erro (Alves, 1998; Meier, 1998).

A tabela 4.6 mostra a queda de pressão em função da quantidade de células. Pode-se observar que a queda de pressão é quase independente da quantidade de células, mesmo com um grande aumento da quantidade de células a queda de pressão varia pouco. A variação na queda de pressão em cada uma das simulações realizadas foi devida ao uso da função “*adapt*”. Como já foi mencionado no capítulo da metodologia, foram necessários diferentes refinamentos de malha nas proximidades da parede da superfície cônica e cilíndrica, assim como também em regiões onde o gradiente de pressão requeria células mais refinadas. O refinamento da malha foi direcionado para que a altura do primeiro elemento cumprisse valores de  $Y^+$  correspondentes à região logarítmica, compreendida entre  $5 \leq Y^+$  para regiões perto da parede.

Tabela 4.6 Simulação da queda de pressão nos nove ciclones, em Pascal (Pa)

CICLONE	PRIMEIRA SIMULAÇÃO		SEGUNDA SIMULAÇÃO		TERCEIRA SIMULAÇÃO		QUARTA SIMULAÇÃO		EXPERIMENTAL
	Células geradas no GAMBIT	Queda de pressão (Pa)	Primeiro refinamento da malha	Queda de pressão (Pa)	Segundo refinamento da malha	Queda de pressão (Pa)	Terceiro refinamento da malha	Queda de pressão (Pa)	Queda de pressão (Pa)
1	64514	577,46	83876	579,53	117518	571,94	195351	569,56	578,59
2	63810	577,55	83172	540,58	113580	528,46	191413	531,29	588,40
3	62432	588,67	81572	546,50	142927	540,56	219864	545,28	441,30
4	62498	424,25	81188	422,99	126037	418,73	201203	425,62	490,33
5	63810	497,36	83172	466,81	118550	459,03	196376	458,35	529,56
6	63010	546,70	82372	509,41	152617	496,63	230450	496,92	460,91
7	64610	474,30	83972	463,85	121331	454,74	199164	452,02	500,14
8	64450	363,62	84260	373,07	116285	372,69	195938	372,25	480,53
9	63042	464,28	82404	449,09	141736	441,98	219562	440,98	460,91



Nas figuras 4.3 até 4.11 se acompanhou a mudança da queda de pressão em função da quantidade de células geradas. Observa-se que a queda de pressão não tem dependência direta forte com a quantidade de células geradas, sendo a mudança na queda de pressão pequena em relação à grande quantidade de células adicionadas. Pode-se dizer que a incorporação do refinamento nas células ajudou a melhorar a precisão dos dados que foram obtidos mediante as células grosseiras em alguns das simulações e em outras ajudou a corroborar a precisão dos dados já obtida na primeira simulação.

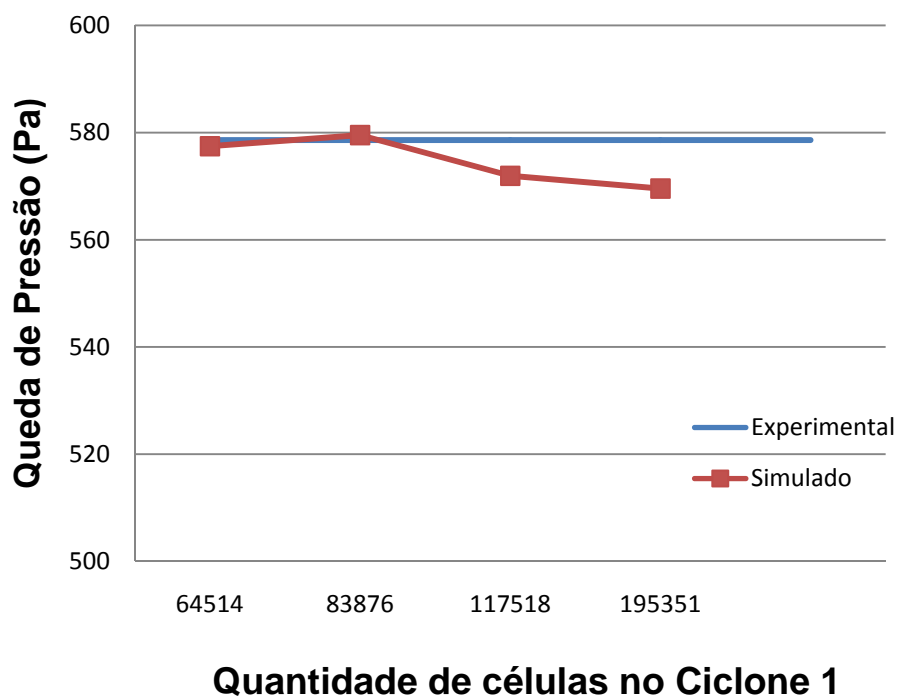


Figura 4.3 Queda de pressão em função da quantidade de células no ciclone 1.

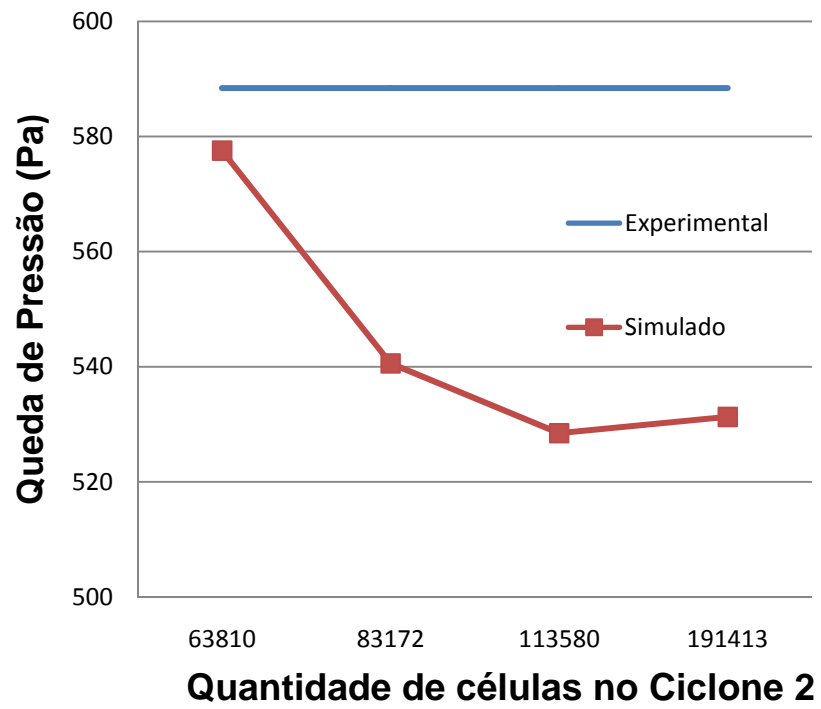


Figura 4.4 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 2.

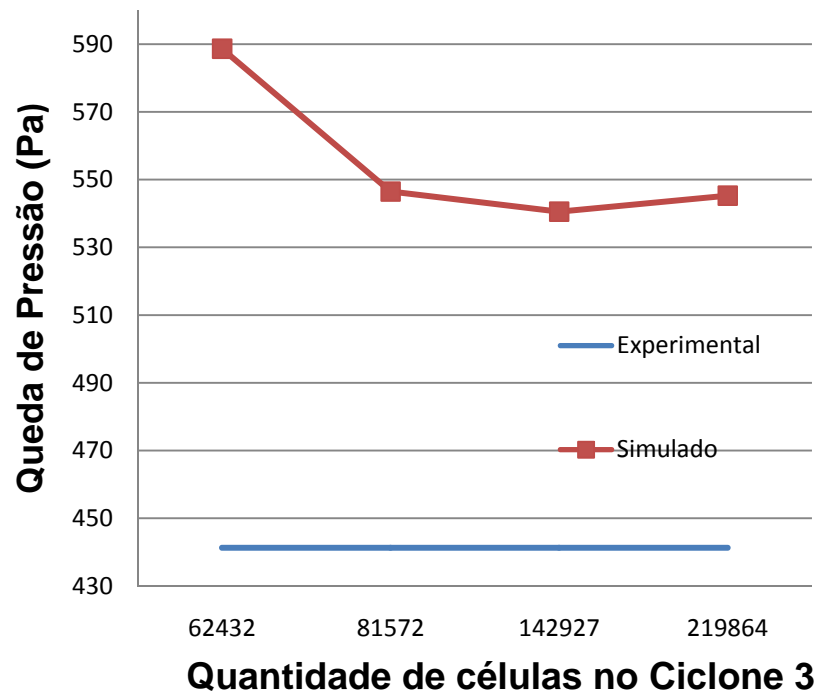


Figura 4.5 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 3.

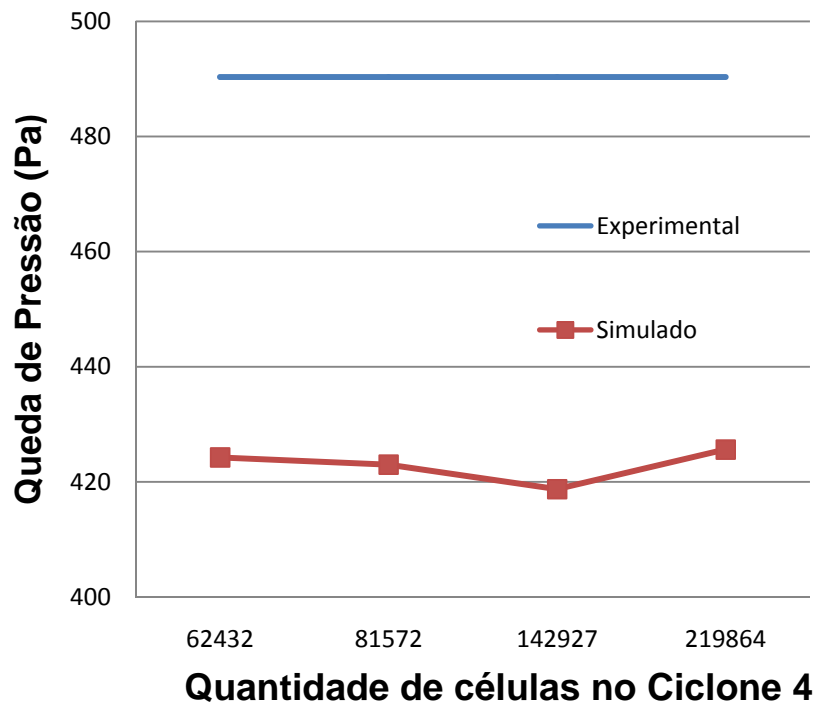


Figura 4.6 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 4.

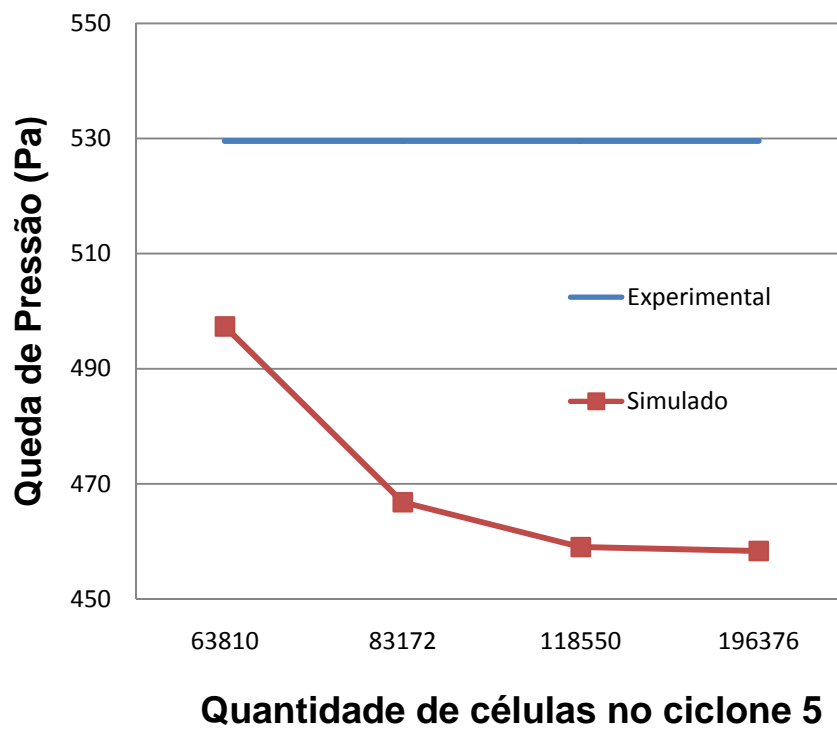


Figura 4.7 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 5.

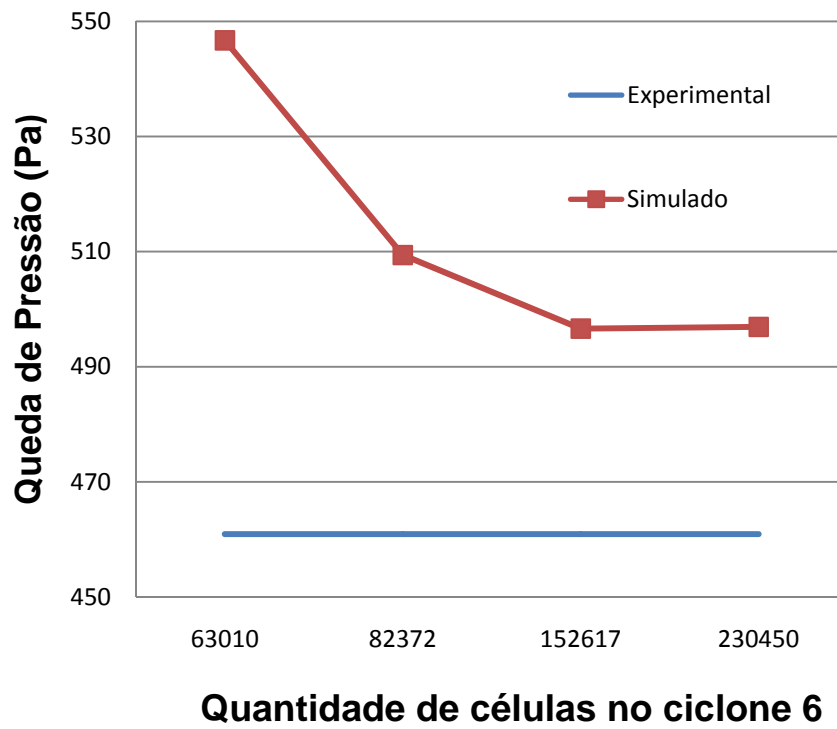


Figura 4.8 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 6.

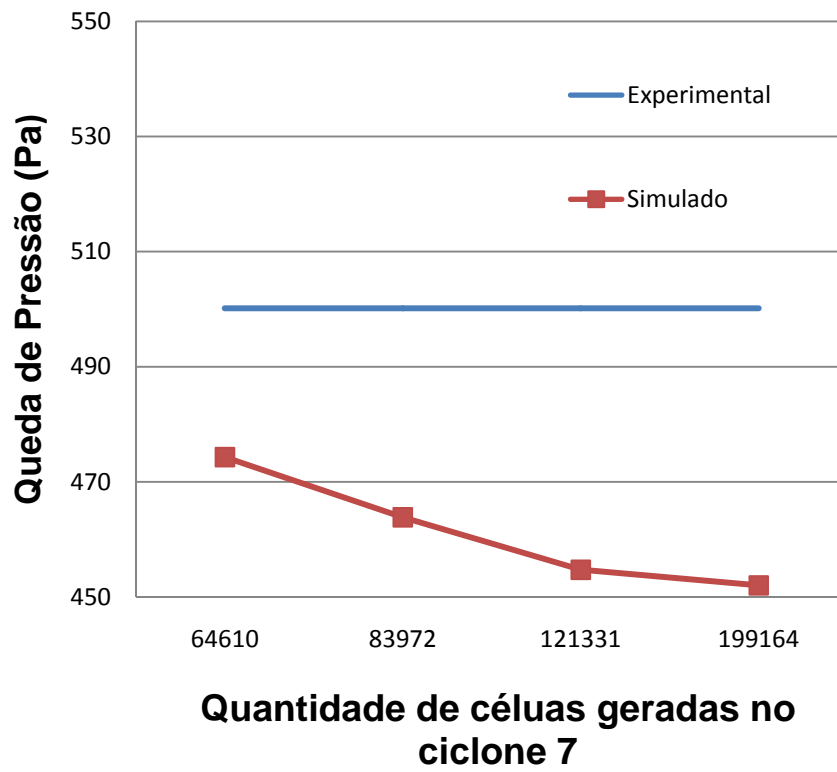


Figura 4.9 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 7.

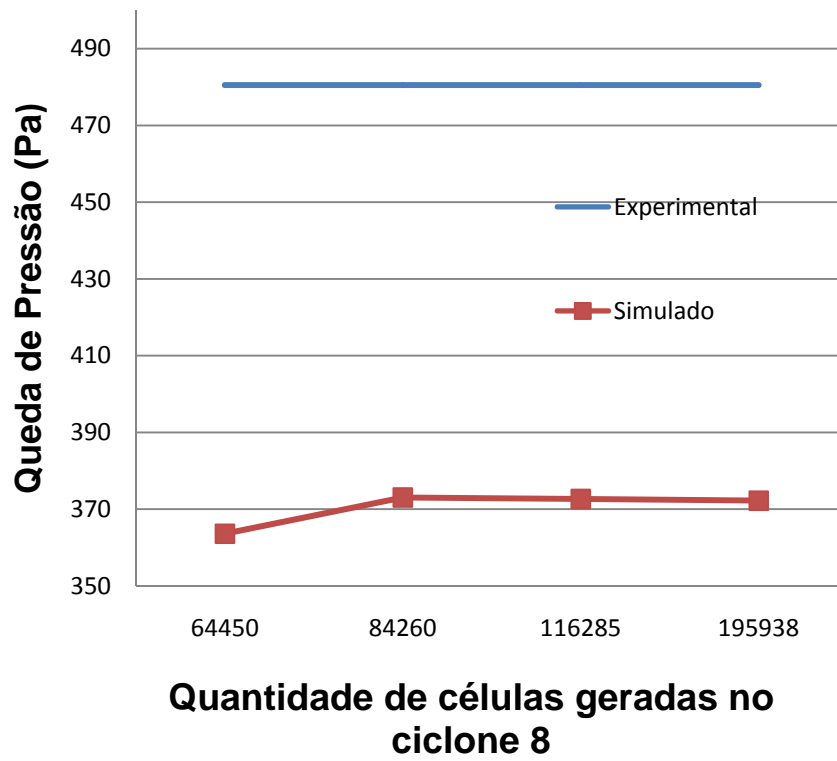


Figura 4.10 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 8.



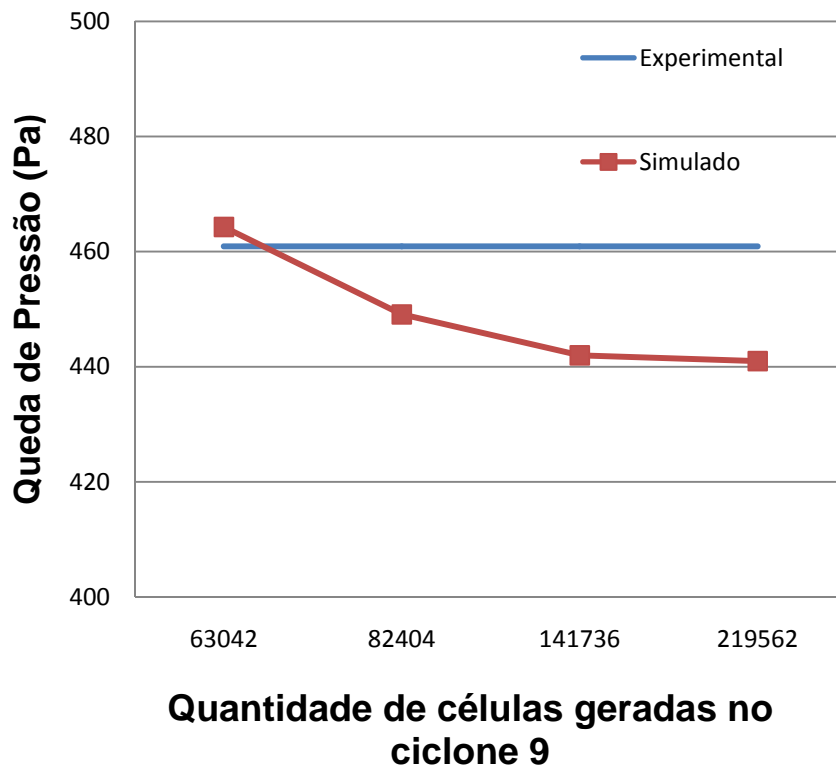


Figura 4.11 Queda de pressão em função a quantidade de células no ciclone 9.

Fazendo uma análise das figuras 4.3 até 4.11 da dependência da queda de pressão em função a quantidade de células se observa que:

- Os ciclones simulados 1, 2, 6, 7 e 9 apresentam boa aproximação com os dados experimentais. A diferença entre o experimental e o simulado é menor que 10%. Nestes ciclones, após o terceiro refinamento das células se obteve resultados satisfatórios que se aproximam aos dados experimentais obtidos por Scarpa (2000).
- A queda de pressão total não muda para soluções independentes da malha, como se esperaria inicialmente. Enfatizando isto apenas porque será o critério para situações na qual não se dispõe de outra referência para avaliar esta dependência (Alves, 1998).

### **4.3 ANÁLISES DO ESCOAMENTO**

A etapa do processamento desenvolvida no FLUENT 6.3.26 foi simulada segundo o modelo Euleriano – Lagrangeano. As análises são divididas em duas etapas: modelagem Euleriana (fase continua) e modelagem Lagrangeana (fase dispersa)

#### **4.3.1. Fase continua**

A avaliação da fase continua foi feita mediante a análise da evolução dos perfis da queda de pressão e das componentes da velocidade axial, radial e tangencial (ver apêndice C).

Os trabalhos publicados por Linden (1949) e Stairmand (1951) mostraram que o escoamento em um ciclone pode ser dividido em duas regiões: uma junto à parede, onde o escoamento forma uma espiral descendente, e outro na região central, onde o escoamento forma uma espiral ascendente.

A evolução do escoamento na forma espiral descendente, evidenciando o seu enfraquecimento à medida que o fluido se distancia da entrada tangencial, bem como a espiral ascendente foi reportada mediante gráficos no ambiente do FLUENT, depois que as simulações atingiram os critérios de convergência.

#### **Queda de Pressão Total**

Os valores da queda de pressão total obtidos mediante as simulações foram comparados com os valores experimentais obtidos por Scarpa (2000) para os nove ciclones.

A queda de pressão experimentalmente foi determinada mediante a diferença das leituras da pressão na saída e na entrada do ciclone, a medida foi feita com um micro – manômetro, os dados da queda de pressão experimental, são mostrados nas tabelas 4.7 e 4.8 assim como também a queda de pressão obtida sobre a malha sem refinamento e sobre a malha com refinamento.

Tabela 4.7 Queda de pressão simulada no FLUENT antes de realizar o refinamento das células e queda pressão experimental (Scarpa, 2000).

Ciclone	Queda de pressão experimental (Pa)	Queda de pressão simulação (Pa) sobre a malha sem refinamento	% Diferença
Ciclone 1	578,59	577,46	0,20
Ciclone 2	588,40	577,55	1,84
Ciclone 3	441,30	588,67	33,39
Ciclone 4	490,33	424,25	13,48
Ciclone 5	529,56	497,36	6,08
Ciclone 6	460,91	546,70	18,61
Ciclone 7	500,14	474,30	5,17
Ciclone 8	480,53	363,62	24,33
Ciclone 9	460,91	464,28	0,73

Tabela 4.8 Queda de pressão simulada no FLUENT após o terceiro afinamento das células e queda de pressão experimental (Scarpa, 2000).

Ciclone	Queda de pressão experimental (Pa)	Queda de pressão simulação (Pa) depois do terceiro refinamento da malha	% Diferença
Ciclone 1	578,59	569,56	1,56
Ciclone 2	588,40	531,30	9,70
Ciclone 3	441,30	545,28	23,56
Ciclone 4	490,33	425,62	13,20
Ciclone 5	529,56	458,35	13,45
Ciclone 6	460,91	496,92	7,81
Ciclone 7	500,14	458,10	8,41
Ciclone 8	480,53	376,09	21,74
Ciclone 9	460,91	440,98	4,32

As simulações realizadas nas células sem o refinamento (tabela 4.7) apresentam boa aproximação com os dados experimentais, a exceção dos ciclones 3 e 8 cujas porcentagens de diferença superam os 20%. Devido a esta porcentagem se fez uso da função “Adapt” (refinamento das células) no Fluent. Os dados obtidos na tabela 4.8 mostram que o refinamento nas células nos ciclones cujas diferenças era menor a 20% ajudou a corroborar os dados, já para os ciclones cujas diferenças eram maiores a 33% e 24% estas porcentagens diminuíram mas ainda continuam superiores a 20%.

### **Perfis da Queda de Pressão**

Nas figuras do apêndice C são mostrados os gráficos dos perfis da queda de pressão para todos os ciclones simulados assim como também nas figuras 4.12, 4.13 e 4.14 são mostrados os perfis da queda de pressão no plano YZ (quando  $X=0$ ) para os nove ciclones simulados.

Nas figuras se observa que a região de menor pressão encontra-se distribuída ao longo do eixo de simetria no ciclone, onde a partir de uma altura média ocorre a reversão do fluxo. Também é notada certa uniformidade de pressão nas regiões próximas à parede do ciclone. Já próximos as paredes está a maior pressão desenvolvida no ciclone.

Fazendo a análise entre os dados obtidos experimentalmente (Scarpa, 2000) e os dados obtidos mediante a simulação numérica no FLUENT após o terceiro refinamento das células. Observa-se boa aproximação dos dados simulados com os dados na seguinte proporção:

- Diferença menor que 25% nos ciclones 3 e 8;
- Diferença menor que 15% nos ciclones 4, 5;
- Diferença menor que 10% nos ciclones 1, 2, 6, 7 e 8

No apêndice C são mostrados os gráficos da queda de pressão de maneira ilustrativa em função da posição radial. Para isso se considerou cinco alturas diferentes. Por exemplo, nos três primeiros ciclones 1, 2 e 3 se

considerou os seguintes níveis: Nível 1 ( $Z=0$  m), Nível 2 ( $Z=0,15$  m), Nível 3 ( $Z=0,30$  m), Nível 4 ( $Z=0,55$  m) e Nível 5 ( $z=0.75$  m).

A seguir são mostrados os perfis de pressão simulada quando  $x=0$  no plano YZ, nas figuras 4,12; 4,13 e 4.14.

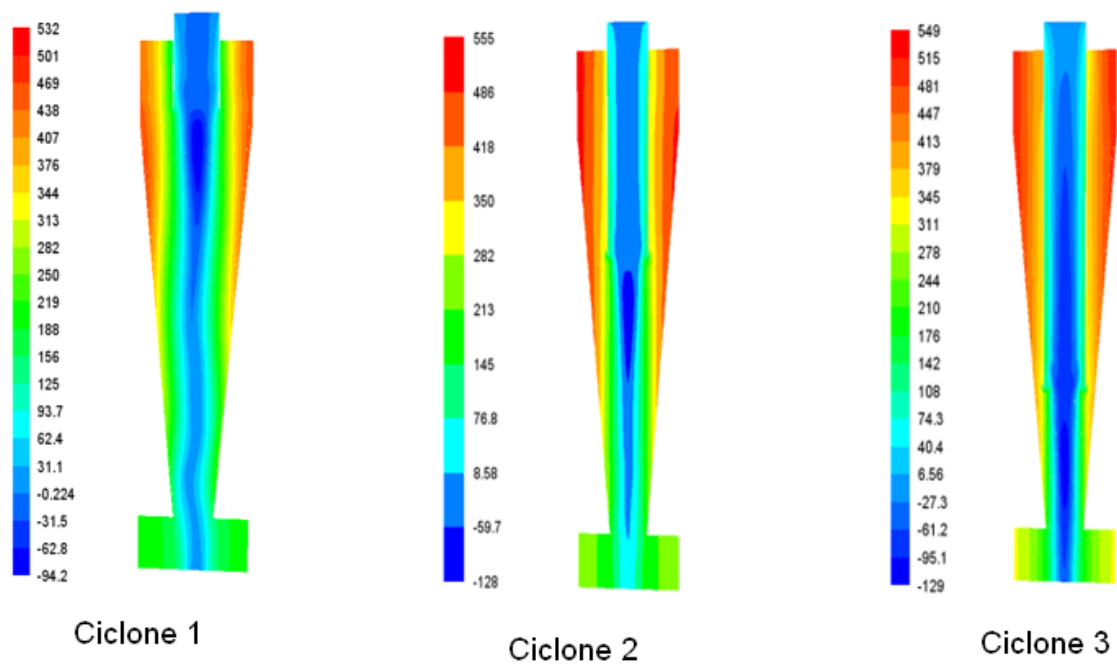


Figura 4.12 Perfil de pressão simulada quando  $x=0$  no plano YZ para os ciclones 1, 2 e 3.

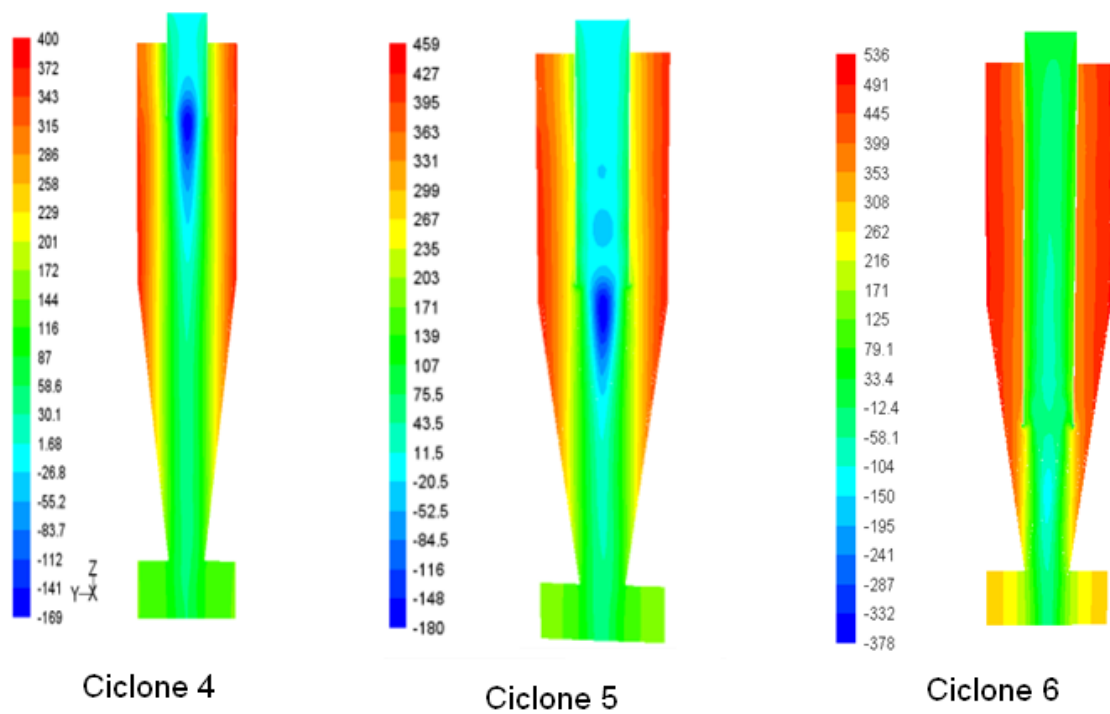


Figura 4.13. Perfil de pressão simulada quando  $x=0$  no plano YZ para os ciclones 4, 5, e 6.

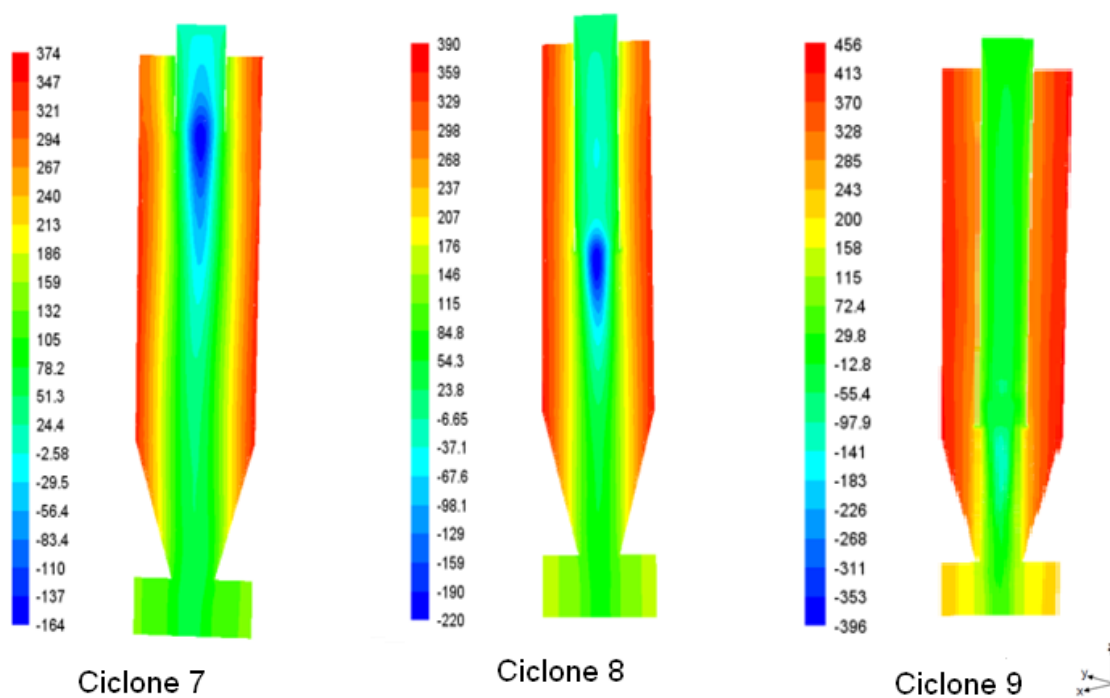


Figura 4.14. Perfil de pressão simulada quando  $x=0$  no plano YZ para os ciclones 7, 8 e 9.

## Campos de velocidade

A seguir são mostrados os campos de velocidade axial e tangencial obtido depois da simulação no software FLUENT. Os campos de velocidade radial não foram mostrados aqui, devido a que a variação da velocidade radial é mínima ao longo dos eixos verticais do ciclone.

Os campos de velocidade obtidos mediante a simulação serão comparados qualitativamente com os campos de velocidade obtidos por Jiwu and Weijian (2008), devido ao emprego do mesmo modelo na simulação da turbulência (k-e), do mesmo pacote comercial e, além disso emprego da velocidade de alimentação bem próximo ao que foi simulado no presente trabalho (usaram velocidade de alimentação 9,0 m/s, dimensões do ciclone foram de altura 40 cm. e diâmetro 17 cm). Na figura 4.15 se mostra o perfil das velocidades adaptado de Jiwu and Weijian para os campos de velocidade.

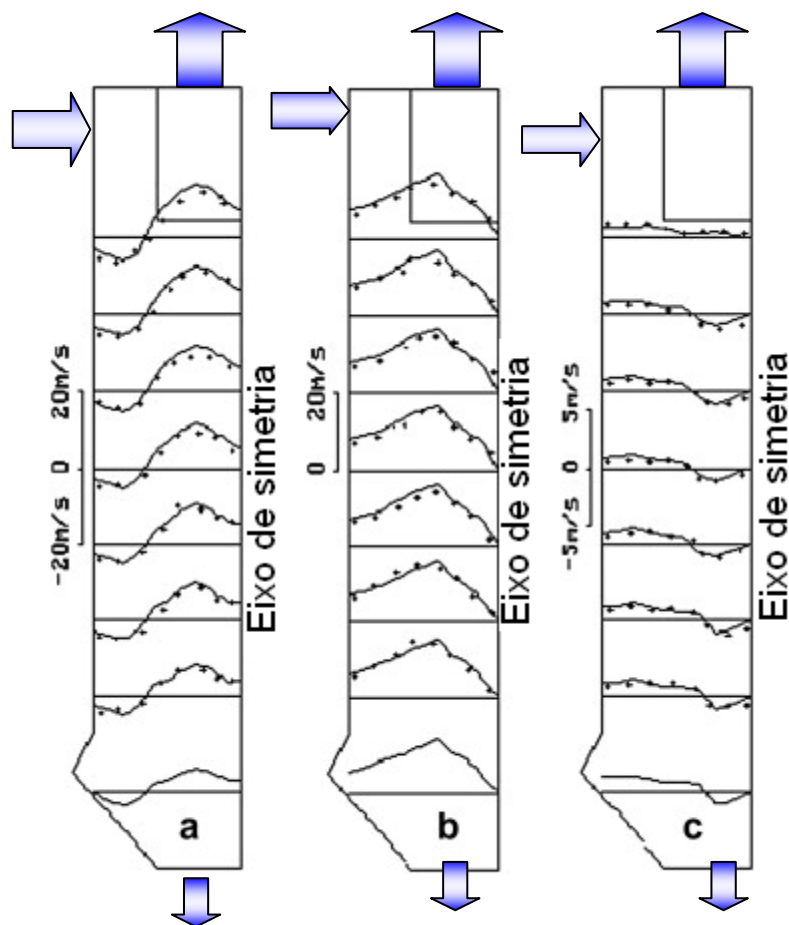


Figura 4.15. Simulação numérica dos campos de velocidade. As flechas verticais indicam as duas saídas na parte superior e na parte inferior; a flecha horizontal indica o ingresso do escoamento gasoso. (a) velocidade axial, (b) velocidade tangencial e (c) velocidade radial (Fonte: Adaptado de Jiwu and Weijian 2008)

### **Velocidade axial**

As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram perfis típicos de velocidade axial obtidos na presente simulação. Mais gráficos são mostrados no apêndice C.

A velocidade axial nos ciclones simulados se desenvolveu da seguinte maneira:

- No primeiro grupo de: -6 a 10 m/s,
  - No ciclone 1: de -6 a 10 m/s
  - No ciclone 2: de -4 a 10 m/s
  - No ciclone 3: de -5 a 10 m/s
  
- No segundo grupo de: -3.5 a 17 m/s e
  - No ciclone 4: de -4 a 14 m/s
  - No ciclone 5: de -3.5 a 17 m/s
  - No ciclone 6: de -6 a 14 m/s
  
- No terceiro grupo de: -3 a 15 m/s.
  - No ciclone 7: de -3 a 12 m/s
  - No ciclone 8: de -3 a 15 m/s
  - No ciclone 9: de -3 a 12 m/s

De acordos com os perfis obtidos nos diferentes níveis (planos nos ciclones a diferentes alturas), observa-se que a região onde se desenvolveu a maior variação na velocidade axial foi a região compreendida entre o domínio superior do cone e a base do duto de saída de ar. Este comportamento é o mesmo em todos os ciclones.



De acordo com Pattersom e Munz (1996), a componente axial de velocidade em um ciclone a gás deve apresentar um comportamento descendente junto à parede e gradativamente inverter seu sentido em  $r/R \approx 0,6$ , e assim crescer até o eixo de simetria do ciclone.

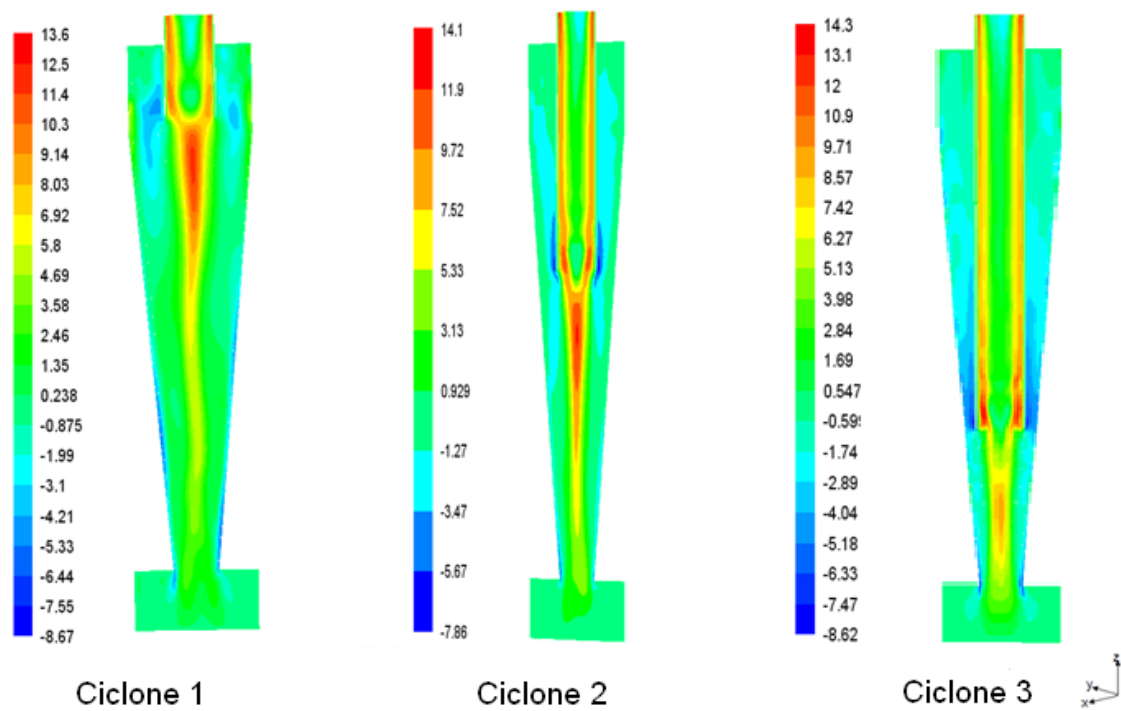


Figura 4.16 Perfil da velocidade axial simulado quando  $x=0$  no plano YZ para os ciclones 1, 2 e 3.

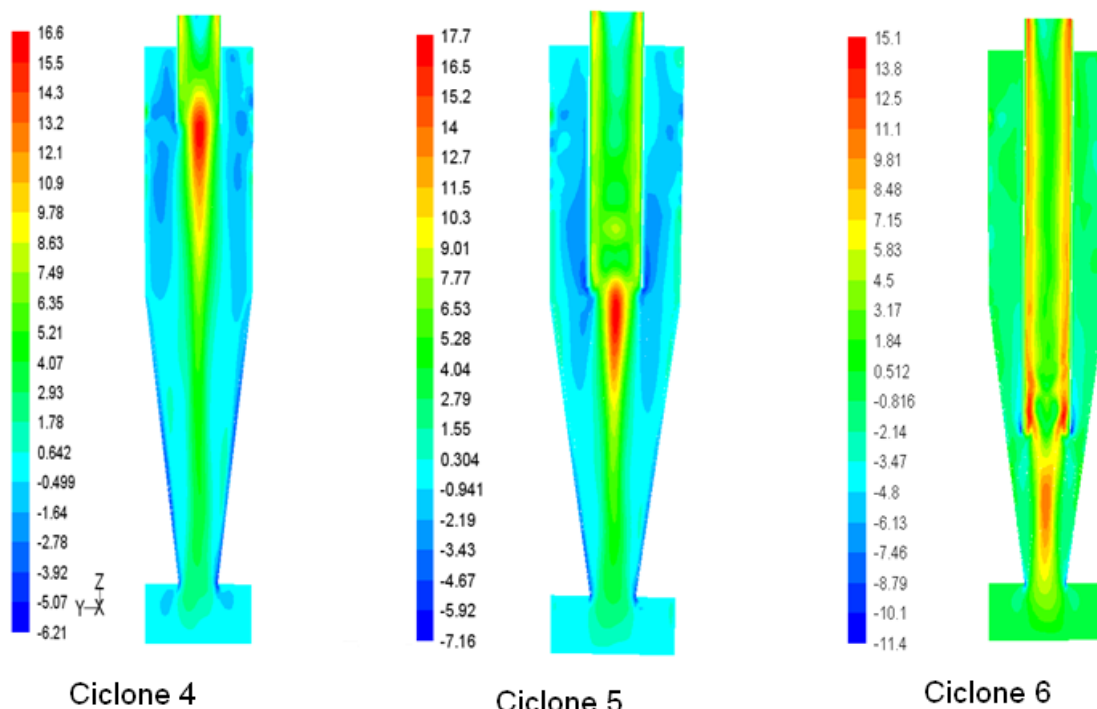


Figura 4.17. Perfil da velocidade axial simulado quando  $x=0$  no plano YZ para os ciclones 4, 5 e 6.

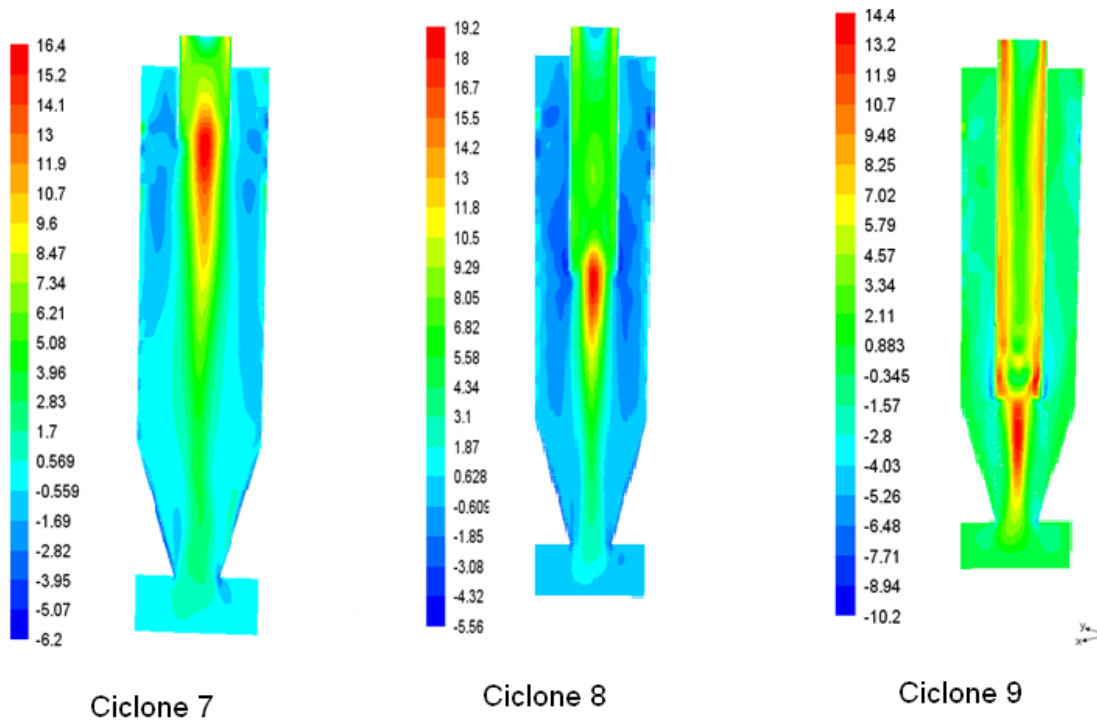


Figura 4.18 Perfil da velocidade axial simulado quando  $x=0$  no plano YZ para os ciclones 7, 8 e 9.

## Velocidade tangencial

Os perfis de velocidade tangencial são apresentados nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, assim como também no apêndice C.

Pela inspeção dos mapeamentos dos perfis de velocidade tangencial o escoamento apresentou uma região de baixa velocidade justamente no meio do eixo da simetria como pôde ser observado em todos os casos estudados.

A variação da velocidade tangencial do centro até a parede do ciclone da seguinte maneira:

- No ciclone 1: varia de 0 a 19 m/s;
- No ciclone 2: varia de 0 a 18.5 m/s;
- No ciclone 3: varia de 0 a 20 m/s;
- No ciclone 4: varia de 0 a 16 m/s;
- No ciclone 5: varia de 0 a 17 m/s;
- No ciclone 6: varia de 0 a 21 m/s;
- No ciclone 7: varia de 0 a 15.5 m/s;
- No ciclone 8: varia de 0 a 15.5 m/s;
- No ciclone 9: varia de 0 a 17 m/s.

A velocidade tangencial máxima é quase o dobro da velocidade de entrada (10.2 m/s).

Todos os modelos apresentam uma tendência de aumento gradativo da parede ao centro até atingirem um valor máximo e após, diminuem rapidamente.

Segundo Patterson e Munz (1996) sugerem que a velocidade tangencial inicialmente 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.

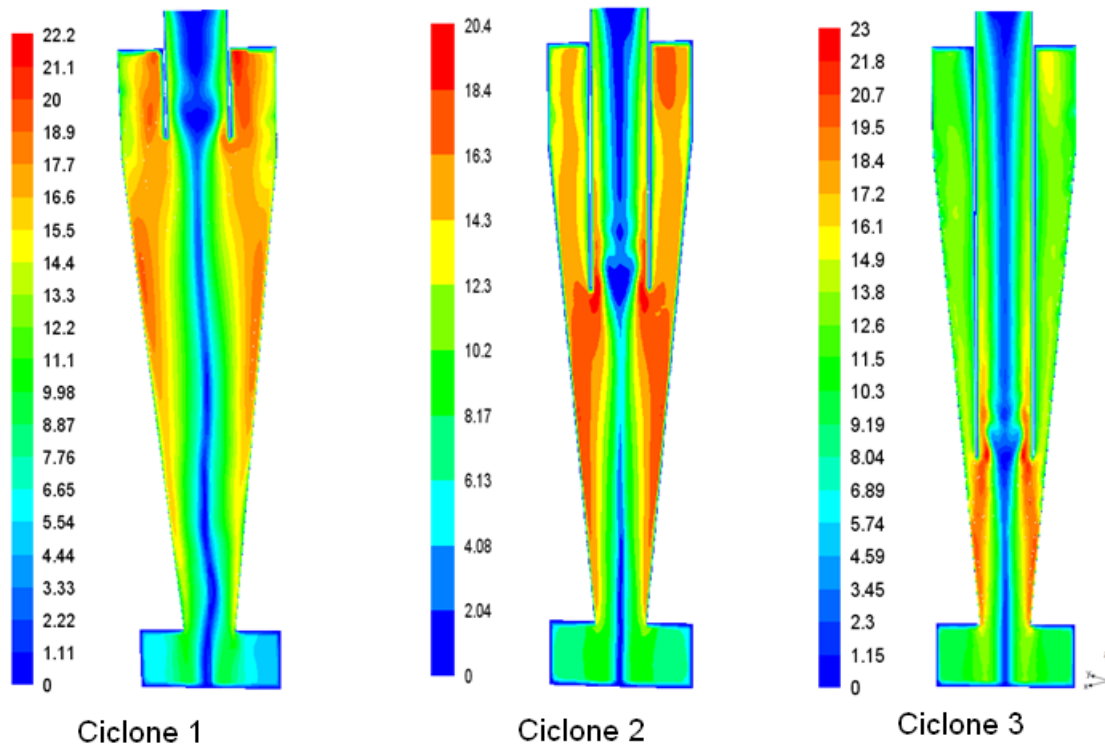


Figura 4.19 Perfil da velocidade tangencial simulado quando  $x=0$  no plano YZ nos ciclones 1, 2 e 3.

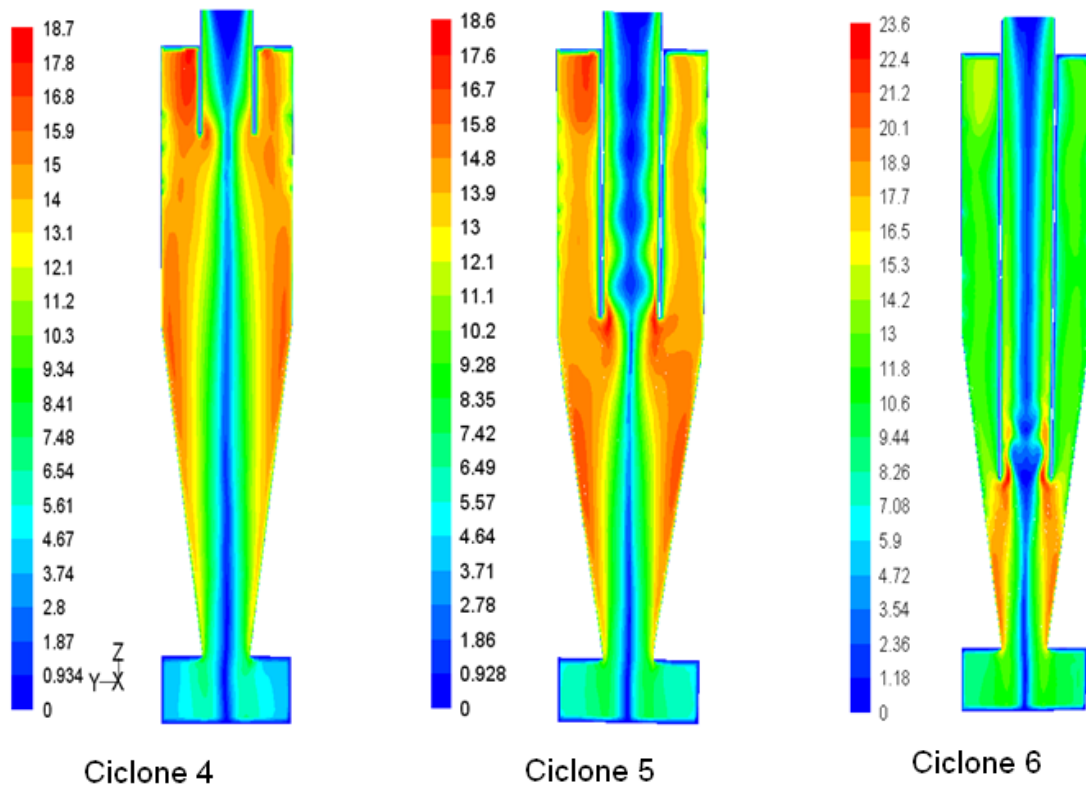


Figura 4.20. Perfil da velocidade tangencial simulado quando  $x=0$  no plano YZ nos ciclones 4, 5, e 6.

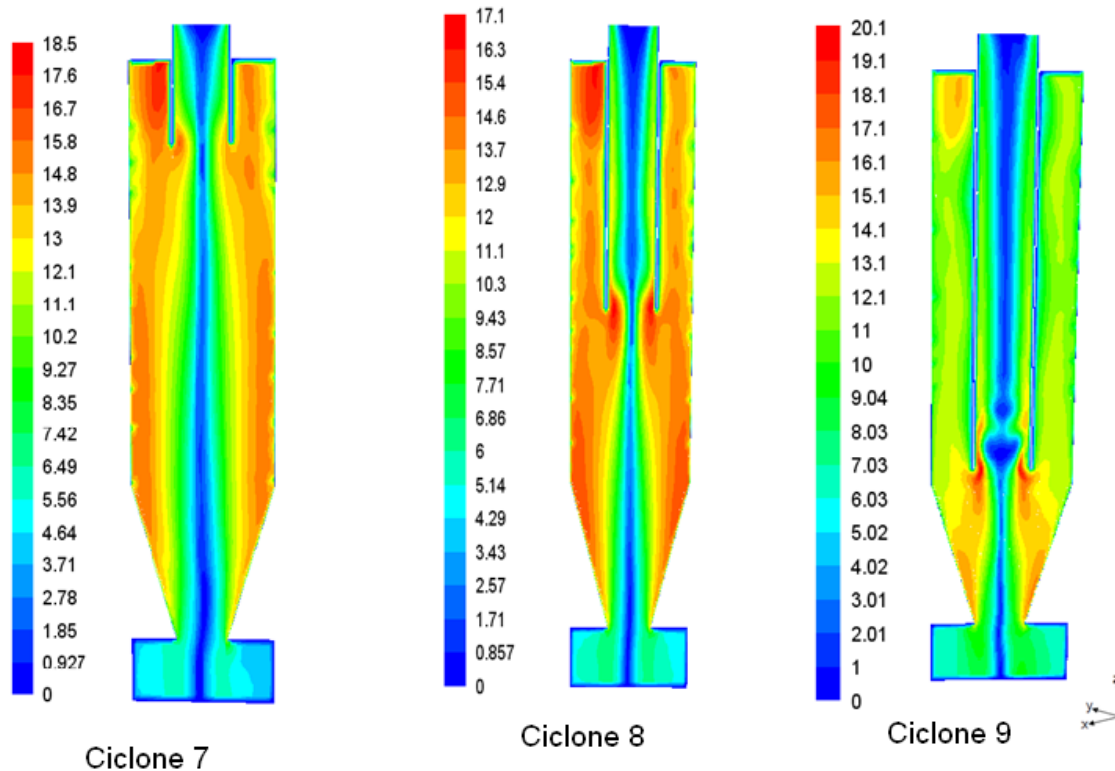


Figura 4.21 Perfil da velocidade tangencial simulado quando  $x=0$  no plano YZ nos ciclones 7,8 e 9.

#### 4.3.2 Fase dispersa

Após a convergência da fase contínua, analisados os valores obtidos da queda de pressão e determinado o tamanho e a quantidade ótima das malhas, se procede a realizar o tratamento da fase dispersa.

A seguir apresentam-se os resultados numéricos das simulações do escoamento bifásico: ar - rocha fosfática, fazendo uso da abordagem Euleriana – Lagrangeana. A fase particulada é considerada como diluída.

O parâmetro avaliado foi a eficiência de coleta. A simulação numérica foi realizada somente para partículas de  $1,33 \mu m$ , devido que para diâmetros maiores a eficiência simulada reportava valores muito altos.

Tabela 4.9 Condições da simulação bifásica

Fase Dispersa	Rocha fosfática
Diâmetro da partícula	1.33 ( $\mu\text{m}$ )
Velocidade de entrada	10.2 (m/s)
Vazão mássica	0.60398 (Kg/s)
Massa específica	3030 (Kg/m <sup>3</sup> )

### **Eficiência de coleta**

Os valores da eficiência de coleta experimental foram tomados da tese de mestrado de Scarpa (2000). A eficiência de coleta experimental foi medida mediante diferença de massa entre a entrada e a saída do ciclone.

Os dados da eficiência de coleta obtidos mediante a simulação para os diferentes ciclones são mostrados nas tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10. Eficiência de coleta experimental (Scarpa 2000) e eficiência de coleta simulada no FLUENT antes de realizar o afinamento das células.

Ciclone	Eficiência de Coleta (%)			% Desvio entre experimental e simulado	
	Experimental	Simulado		C.C. Padrão	C.C. UDF
		C.C. Padrão	C.C. UDF		
Ciclone 1	90	50	52	44,4	42,2
Ciclone 2	72	68	64	5,6	11,1
Ciclone 3	71	77	79	8,5	11,3
Ciclone 4	71	76	62	7,0	12,7
Ciclone 5	67	73	64	9,0	4,5
Ciclone 6	58	77	76	32,8	31,0
Ciclone 7	71	79	81	11,2	14,08
Ciclone 8	70	82	74	17,1	5,7
Ciclone 9	61	80	73	31,1	19,6

(C.C. Condição de Contorno)

Tabela 4.11. Eficiência de coleta experimental (Scarpa 2000) e eficiência de coleta simulada no FLUENT após o terceiro refinamento das células

Ciclone	Eficiência de Coleta (%)			% Desvio entre experimental e simulado	
	Experimental	Simulado		C.C. Padrão	C.C. UDF
		C.C. Padrão	C.C. UDF		
Ciclone 1	90	57	58	36,7	35,6
Ciclone 2	72	61	64	15,3	11,1
Ciclone 3	71	74	76	4,2	7,0
Ciclone 4	71	67	70	5,6	1,4
Ciclone 5	67	63	66	6,0	1,5
Ciclone 6	58	71	62	22,4	6,9
Ciclone 7	71	72	72	1,4	1,4
Ciclone 8	70	72	71	2,9	1,4
Ciclone 9	61	73	72	19,7	18,0

(C.C. Condição de Contorno)

Segundo os dados obtidos nas tabelas 4.10 e 4.11 se observa:

- Na tabela 4.10, considerando a condição padrão para o cálculo da eficiência de coleta se obteve boa aproximação da eficiência experimental para os ciclones 2, 3, 4, 5, 7 e 8 (sendo os desvios entre experimental e simulada menores que 15%). Já nos ciclones 1, 6 e 9 se obteve desvios percentuais altos entre a eficiência simulada e a experimental, em média superando os 26%.
- Com a finalidade de aproximar os dados simulados aos experimentais se fez uso de uma função definida pelo usuário (UDF) nas paredes do coletor, parede do cone e parede da superfície cilíndrica do ciclone. Os dados reportados da eficiência são observados também na tabela 4.10. Pode se observar que o uso da função definida pelo usuário melhorou na aproximação dos dados simulados aos experimentais.
- Na tabela 4.11 está a simulação efetuada após o terceiro afinamento das células, foi realizado inicialmente considerando a condição padrão



da simulação para o cálculo da eficiência. Pode ver-se que a porcentagem de diferença diminuiu nos ciclones cujas porcentagens eram altas (no ciclone 1 o desvio diminuiu de 44,44% para 36,67 e no ciclone 9 o desvio diminuiu de 31,14% para 19,67%)

- Logo depois nestas células refinadas também foi testado a função definida pelo usuário (UDF) no cálculo da eficiência de coleta, os dados desta simulação também são mostrados na tabela 4.11, pode se observar que os valores das eficiências de coleta obtidas mediante a simulação com a incorporação da função UDF sobre as células refinadas apresentam boa aproximação aos dados experimentais em quase todos os ciclones simulados, somente apresentaram altas porcentagem os ciclones 1 e 9 cujos desvios continuavam altos.

Conclui-se que o uso da função definida pelo usuário (UDF) mais o refinamento correto das células (mediante a função *adapt*) ajuda a reproduzir os dados experimentais da eficiência de coleta e queda de pressão em ciclones coletores de material particulado.

# CAPITULO 5

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### Principais conclusões

As principais conclusões obtidas deste trabalho são:

- A contribuição da Fluidodinâmica Computacional (CFD) no caso da caracterização do escoamento gasoso no ciclone permitiu obter dados fundamentais para o entendimento de problemas associados direta ou indiretamente ao escoamento gasoso no interior do equipamento.
- O ajuste de vários parâmetros como o dimensionamento das células, a função de tratamento da parede, o modelo de turbulência, etc. está diretamente relacionado à qualidade dos resultados de uma análise de CFD. Neste trabalho se mostra que a metodologia desenvolvida para a análise do escoamento na região próxima à parede (uso da função “*adapt*” e da função UDF) permitiu diminuir a porcentagem de diferença entre os valores experimentais e simulados.
- O aperfeiçoamento na qualidade das células nos ciclones permitiu obter previsões mais exatas.
- A comparação dos dados experimentais aos numéricos produziu resultados considerados adequados. No caso da queda de pressão existe semelhança com os dados obtidos por Scarpa (2000). Nos ciclones 1, 2, 6, 7 e 9, a diferença da queda de pressão entre os dados obtidos experimentais e os simulados foi menor que 10%. Os ciclones que apresentaram porcentagem superior a 20% foram os ciclones 3 e 8. Nestes ciclones existe a possibilidade ainda de melhorar a qualidade das células.

- O tratamento de parede melhorou os dados numéricos em todos os ciclones simulados.
- Segundo Scarpa (2000), o ciclone 1 seria o mais eficiente, mas isso não foi possível corroborar nas simulações.
- Após o terceiro refinamentos das células e considerando o uso da função definida pelo usuário (UDF) nos ciclones 3, 4, 5, 6, 7 e 8 a diferença entre a eficiência experimental e a simulada foi menor que 10%.
- As condições de contorno dadas pela função UDF melhoram um pouco os resultados da simulação em relação ao uso das condições de contorno padrão do FLUENT, mas a melhoria foi pequena.

### **Sugestões para próximos trabalhos**

Para uma melhor elaboração das malhas, o domínio dos ciclones foi dividido em pequenos subdomínios. Nas regiões onde as células ainda têm ângulos de distorção elevados (maiores que 0,5), sugere-se fazer mais divisões em ditos domínios. Estas regiões são o duto de entrada de ar e pó e o duto de saída do ar.

O algoritmo compilado na função UDF no FLUENT apresenta uma boa alternativa para determinar a eficiência de coleta em função das diferenças das energias (cinética e potencial), assim como a velocidade crítica da partícula, mas um refinamento do coeficiente de rebatimento pode melhorar o desempenho do modelo.

Sugere-se avaliar outros modelos de turbulência como, por exemplo, o modelo RSM.

Para uso de uma malha ainda mais refinada, sugere-se trabalhar com maior capacidade de processamento e memória de computador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER R., “Fundamentals of cyclone design and operation”, Proceedings of the Australasian Institute of Mineral Metallurgy, No. 152, pp. 203-228. 1949.
- ALVES N. J. “Modelagem fenomenológica e simulação bidimensional da fluidodinâmica de reatores de leito fluidizado Circulante”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de campinas, Brasil, 1998.
- AVCI A., KARAGOZ I., “A mathematical model for the determination of a cyclone performance”, Internatonal Communications in Heat and Mass transfer, Vol 27, Issu 2, February 2000, pp 263 – 272.
- 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.
- BERNARDO S., PERES A. P, Mori M., “Computational Study of cyclone flow fluid dynamic using a different inlet section angle”, Thermal Engineering, Vol. 4 · No. 1 · June 2005 · p. 18-23.
- BINGTAO Z. “A theoretical Approach to Pressure Drop across Cyclone Separator”. Chemical Engineering & Technology, volume 27, issue 10, p. 1105-1108, 2004.
- BOYSANT, F., AYERS, W. H., SWITHENBANK, J., “A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design”. Institution of Chemical Engineers, Vol. 60, pp 222-230, 1982.
- CAPLAN, K. J., “Source control by centrifugal force and gravity, Air Pollution, Sources of Air Pollution and their Control”, Vol 3, pp. 359-407, 1968.
- CASAL J., J.M. MARTINEZ-BENET, E. VALENCIA,. “Cálculo y diseño de ciclones”, Ingeniería química, Vol. 2, pp. 115-124. 1989

CFD Online, On-line Center for Computational Fluid Dynamics, <http://www.cfd-online.com/>.

CORRÊA, J. L. G., “Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos”. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – Brasil, 2003.

CORTÉS C., GIL A., “Modeling The gas and Particle Flow Inside Cyclone Separators”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 33, p 409-452, 2007.

CORTÉS C., GIL A., “Modelo experimental de flujo frio Del ciclón primário de una planta de lecho fluido a presión”. Tese Doutorado, Universidade de Zaragoza, Zaragoza - España. 2000.

CRISTEA, E. D., MALFA, E., “3D Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln Pre-Heater Top Cyclone”. *Anais of Fluent European User's Group Meeting*, Harrogate, pp 18, U. K, 1994.

CRISTEA, E. D., COGUE, A., “3D Numerical Computation and Validation of High Solid Loading Flow Inside a Gas Cyclone Separator”, *Proceedings of FEDSM' 98: ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting* Washington, DC, 7pp, 1998.

DUARTE. C. R., “Estudo experimental de simulações Fluidodinâmicas e Recobrimento em Leito de Jorro”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – Brasil, 2006.

FERHAT M. E. “Local measurements and Computacional Fluid Dynamic Simulation in a gas – Liquid Cylindrical Cyclone Separator”, thesis Doutorado University of Tulsa – USA, 2001.

## FLUENT 6.3 DOCUMENTATION

Fluent Inc. (2006). *Fluent 6.3 UDF Manual*

Fluent Inc (2006). Fluent 6.3 Tutorial Guide

Fluent Inc (2006). Fluent 6.3 User's Guide

Fluent Inc (2006) Fluent 6.3 Getting Started Guide

#### GAMBIT 2.4 DOCUMENTATION

Gambit User's Guide

Gambit Modeling Guide

Gambit Tutorial Guide

GIMBUN, J., et, al. "Prediction of the Effects of Cone Tip Diameter on the Cyclone Performance". *Aerosol Science*, vol.36, pp 1056-1065, 2005.

GRIFFITHS A.J., YAZDABADI P.A, N. SYRED,. "Alternate eddy shedding set up by the nonaxisymmetric recirculation zone at the exhaust of a cyclone dust separator", *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 120, 1998

HOFFMANN, A. C., GROOT, M., PENG, W., DRIES, H. W. A., KATER, J., "Advantages and Risks in Increasing Cyclone Separator Length", *AIChE Journal*, vol. 47 n<sup>o</sup> 11, pg. 2452-2460, 2001.

HOFFMANN, A. C., STEIN, L. E., *Gas Cyclone and Twirl Tubes: Principles, Design and Operation*. Springer , 2002.

JIMÉNEZ J., C. GUTIERREZ, J. BARBOZA, L MOREMO, "Flow Patterns in cyclone separation system", *Informacion Tecnologica*, Vol 19, No 19 2008, pp 29-36.

JIL M. A, "Modelo experimental de Flujo Frio del ciclón Primario de una Planta de Leco Fluido a Presion", *Tese de Doutorado, Universidad de Zaragoza – España*, 2000.

- JIWU L. E., WEIJAIAM C, “Numerical Simulation flow velocity distribution in cyclone with impulse electrostatic excitation”, *Journal of Electrostatic*, Vol 66, pp 438-444, 2008.
- KARAGOZ I., AVCI A., “Modeling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separator”, *Aerosol Science and Technology*, vol 39, pp 857 – 865 - 2005.
- MALISKA, C. R., “Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacionais”, Rio de Janeiro: Ed LTC, segunda edição, 2004.
- MANCUSO S., “Métodos numéricos euleriano-lagrangeano para leis de conservação”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, 2008.
- MASSARANI G., “Fluidodinamica em Sistemas Particulares”, Ed. UFRJ Editora, Rio de Janeiro, 1997.
- MEI C., “Characteristics of the Vortex Structure in the Outlet of a Stairmand Cyclone: Regular Frequencies and Reverse Flow”, tese de Mestrado, University of Alberta, Canada, 1999.
- MEIER, H. F., “Modelagem Fenomológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinamica Computacional pessoal”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Campinas – Brasil, 1998.
- MEIER, H. F., Alves, J. J. N. e Mori, M. “Comparison of finite volume Method with Staggered and colocated grids for multiphase flow”, XVIII Congresso Ibero Latino Americano de Metodos Computacionais para Engenharia, Vol I, pp 957-964, Outubro, 1997.
- MOTHES, H. L., AND LOFFER., “Motion and deposition of particle in a cyclone”, *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 56, pp 714-715, 1984.

MUSCHELKNAUTZ, E. "Design of cyclone separators in the engineering practice", Staub-Reinhalt, Luft, Vol 30, 1970.

LEITH, D., LICHT, W., "The Collection Efficiency of cyclone Type Particle Collectors: A New Theoretical Approach". AIChE Symp, v.68, n. 128, pp 196-206, 1972.

LINDEN A. J, "Investigations into cyclone dust collectors". Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers, vol. 160, pp.233-240. – 1949.

OLIVEIRA M. K., "Geração de Malhas Bidimensionais", tese mestrado, Universidade Estadual Paulista Unesp, Ilha Solteira –SP, Brasil, 2005.

PALADINO, E. E., "Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo de pressão diferencial". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2001.

PATANKAR, S. V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". New York, USA: McGraw-Hill, 1980.

PATTERSON P.A., MUNZ R.J., "Gas and particle flow patterns in cyclones at room and elevated temperatures", Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 74, pp. 213-221. 1996.

PERES, A. P., MEIER, H. F., HUZIWARA, W. K., MORI, M., "Experimental Study and Advances in 3D Simulation of Gas Flow in Cyclone Using CFD", European Symposium on Computer Aided Process Engineering, n<sup>o</sup> 12, pg. 943-948, 2002.

PERRY H.,Perry's, "Chemical Engineers' Handbook", New York, USA: McGraw-Hill, 1997.



- PINTO J. LARANGEIRA P., “Métodos Numéricos em problemas de Engenharia Química”, Editora UFRJ, 2001.
- SHEPPERD, C. B. LAPPLE, C.E. “Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors”, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 31, pp. 972-984. 1939.
- SEVILLE, J. P. K., INGRAM, A.; PARKER, D. J. “Probing processed using positrons”. *Trans Inst Chem. Eng*, Vol 7, PP 778-793, 1997.
- SIMÕES M., “Simulação numérica da fluidodinâmica de hidrociclone aplicado na separação de óleo/água”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba- Brasil, 2005.
- SCARPA D. A., “Influência de Características Geométricas no desempenho de um ciclone”, Tese mestrado, Universidade Federal São Carlos, São Paulo – Brasil, 2000.
- STAIRMAND C.J.,. “The design and performance of cyclone separators”, *Transactionsof the Institute of Chemical Engineers*, Vol. 29, pp. 357-383. 1951.
- Swanson, P.D.; Muzzio, F.J.; Annapragada, A.; Adjei,A. (1996). Numerical analysis of motion and deposition of particles in cascade impactors, *Int. J. Pharm.*, v. 142, 33 – 51.
- WILCOX, D. C., “Turbulence modeling for CFD”, Second Edition, DCW Industries, Inc. 1993.
- YAJNIK K. S e SUBBIAH M. V. “Experiments on Swirling turbulent flows, Part 1 Similarity in swirling flows”, *J. Fluid Mechanics*, 60, (4) 1973

- YUU et al. (1978), "The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone", *Chemical Engineering Science*, 33, pp. 1573-1580 (1978)
- ZHANG, X.; WANG, L.; ZHU, K., "Particle tracking and particle-wall collision in a wire-plate electrostatic precipitator", *Electrostatics*, Vol 63, pp 1057-1071, 2005.
- ZHOU L.X, SOO S.L., "Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator", *Powder Technology*, Vol. 63, pp. 45-53. 1990.
- VERGINI, A., "Modelagem multifasica euleriana-euleriana para simulações numericas de ciclones", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo – Brasil, 2007.
- VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics". Longman Group Ltd, Malaysia, 1995.
- VIEIRA, L.G.M, "Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, 2001.
- XIANG, R. B., LEE, K. W., "Numerical Study of Flow Field in Cyclones of Different Height", *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44, pg. 877-883, 2005.

## APÊNDICE A

### Gráficos da evolução do resíduo

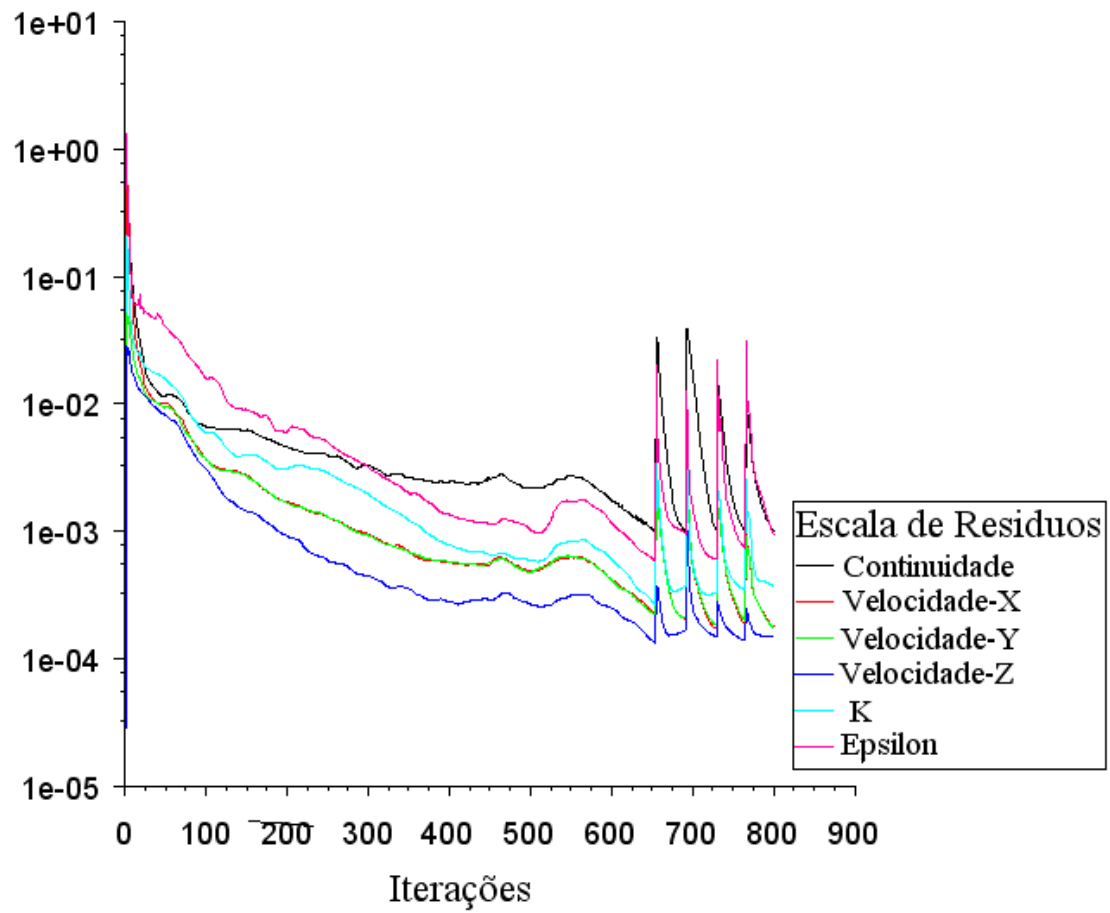


Figura A1- Evolução do resíduo ciclone 1

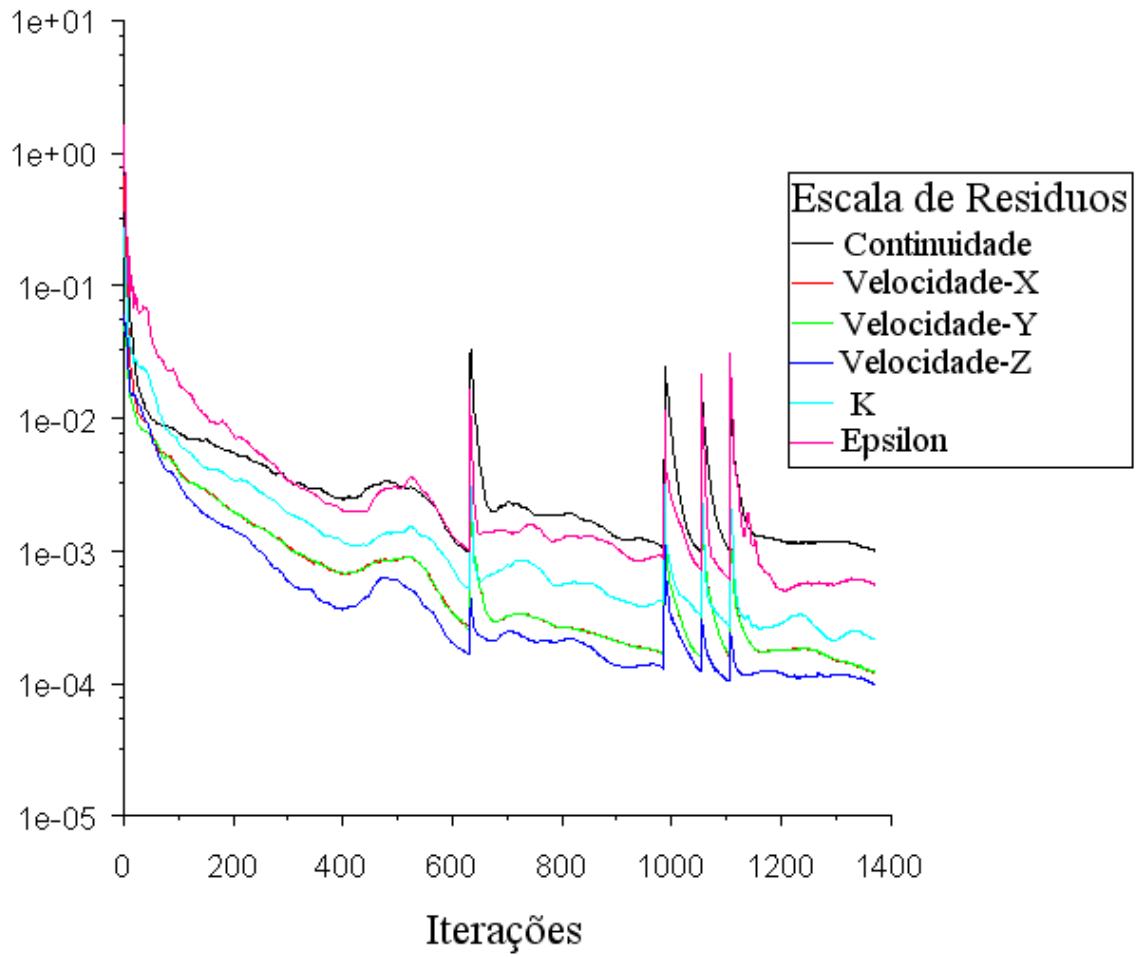


Figura A2- Evolução do resíduo ciclone 2

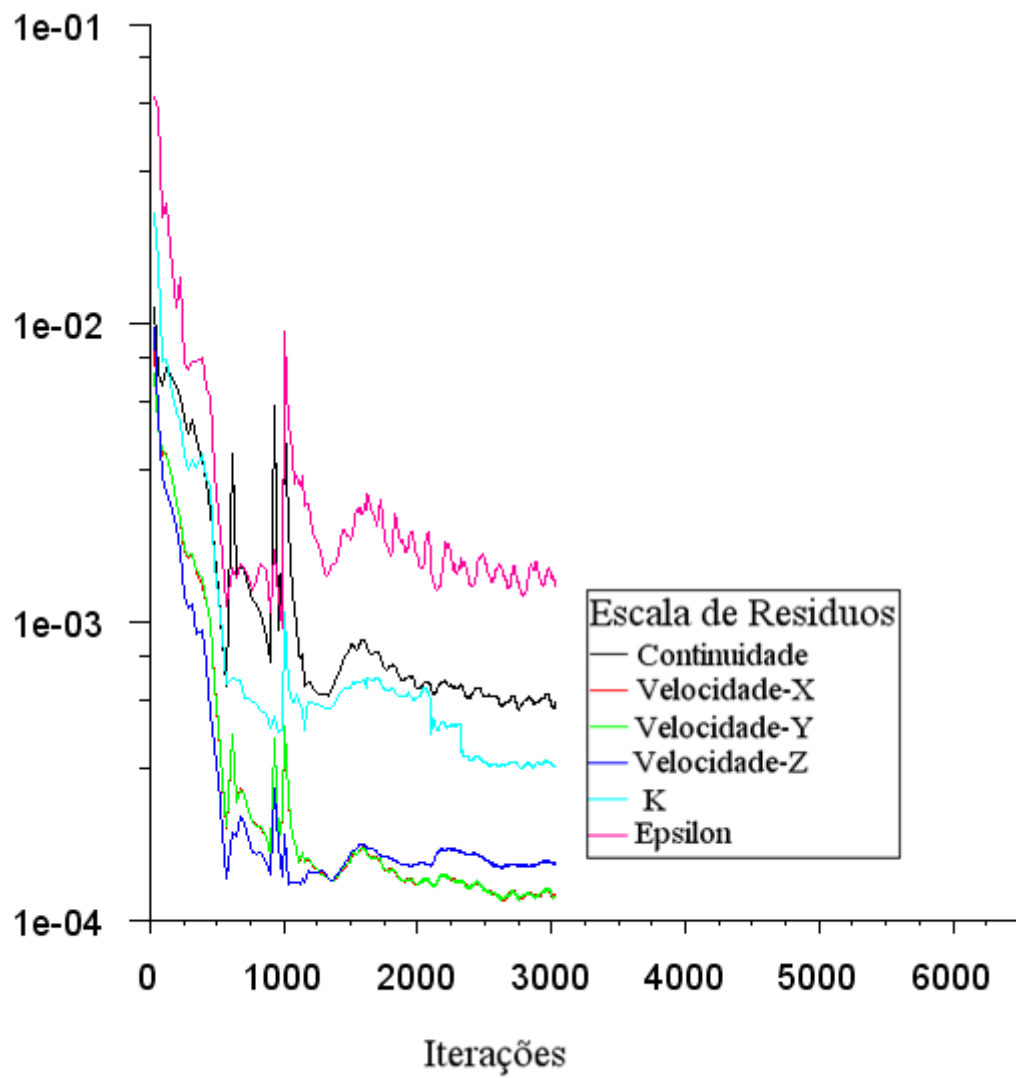


Figura A3- Evolução do resíduo ciclone 3

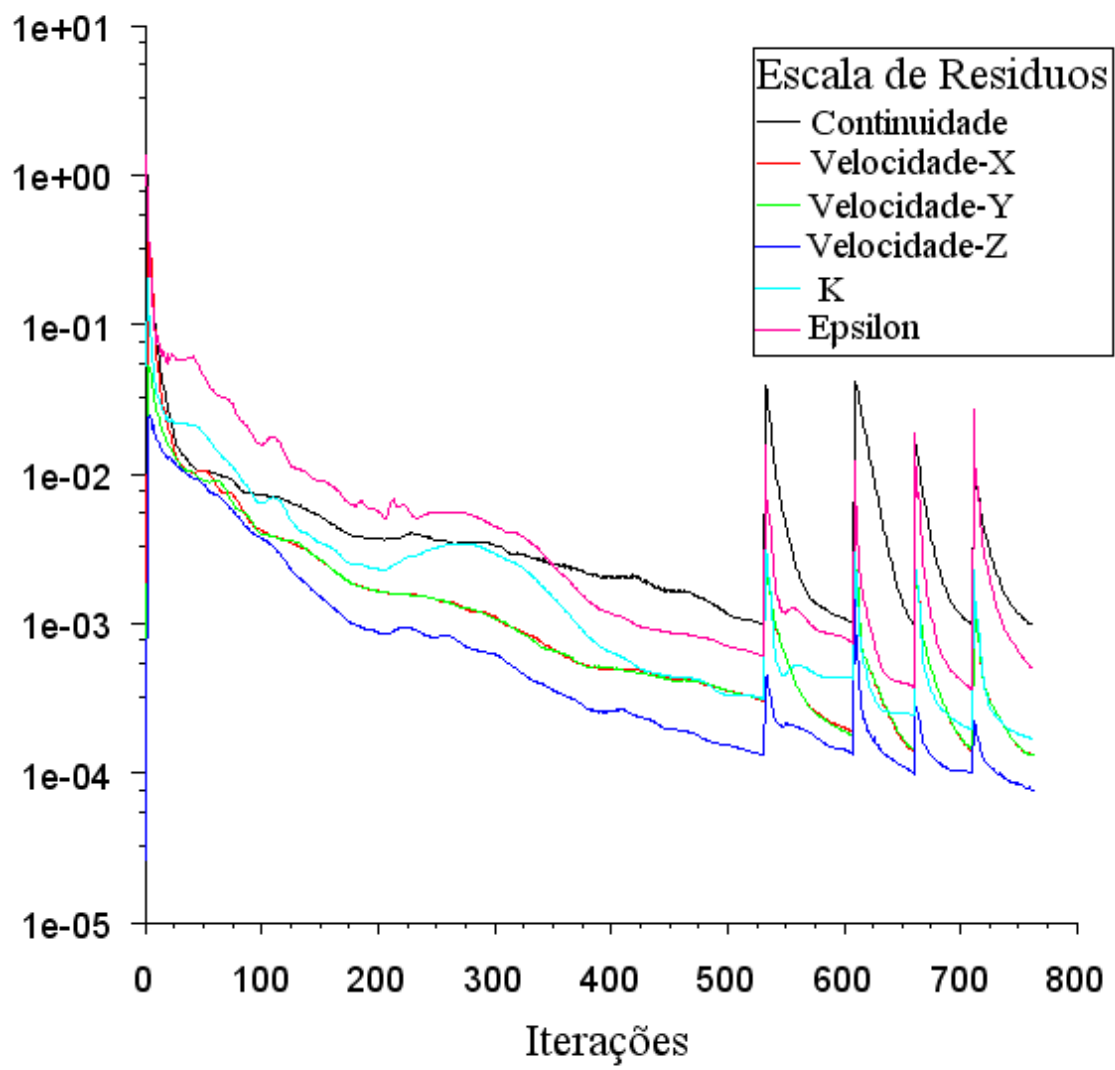


Figura A4- Evolução do resíduo ciclone 4

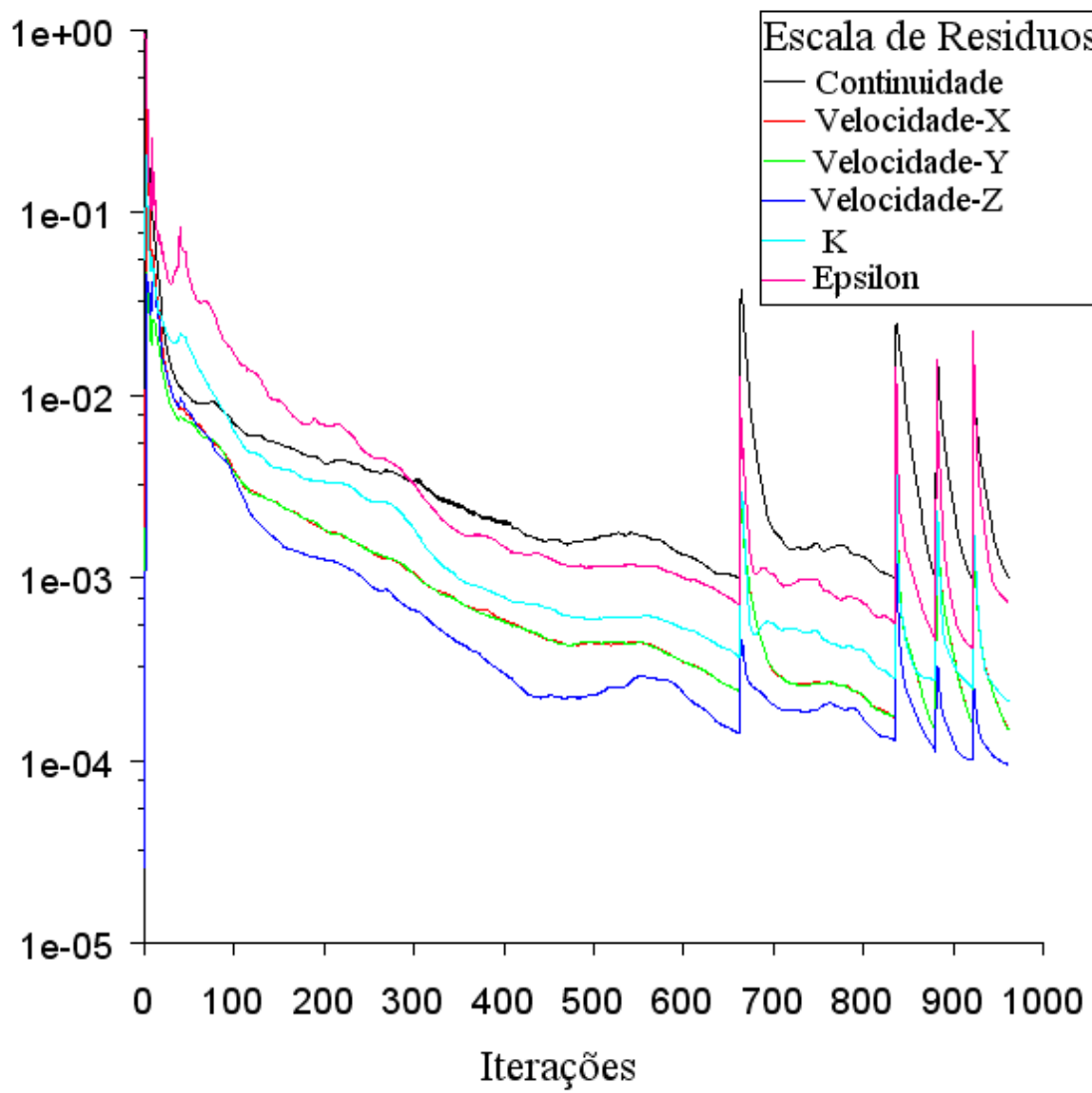


Figura A5- Evolução do resíduo ciclone 5



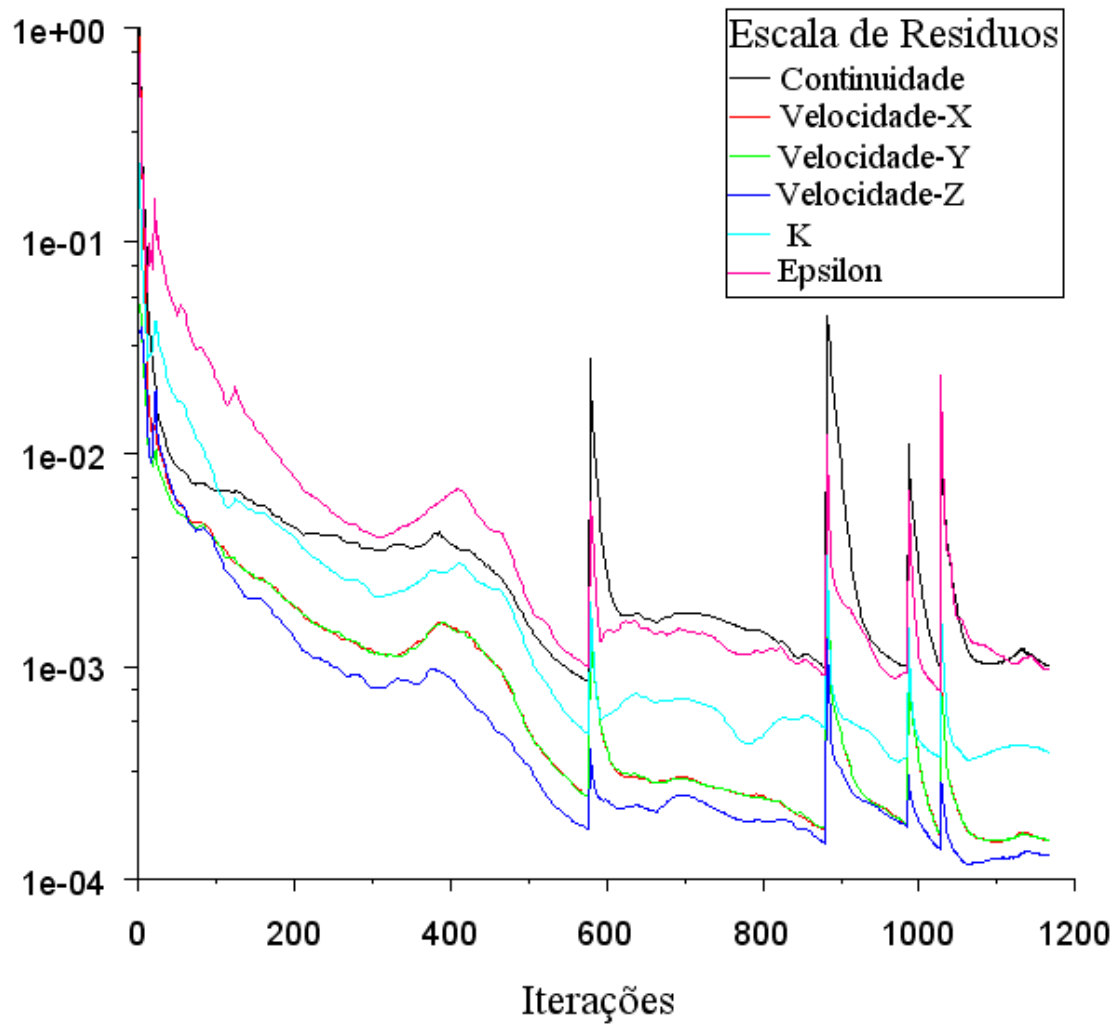


Figura A6- Evolução do resíduo ciclone 6

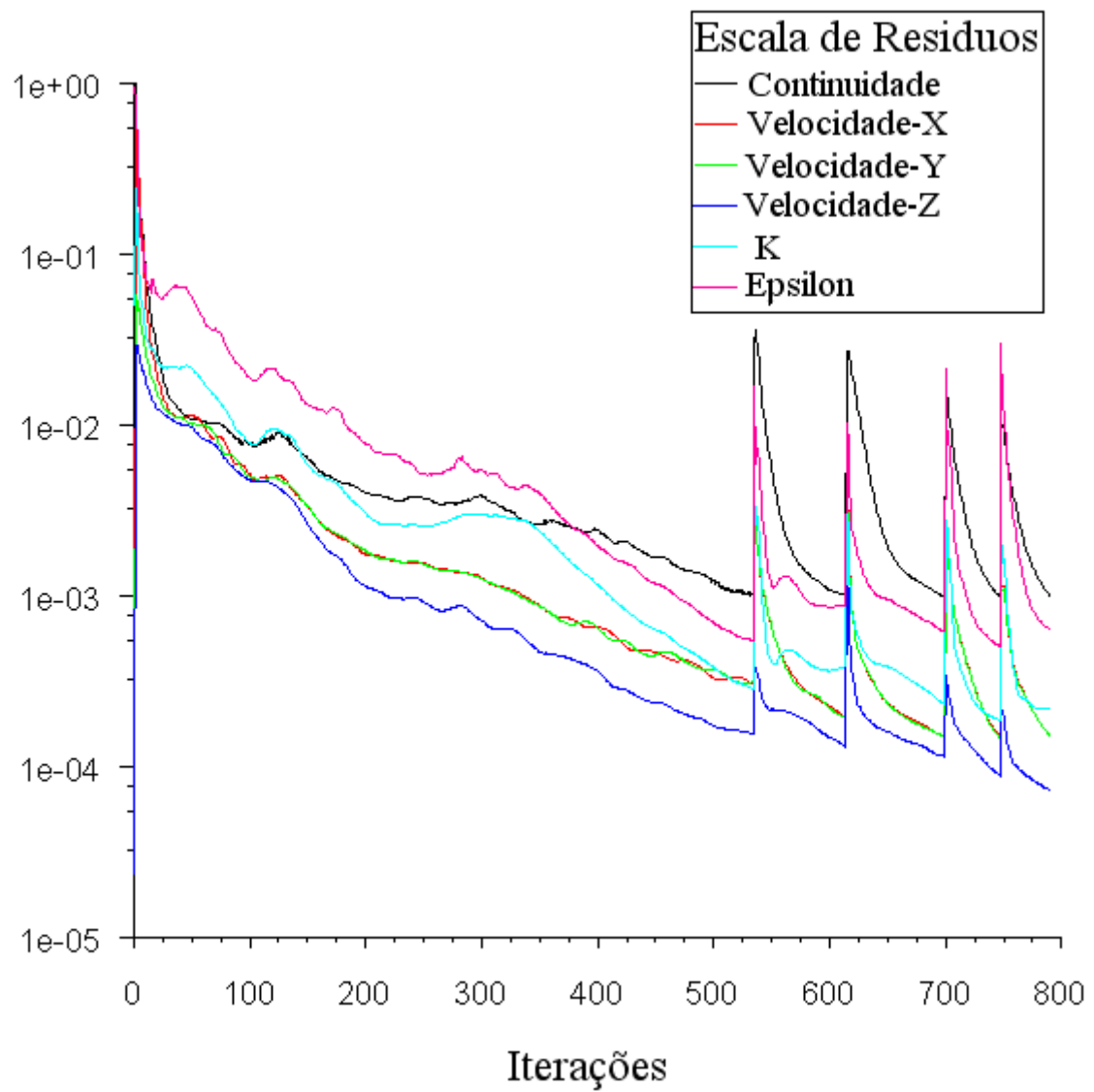


Figura A7- Evolução do resíduo ciclone 7

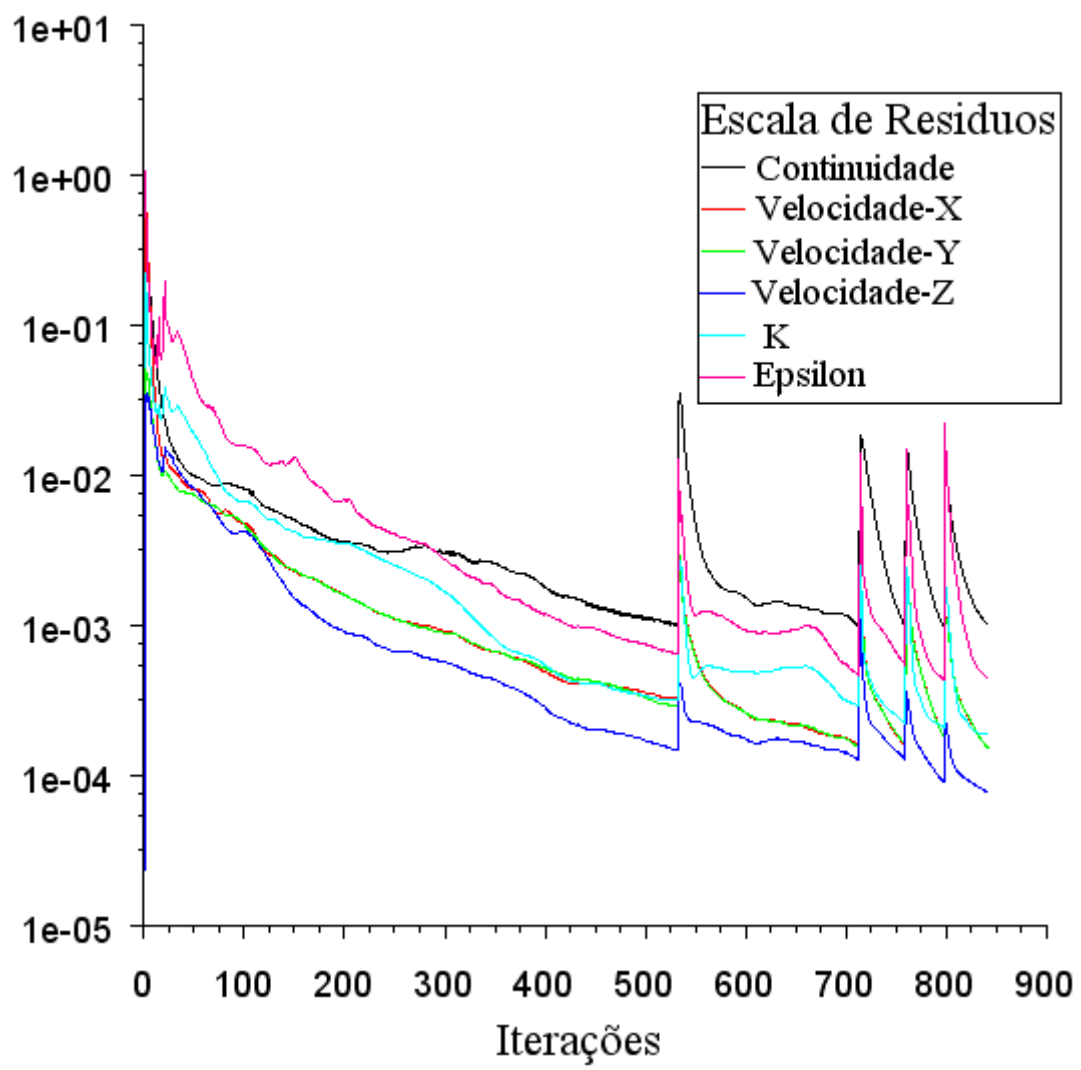


Figura A8- Evolução do resíduo ciclone 8

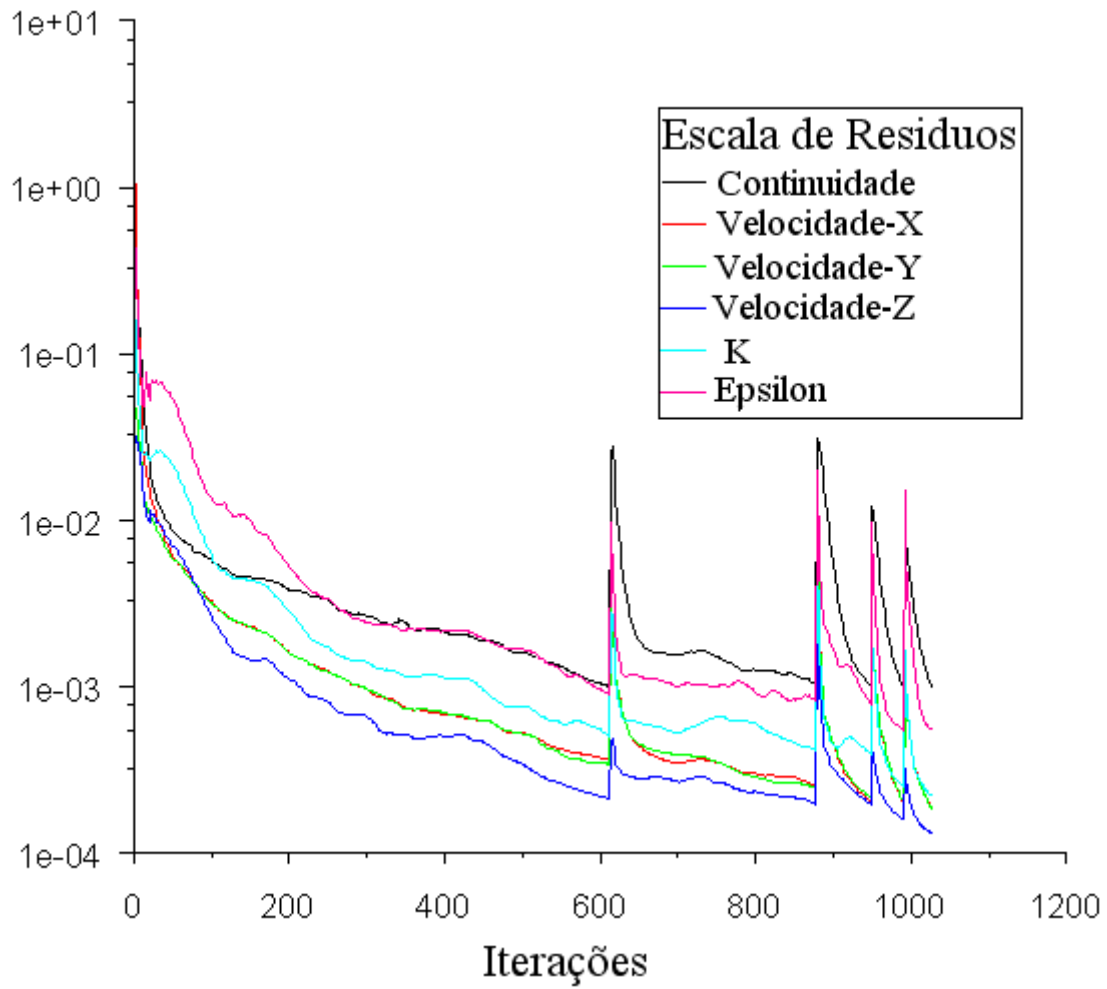


Figura A9- Evolução do resíduo ciclone 9

## APENDICE B

PERFIL DA MALHA ANTES Y DEPOIS DE  
FAZER USO DA FUNÇÃO ADAPT

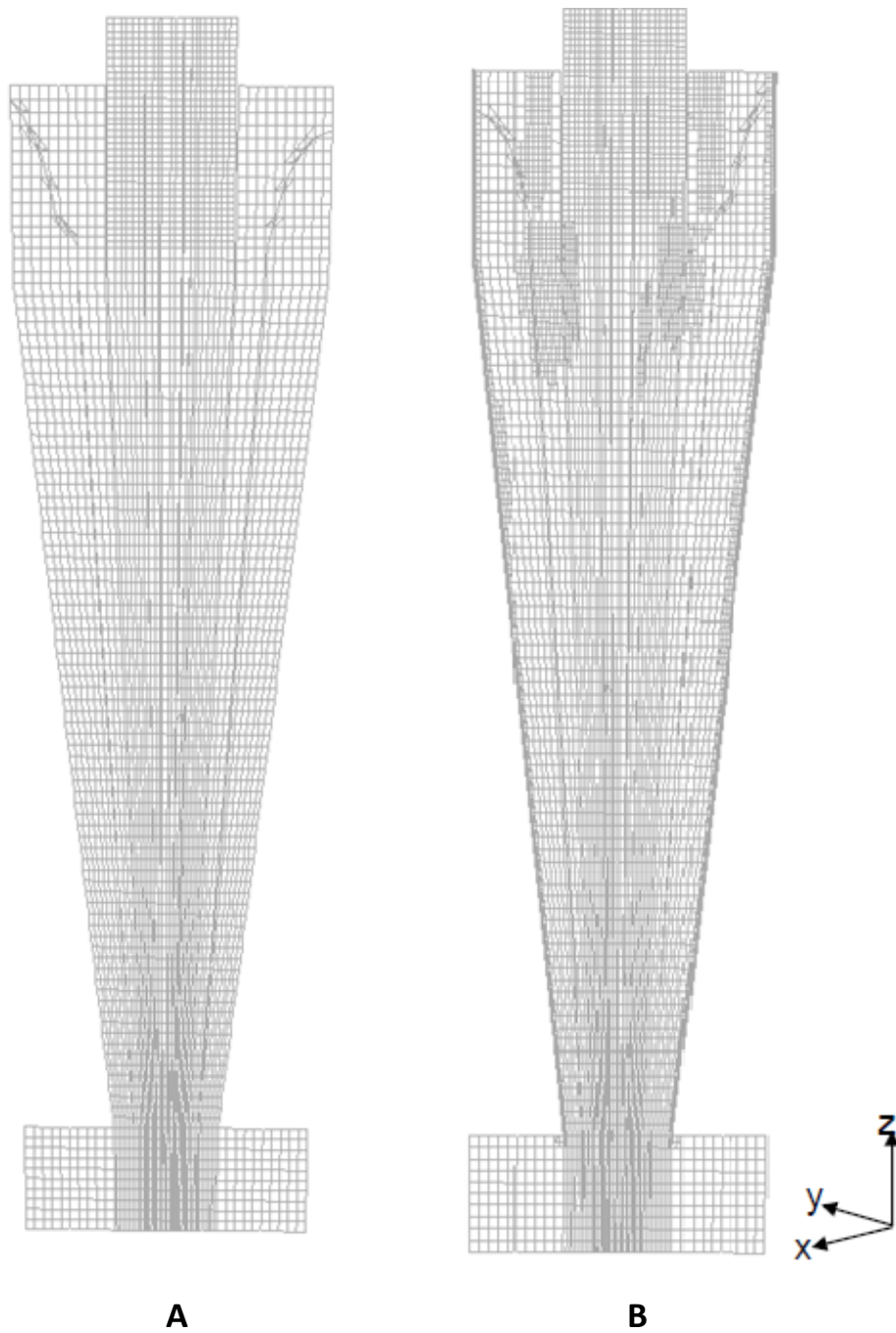


Figura B1 - Ciclone 1, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

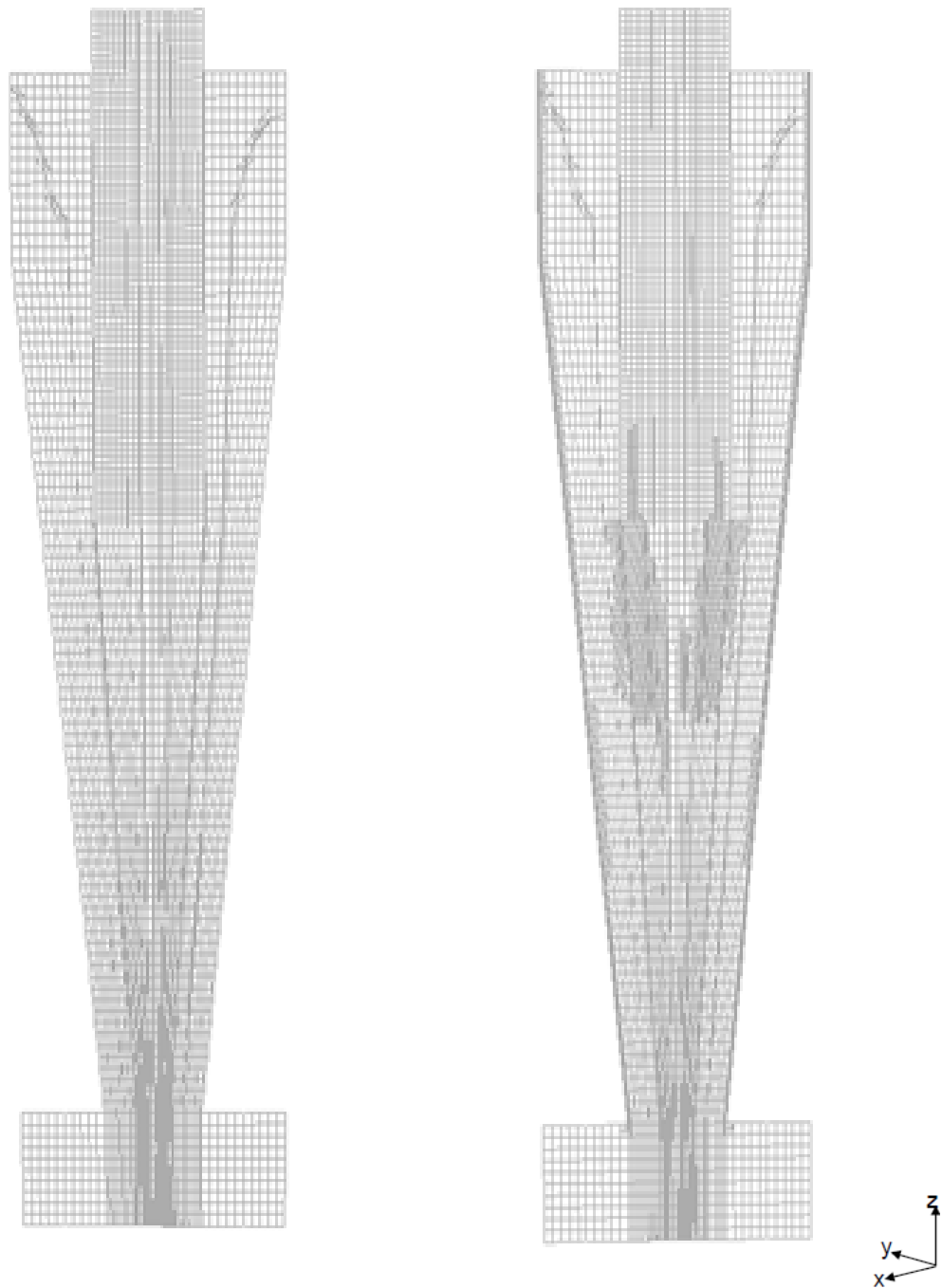


Figura B2 - Ciclone 2, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

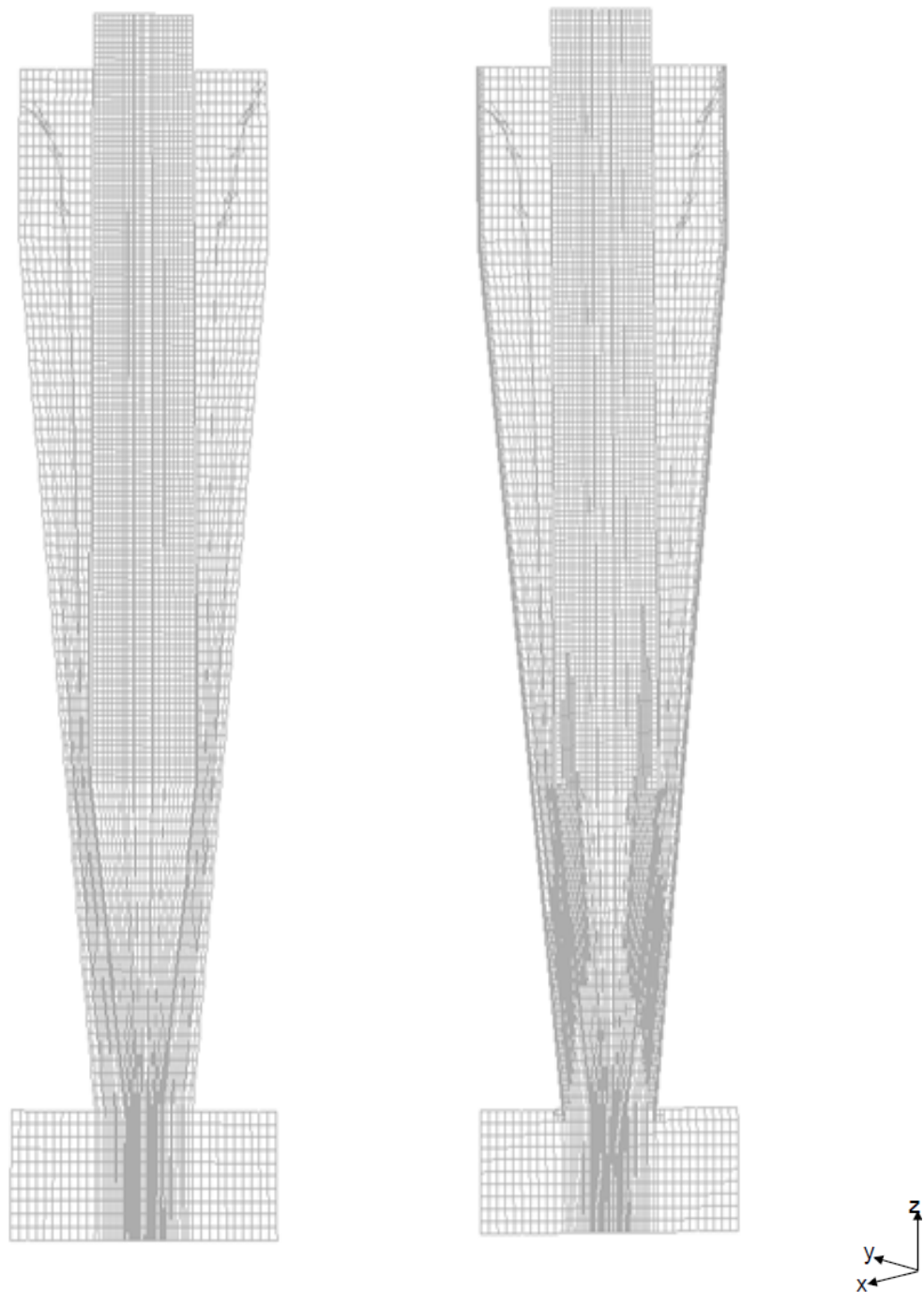


Figura B3 – Ciclone3, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).



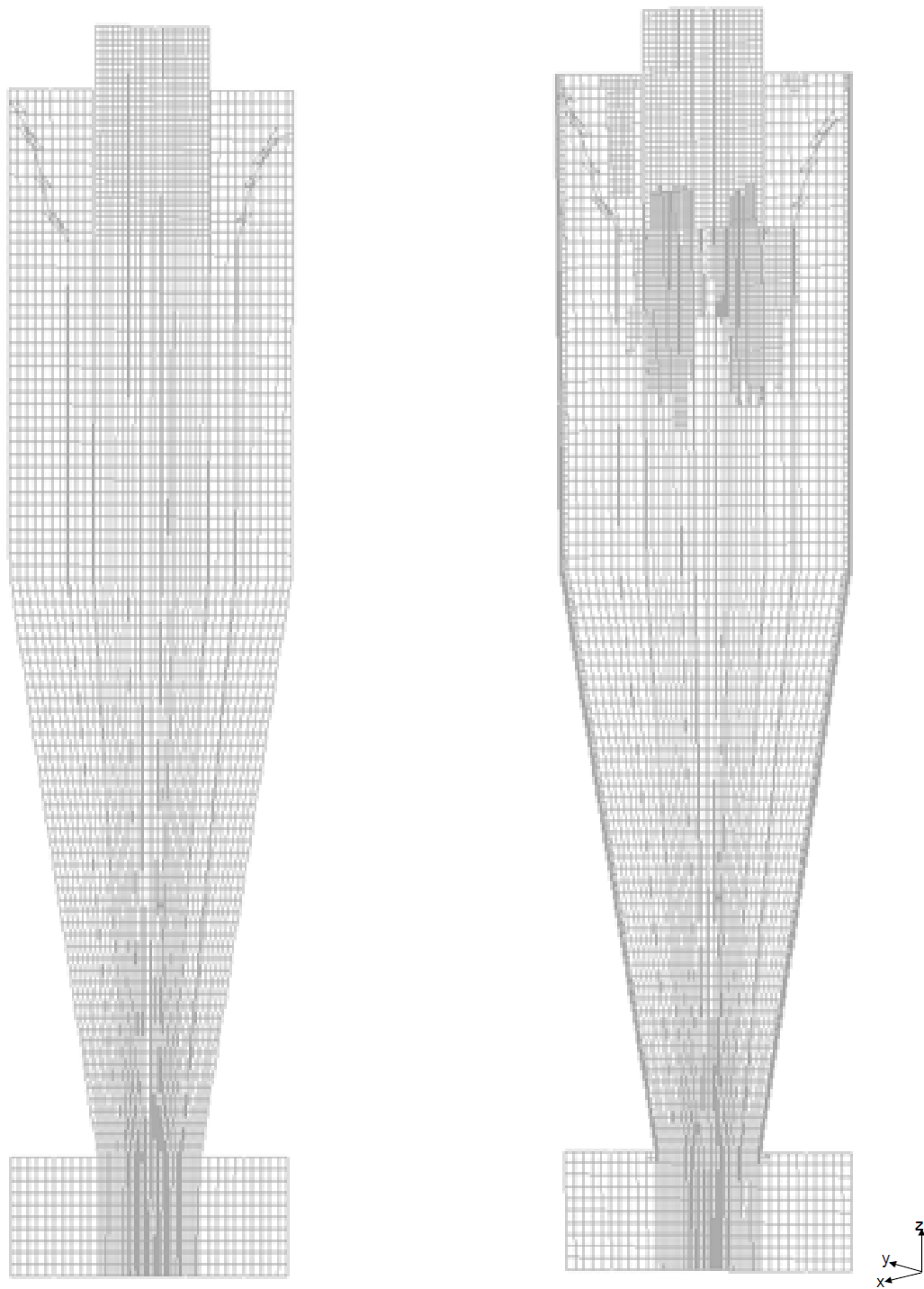


Figura B4 – Ciclone4, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

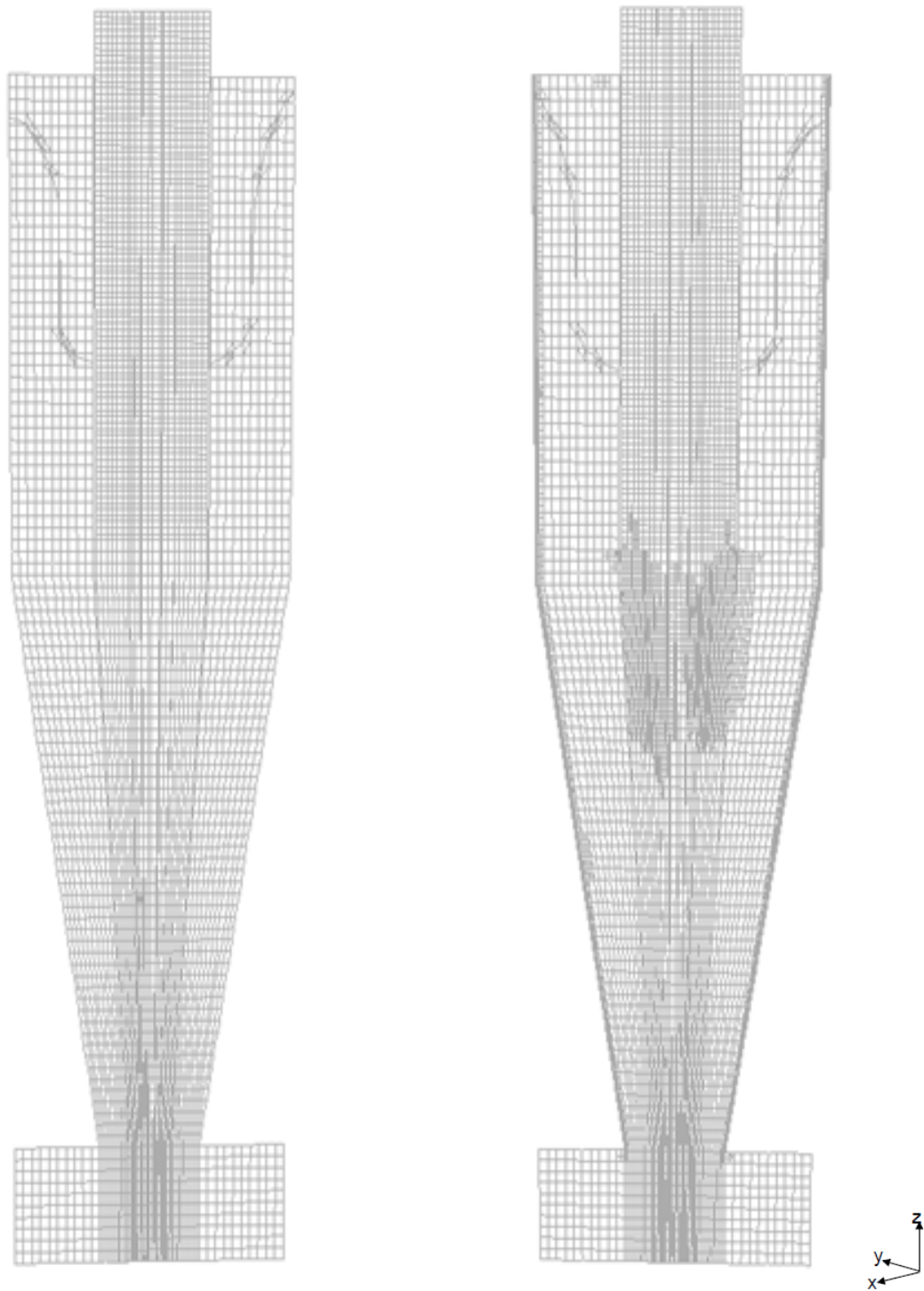


Figura B5 – Ciclone5, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

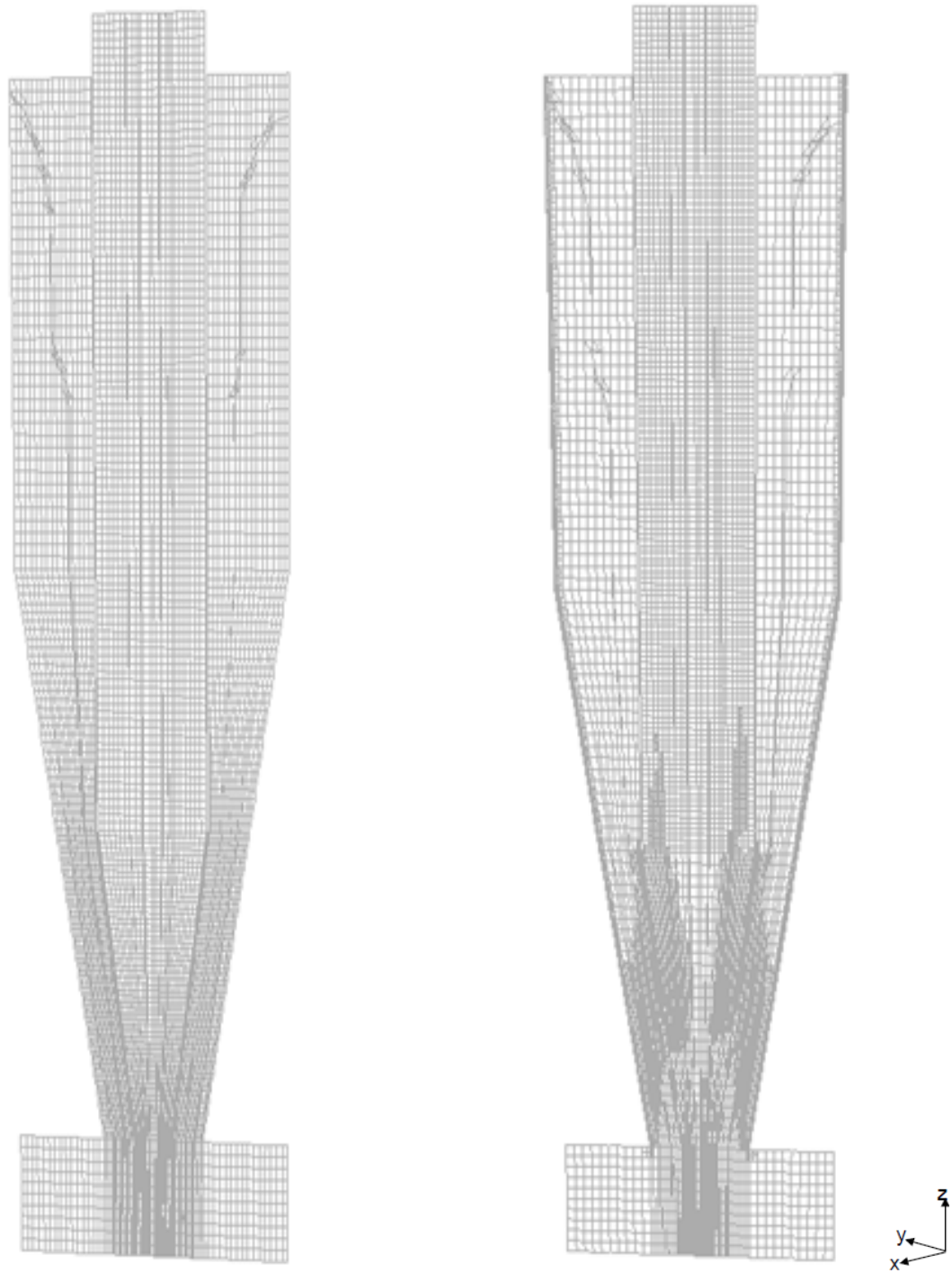


Figura B6 – Ciclone6, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

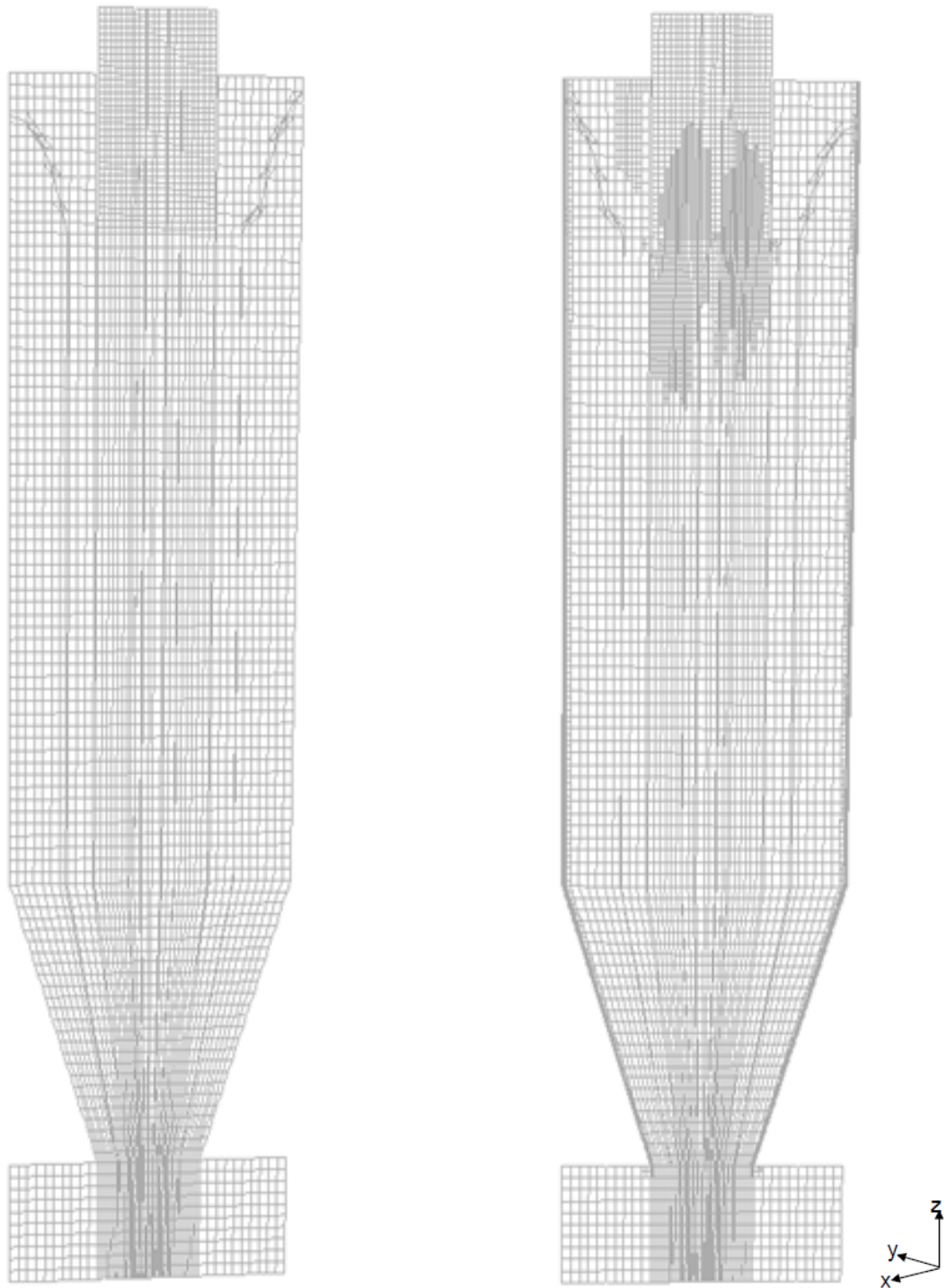


Figura B7 – Ciclone7, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

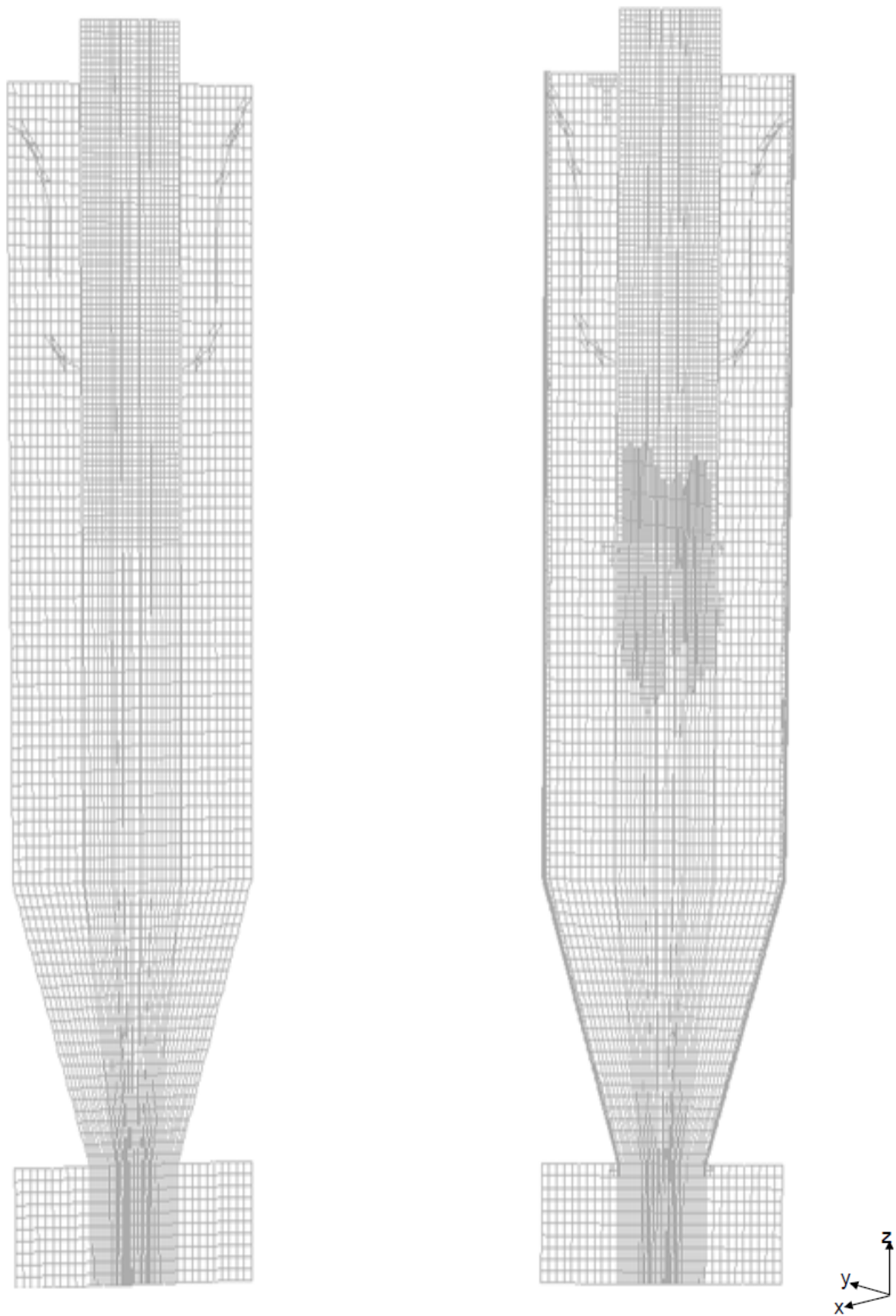


Figura B8 – Ciclone8, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

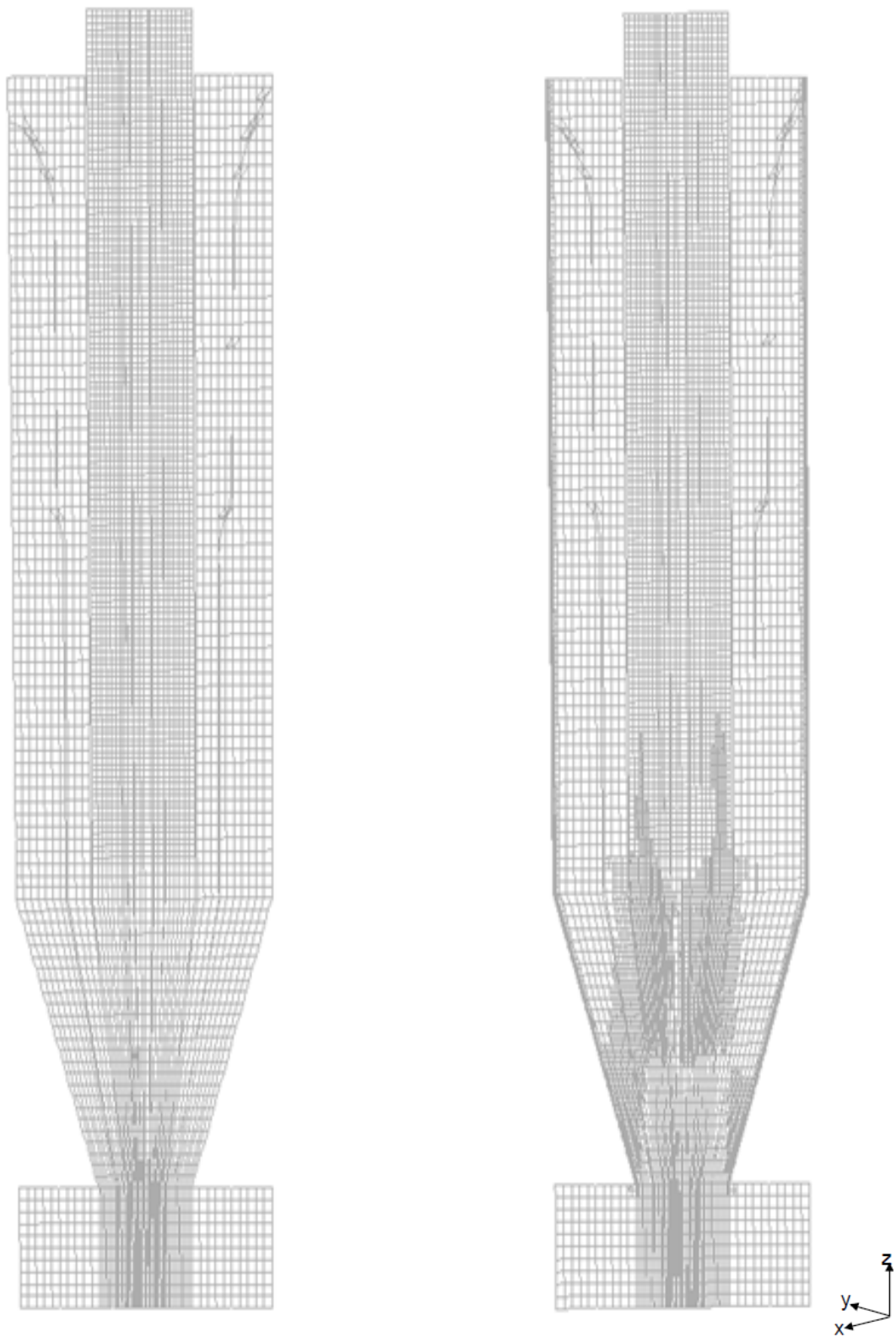


Figura B9– Ciclone9, plano ZY quando  $x=0$ , A) perfil de distribuição das células ante do refinamento (A) depois do refinamento (B).

## APENDICE C

GRAFICOS DA QUEDA DE PRESSÃO, VELOCIDADE AXIAL E  
VELOCIDADE TANGENCIAL POR NIVEIS NOS CICLONES

# CICLONE 1

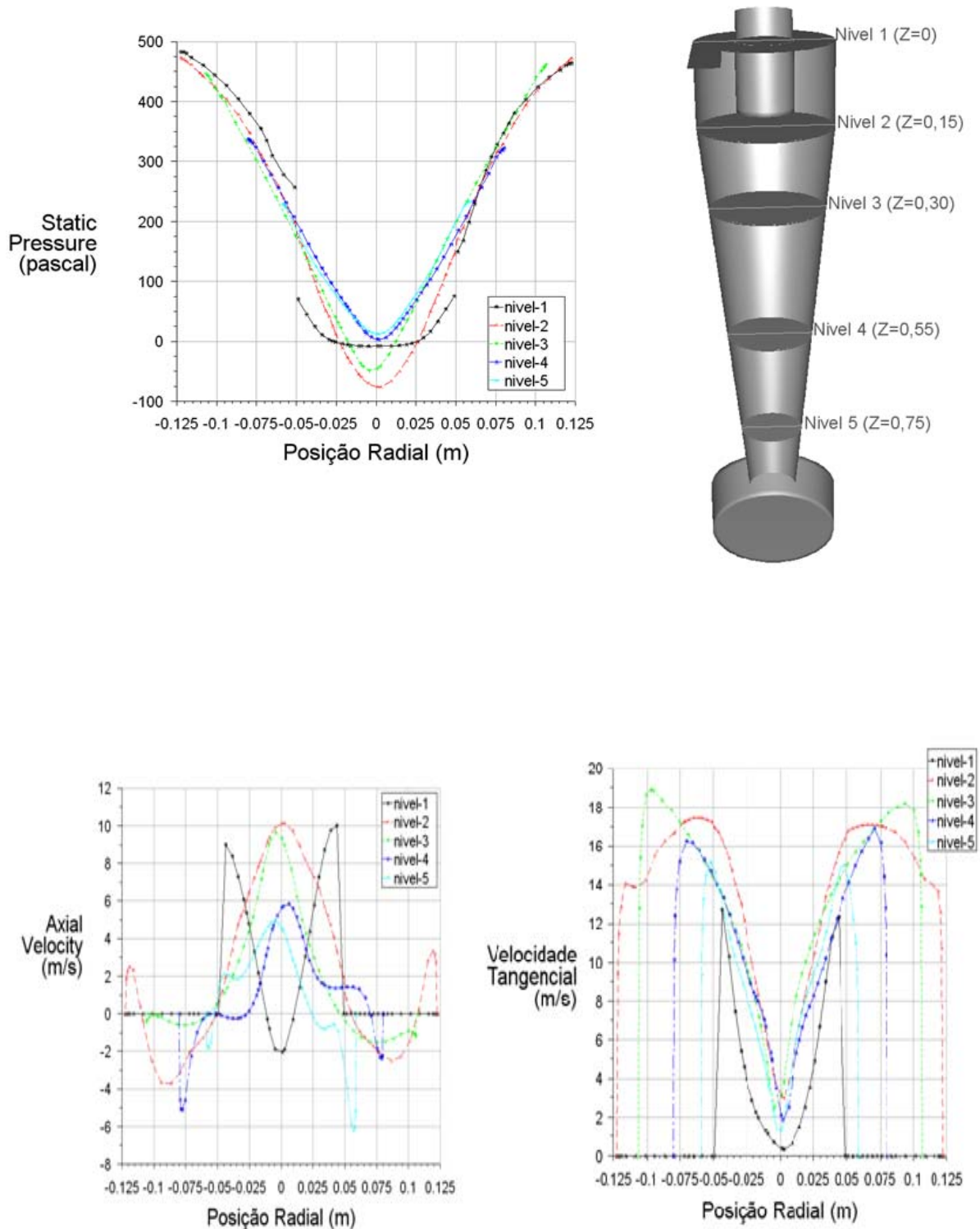


Figura C1– Ciclone 1 queda de pressão, velocidade axial e tangencial.



## CICLONE 2

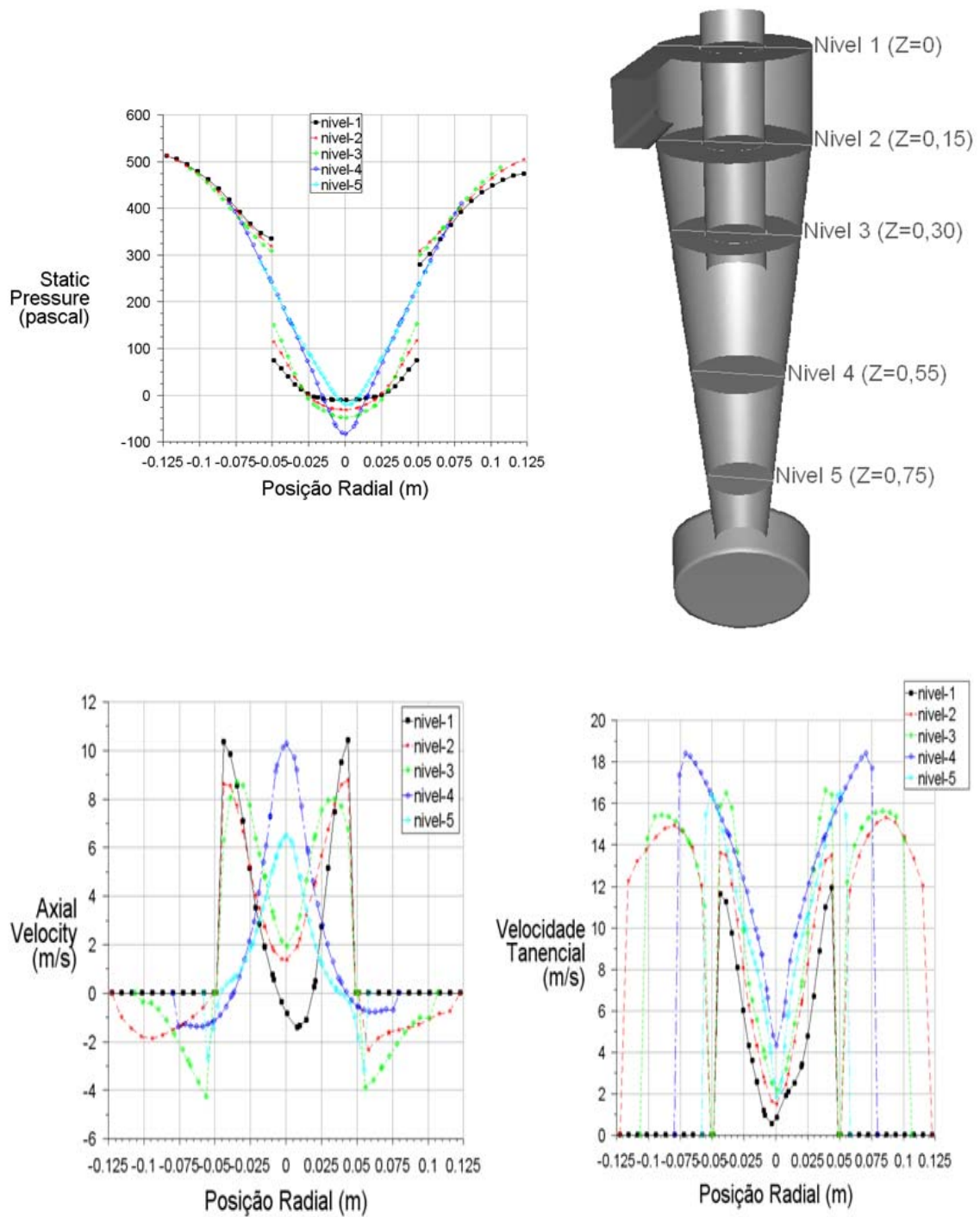


Figura C2– Ciclone 2: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

## CICLONE 3

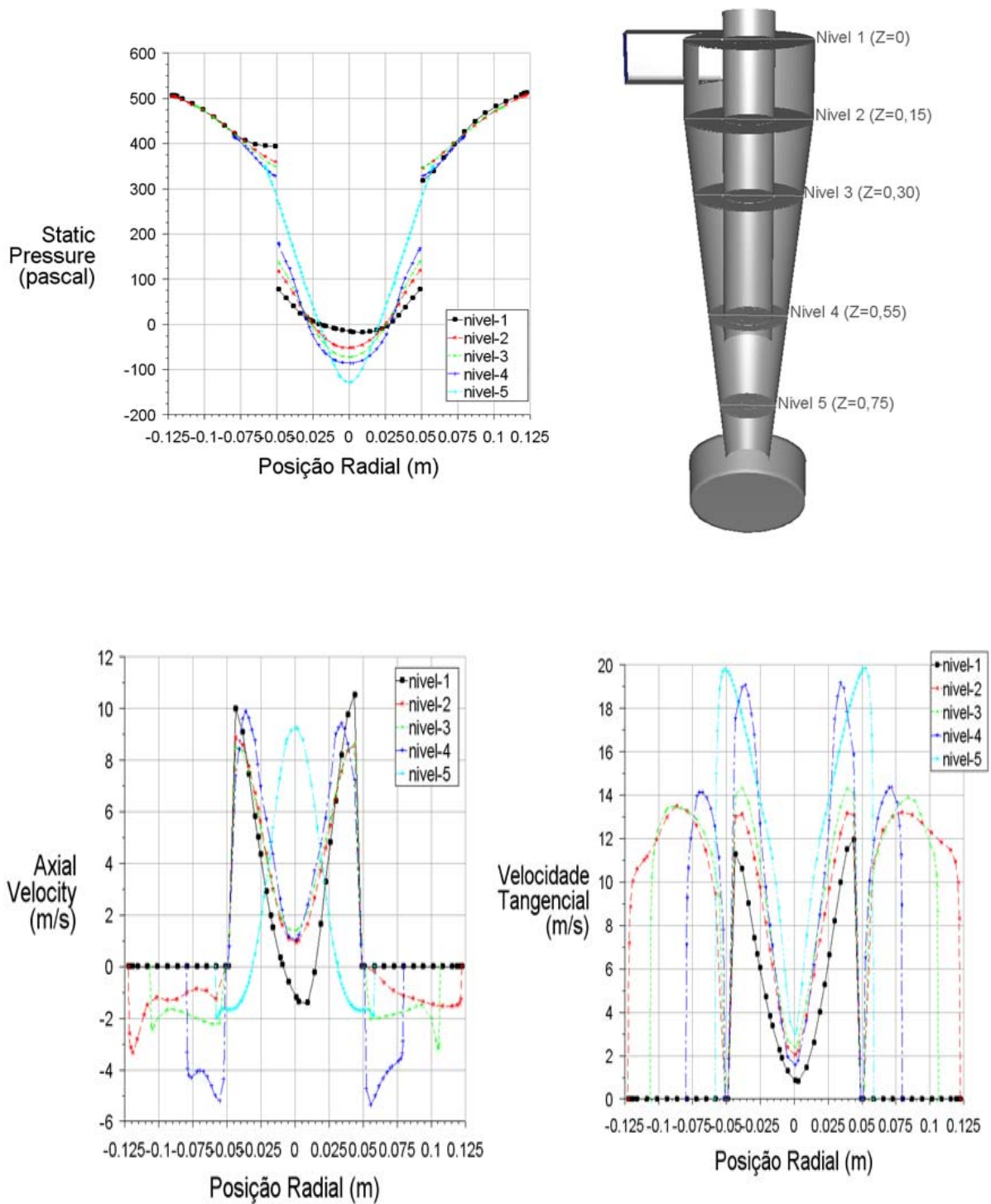


Figura C3– Ciclone 3: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

# CICLONE 4

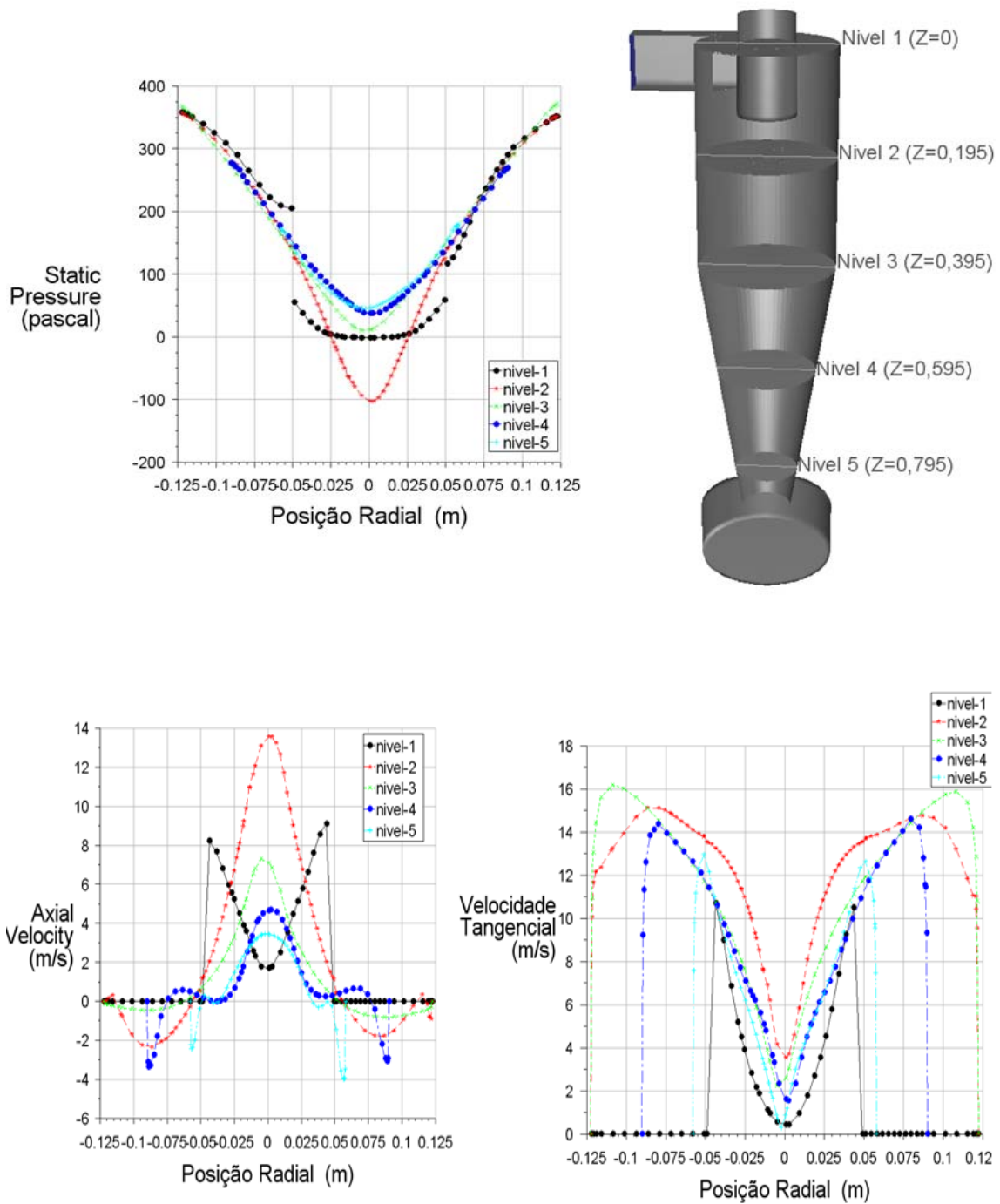


Figura C4– Ciclone 4: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

## CICLONE 5

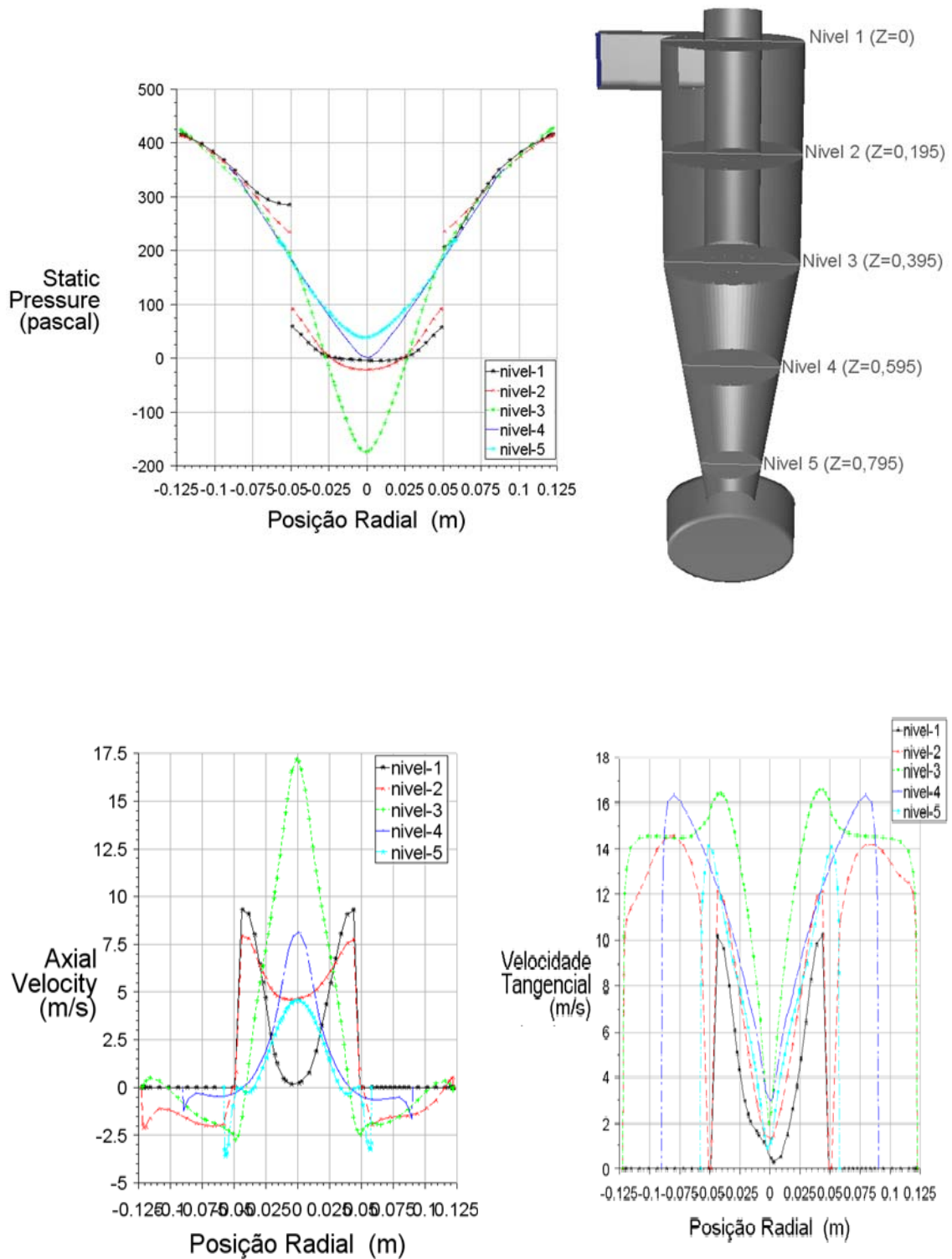


Figura C5– Ciclone 5: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

## CICLONE 6

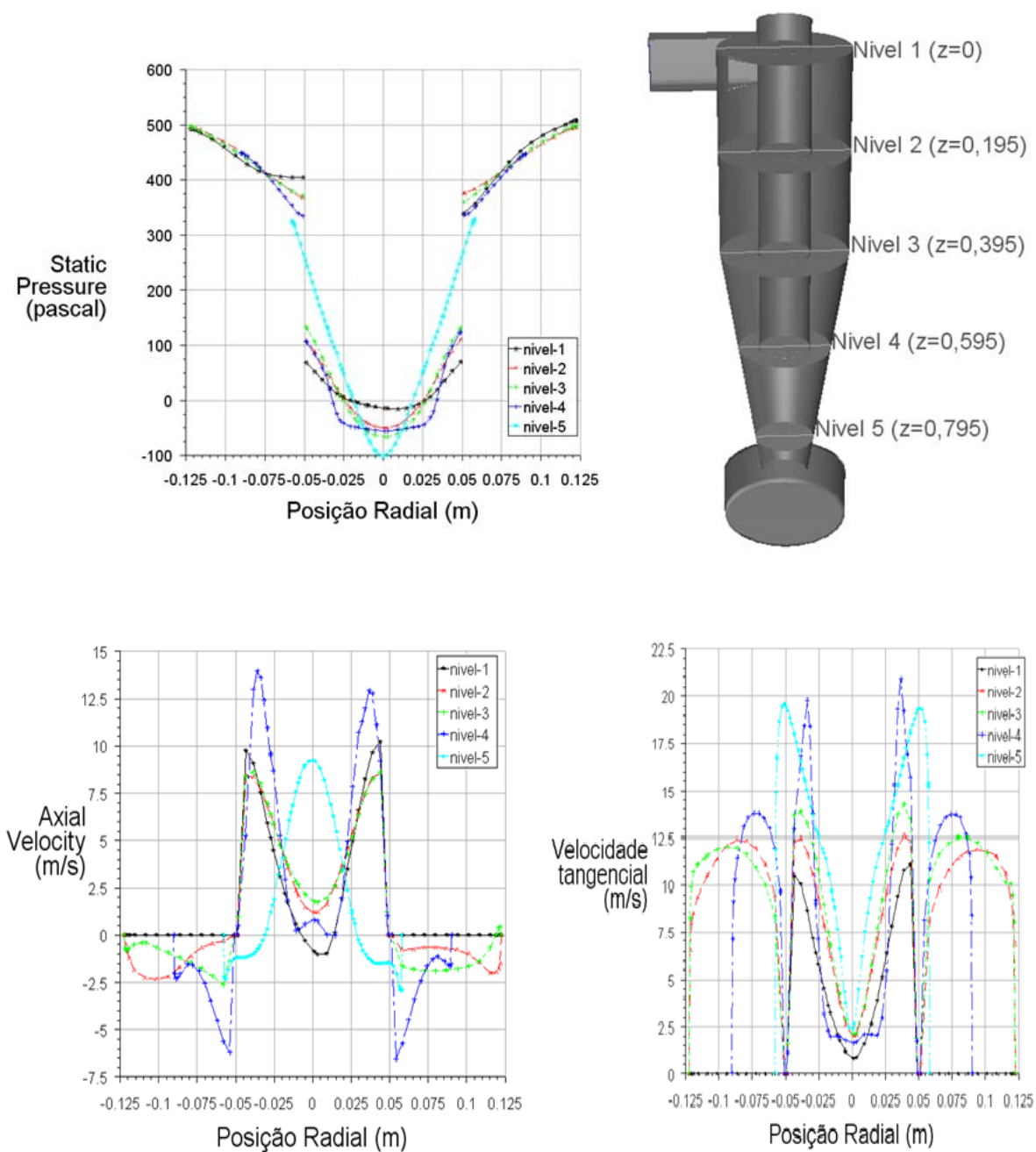


Figura C6– Ciclone 6: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

## CICLONE 7

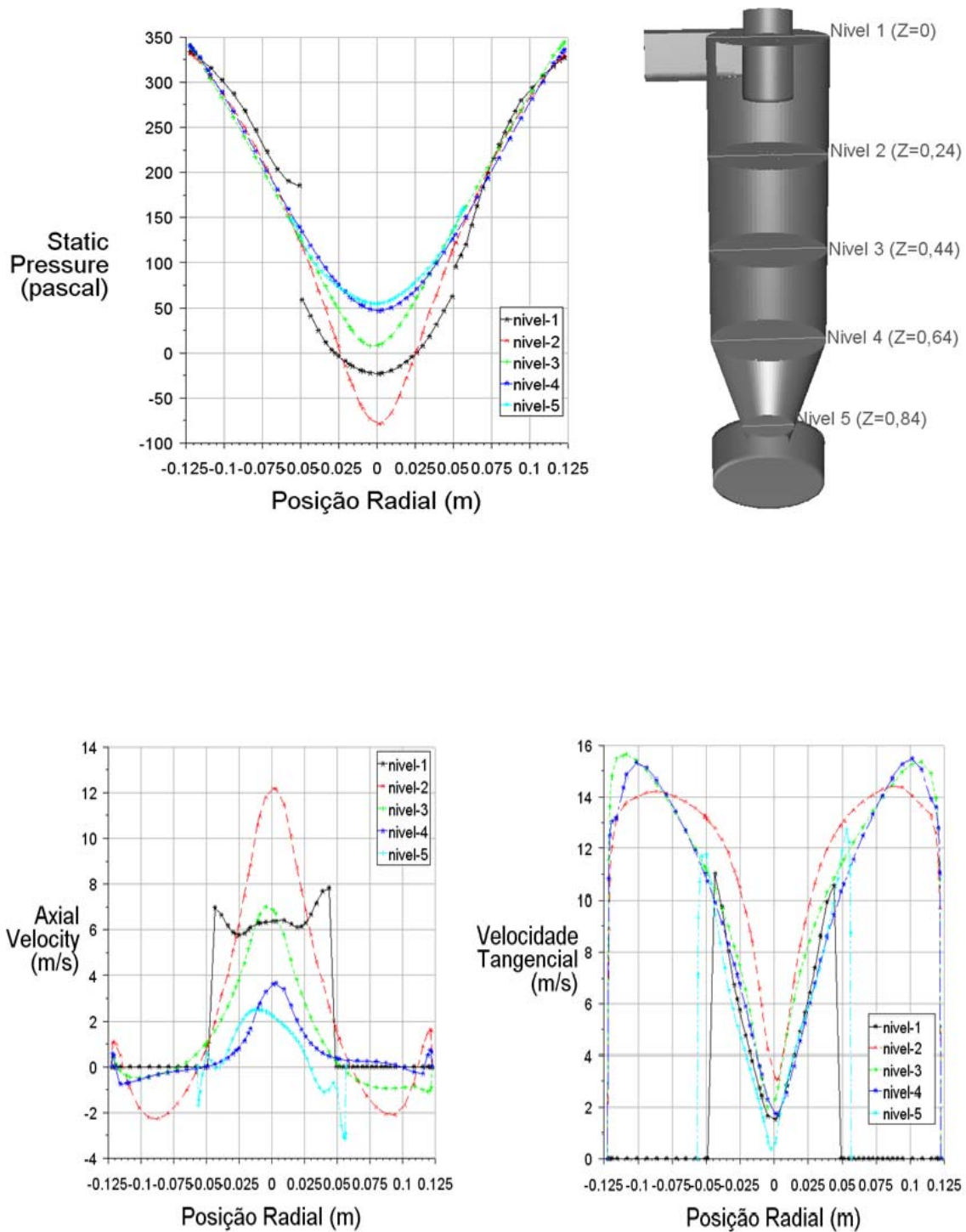


Figura C7– Ciclone 7: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

## CICLONE 8

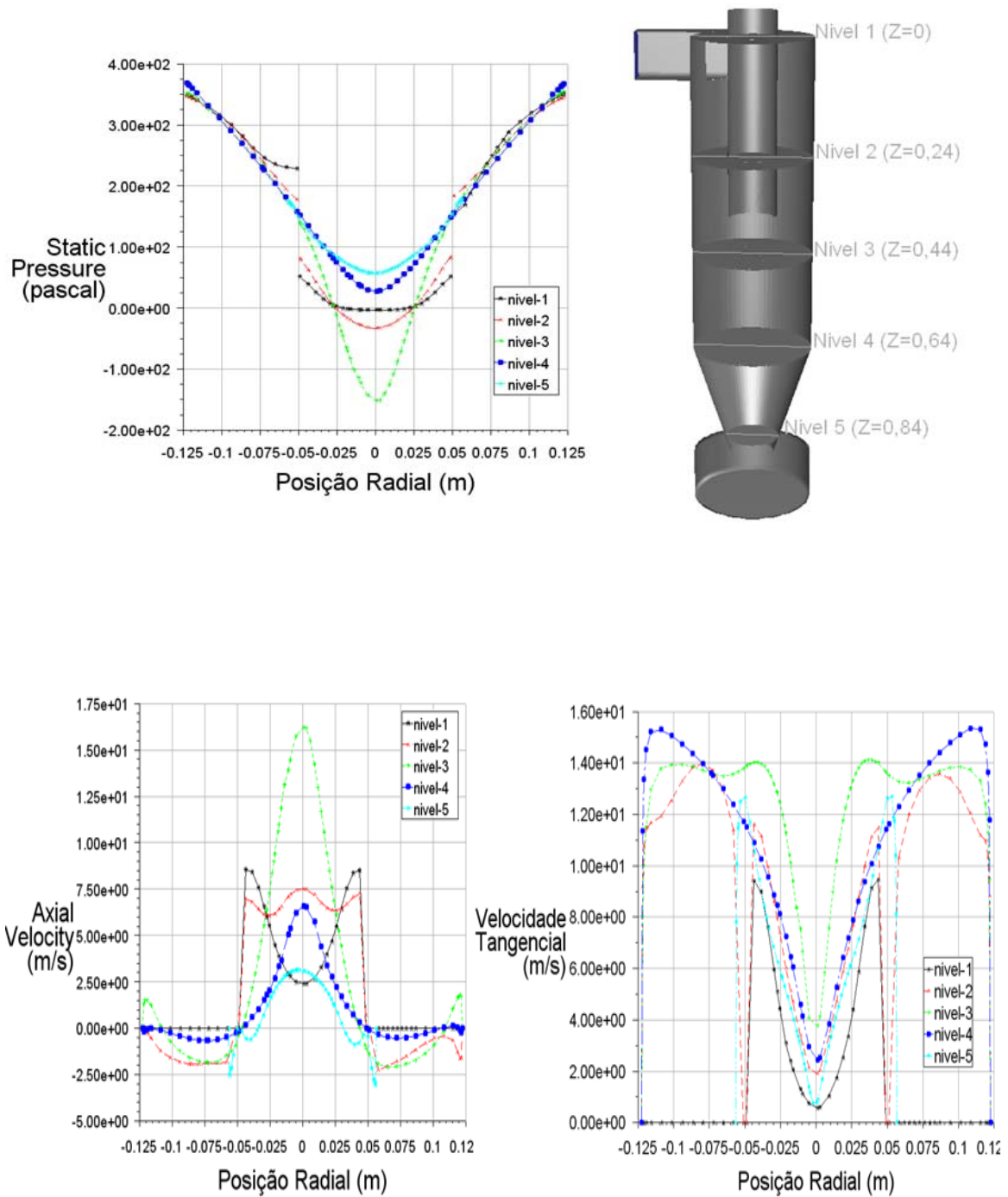


Figura C8– Ciclone 8: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.

## CICLONE 9

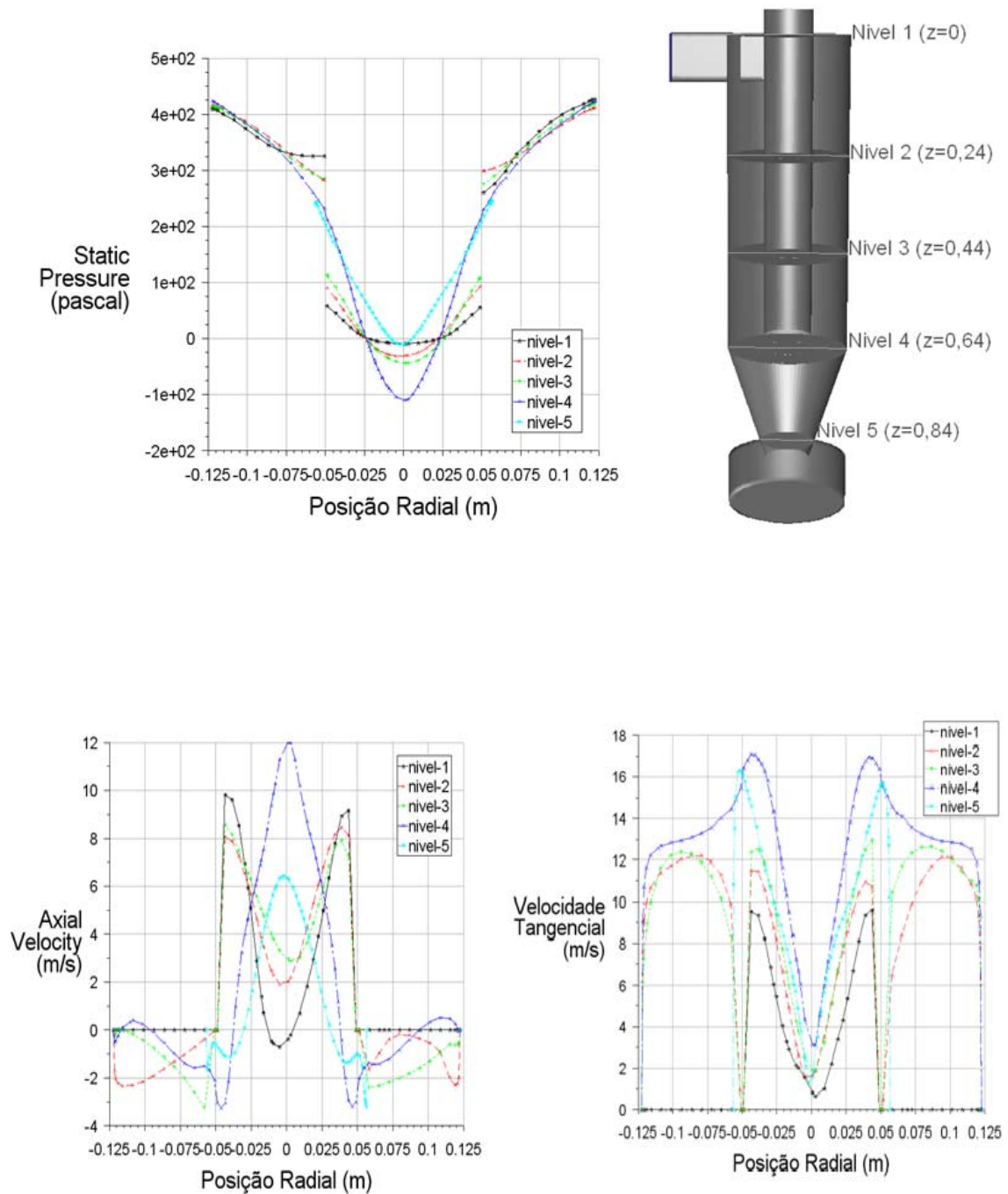


Figura C9 – Ciclone 9: queda de pressão, velocidade axial e tangencial.



APENDICE D

ALGORITMO GERADO NA LINGUGEM C++  
COMPILADO NA FUNÇÃO UDF

```

/* reflect boundary condition for inert particles */

#include "udf.h"
#include "dpm.h"

DEFINE_DPM_BC(bc_reflect_OR_trap_inert_3D,p,t,f,f_normal,dim)
{
    /* particle and wall characteristics */
    real ao; /* raio da área de contato */
    real nup; /* Poisson ratio para a particula */
    real nuw; /* Poisson ratio para a parede */
    real Ep; /* Young's module para a particula */
    real Ew; /* Young's module para a parede */
    real kp; /* Zhang, X.; Wang, L.; Zhu, K., Journal of Electostatics 63 (2005), 1057-1071. */
    real kw;
    real K;
    real gamap; /* surface energy per unity area of the particle */
    real gamaw; /* surface energy per unity area of the wall */
    real gamai; /* surface energy per unity area of the interface */
    real gama; // gama = gamap + gamaw - gamai
    real Rp;

    real vx, vy, vz; // particle velocity antes do choque
    real vn;
    real vt;
    real modvquad; /* particle velocity */
    real modvf;
    real nor_coeff, tan_coeff;

    real Eko; /* Energia cinética antes do choque */
    real Ekf; /* Energia cinética final */
    int i;
    real Es; /* Energia de superfície devido a van der waals */

    /* particle and wall characteristics */
    nup = 0.33; /* alumminium alloy */
    nuw = 0.285; /* steel */
    Ep = 10.0e10; /* (Pa) alumminium alloy */
    Ew = 3.00e11; /* (Pa) steel */
    gamap = 1.3; /* J/m2 */
    gamaw = 1.5; /* J/m2 */
    gamai = 0.2; /* J/m2 */

    gama = gamap + gamaw - gamai;
    kp = (1.0-nup*nup)/(3.141592654*Ep);
    kw = (1.0-nuw*nuw)/(3.141592654*Ew);
    K = 4.0/(9.424777961*(kp+kw));
    Rp = P_DIAM(p)/2.0;
    ao = pow((18.84955592*gama*Rp*Rp/K),(1.0/3.0));

    Es = 3.141592654*ao*ao*gama;

```

```

vx = p->state.V[0];
vy = p->state.V[1];
vz = p->state.V[2];
modvquad = vx*vx+vy*vy+vz*vz;
Eko = 0.5*P_MASS(p)*modvquad;

vn=0.;
nor_coeff = 1.0;
tan_coeff = 165.12*pow((ao/P_DIAM(p)),1.9133);
if (tan_coeff > 0.8) tan_coeff = 0.8;

/* Compute normal velocity. */
for(i=0; i<3; i++) vn += p->state.V[i]*f_normal[i];
/* Subtract off normal velocity. */
for(i=0; i<3; i++) p->state.V[i] -= vn*f_normal[i];
// Compute tangencial velocity
vt = sqrt(p->state.V[0]*p->state.V[0]+p->state.V[1]*p->state.V[1]+p->state.V[2]*p-
>state.V[2]);
/* Apply tangential coefficient of restitution. */
for(i=0; i<3; i++) p->state.V[i] *= tan_coeff;
/* Add reflected normal velocity. */
for(i=0; i<3; i++) p->state.V[i] -= nor_coeff*vn*f_normal[i];
modvf = p->state.V[0]*p->state.V[0]+p->state.V[1]*p->state.V[1]+p->state.V[2]*p-
>state.V[2];
Ekf = 0.5*P_MASS(p)*modvf;

if ((Es/(Ekf))>=1.0) // significa que a Es é maior. Particula fica aderida
{
    Trap_Particle(p);
    p->gvtp.n_trapped += 1;
    return PATH_END;
}
else
{
    /* Store new velocity in state0 of particle */
    for(i=0; i<3; i++) p->state0.V[i] = p->state.V[i];
    return PATH_ACTIVE;
}
}

```