



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

---

Escola de Química

# SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO ESCOAMENTO GÁS- SÓLIDO EM UM CICLONE

Felipe Seixas Okamura

Projeto Final de Curso

Orientador: Paulo Laranjeira da Cunha Lage, D.Sc

Co-orientador: Fábio Pereira dos Santos, M.Sc

Agosto de 2012

# SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM UM CICLONE

***Felipe Seixas Okamura***

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA ESCOLA DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO QUÍMICO.

Aprovado por:

---

Verônica Maria de Araújo Calado – D.Sc.

---

Jovani Luiz Favero – M.Sc.

---

Eduardo Rangel Braga – M.Sc.

Orientado por:

---

Paulo Laranjeira da Cunha Lage – D.Sc.

---

Fábio Pereira dos Santos – M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
Agosto de 2012

OKAMURA, FELIPE SEIXAS

Simulação fluidodinâmica com transferência de calor no escoamento gás-sólido em um ciclone/ Felipe Seixas Okamura. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola de Química, 2012.

ix, 55 p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Laranjeira da Cunha Lage

Co – orientador: Fábio Pereira dos Santos

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola de Química/ Curso de Engenharia Química, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 54-55.

1. Ciclone. 2. Transferência de calor3. CFD. 4.Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Paulo Laranjeira da Cunha Lage ; Fábio Pereira dos Santos.

I. Simulação fluidodinâmica com transferência de calor no escoamento gás-sólido em um ciclone

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus orientadores. Ao professor Paulo por toda a orientação acadêmica e profissional, disponibilidade de infraestrutura de alta qualidade e fonte de conhecimento inesgotável. Ao Fábio por todo apoio e ensinamento ao longo deste trabalho.

Aos colegas do LTFD, por sempre estarem presentes e dispostos a ajudar neste projeto e em diversos momentos da graduação.

À minha família por todo apoio e interesse durante todas as fases deste projeto.

À minha namorada Marcela, por todo o apoio, compreensão, companheirismo e ajuda de sempre.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Engenharia Química.

## **SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM UM CICLONE**

Felipe Seixas Okamura

Agosto, 2012

Orientador: Paulo Laranjeira da Cunha Lage, D.Sc

Co-orientador: Fábio Pereira dos Santos, M.Sc

Unidades de leito fluidizado circulante (CFB) são intensamente utilizados para o craqueamento catalítico de petróleo e na combustão de carvão. O ciclone é um equipamento fundamental para este tipo de processo sendo responsável pela recuperação das partículas do catalisador e da energia térmica. A transferência de calor em um escoamento denso gás-sólido através de um ciclone foi analisado usando a fluidodinâmica computacional. Embora existam alguns trabalhos publicados na literatura sobre transferência de calor entre uma mistura gás-sólido e a parede de um ciclone, poucos desses trabalhos comparam resultados de simulação com dados experimentais. O presente trabalho tem como objetivo a validação experimental de um modelo que possa simular este processo. O software comercial ANSYS Fluent 13.0 foi utilizado e o escoamento gás-sólido foi modelado pelas equações de conservação médias Euleriano-Euleriano usando a teoria cinética do escoamento granular para modelar as propriedades da fase sólida. Os resultados foram comparados com dados experimentais da literatura.

# Sumário

<b>Nomenclatura</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	2
<b>2 Revisão da Literatura</b>	<b>3</b>
2.1 O equipamento ciclone . . . . .	3
2.2 Escoamento monofásico em ciclones . . . . .	6
2.3 Escoamento Bifásico em Ciclones . . . . .	8
2.4 Transferência de calor em ciclones . . . . .	9
<b>3 Modelagem Matemática</b>	<b>10</b>
3.1 Equações Fundamentais . . . . .	10
3.1.1 Equação Média de Conservação da Massa . . . . .	10
3.1.2 Equação Média de Conservação da Quantidade de Movimento . . . . .	11
3.1.3 Equação da conservação de energia . . . . .	14
3.1.4 Temperatura granular . . . . .	14
3.1.5 Modelo de turbulência <i>Shear-Stress Transport (SST) k-<math>\omega</math></i> . . . . .	15
<b>4 Metodologia de simulação</b>	<b>16</b>
4.1 Geração de geometria e malha . . . . .	17
4.2 Pré-processamento e Processamento . . . . .	20
4.3 Pós-processamento . . . . .	24

<b>5 Casos estudados</b>	<b>27</b>
5.1 Ciclone estudado . . . . .	27
5.2 Simulações . . . . .	28
5.2.1 Caso 1 . . . . .	30
5.2.2 Caso 2 . . . . .	30
5.2.3 Caso 3 . . . . .	30
5.2.4 Caso 4 . . . . .	30
<b>6 Resultados e Discussão</b>	<b>31</b>
6.1 Resultados . . . . .	31
6.1.1 Caso 1 . . . . .	32
6.1.2 Caso 2 . . . . .	37
6.1.3 Caso 3 . . . . .	42
6.1.4 Caso 4 . . . . .	47
6.1.5 Comparação com os dados experimentais . . . . .	52
6.2 Discussões . . . . .	53
<b>7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>54</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>56</b>

# Nomenclatura

$\Delta P$	queda de pressão instantânea
$\Delta P_{exp}$	queda de pressão experimental
$\Delta P_m$	queda de pressão média
$\mathbf{g}$	campo gravitacional
$\mathbf{K}_{pq}$	termo referente à troca de quantidade de movimento entre as fases $p$ e $q$
$\mathbf{K}_{sl}$	termo referente à troca de quantidade de movimento entre a fase fluida $l$ e a fase sólida $s$
$\mathbf{q}_q$	fluxo de calor
$\mathbf{R}_q$	termo fonte referente à troca de massa pela interface da fase $q$
$\mathbf{S}_q$	termo fonte de energia
$\mathbf{u}_q$	velocidade da fase $q$
$\omega$	taxa específica de dissipação turbulenta
$C_d$	coeficiente de arrasto
$d_s$	diâmetro característico da fase dispersa sólida
$e_{ss}$	coeficiente de restituição para as colisões de partículas



## Nomenclatura

---

$g_{0,ss}$	função de distribuição radial
$h$	coeficiente de transferência de calor instantâneo
$H_{pq}$	entalpia da interface
$H_q$	entalpia específica da fase $q$
$hm$	coeficiente de transferência de calor médio
$hm_{exp}$	coeficiente de transferência de calor experimental
$I_{2d}$	segundo invariante do tensor deviatório
$k$	energia cinética turbulenta
$k_{\Theta_s}$	coeficiente de difusão de energia
$p$	pressão
$p_s$	pressão de sólidos
$Q_{pq}$	intensidade de transferência de calor entre as fases $p$ e $q$
$Re_s$	número de Reynolds para as partículas
$T_b$	temperatura média do seio do fluido
$T_p$	temperatura média na superfície
$t_s$	tempo de relaxação das partículas
$v_{r,s}$	razão entre a velocidade relativa média entre as partículas sólidas e a fase fluida e a velocidade terminal da partícula
$v_t$	velocidade tangencial

## Subscritos

$q$	referente à fase contínua fluida
-----	----------------------------------

$s$  referente à fase dispersa sólida

## Letras Gregas

$\alpha$  fração volumétrica

$\alpha_{s,max}$  fração volumétrica máxima da fase sólida  $s$

$\gamma_{\Theta_s}$  termo referente a dissipação de energia devido à colisão

$\lambda$  viscosidade *bulk*

$\bar{\tau}$  tensão

$\mu_{s,col}$  viscosidade de colisão

$\mu_{s,fr}$  viscosidade de fricção

$\mu_{s,kin}$  viscosidade cinética

$\mu_s$  viscosidade de cisalhamento de sólido

$\phi$  ângulo interno da fricção

$\phi_{ls}$  termo referente a troca de energia entra a fase fluida e sólida

$\rho_q$  massa específica da fase  $q$

$\Theta_s$  temperatura granular

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Os processos de separação são operações muito importantes utilizadas na indústria de processamento. Devido à grande variedade de misturas em diversas condições operacionais, essas operações possuem muitos desafios. Portanto, o conhecimento dos fenômenos envolvidos nesses processos é fundamental para o seu desenvolvimento tecnológico.

Dentre os diversos tipos de processos de separação, a separação de sólidos presentes no gás é de extrema importância em várias aplicações industriais. Na indústria do petróleo, a separação gás-sólido é importante desde a produção de petróleo, onde ocorre a remoção de partículas de areias presentes nas linhas de produção de óleo e gás, até o refino de petróleo, onde as partículas sólidas de catalisadores são recuperadas no processo de craqueamento catalítico.

Um dos equipamentos mais utilizados nas indústrias de processos, com a finalidade de separação de sólidos de correntes gasosas, são os ciclones. Eles são simples, fáceis de operar e possuem baixo custo de construção, operação, manutenção e energia (Wan et al., 2008).

Volumosas quantidades de materiais particulados ou granulares com alta temperatura aparecem em processos convencionais de engenharia de processos (Shimizu et al., 2004). Atualmente, o equipamento ciclone é um componente chave para os mais avançados conceitos de utilização de carvão para geração de energia (Cortés e Gil, 2007). Esse fato

deve-se à sua capacidade de operar em diversas condições operacionais. Nesses processos consegue-se aumento da eficiência energética por meio da recuperação das partículas sólidas presentes nos gases de exaustão, pois grande parte da energia térmica é armazenada nas partículas que retornam ao processo.

Embora a utilização de ciclones que operam a altas temperaturas seja bastante relevante para indústria, existem poucos trabalhos que investigam a transferência de calor em ciclones. A maioria dos trabalhos sobre esse equipamento estuda sua operação sem transferência de calor. Portanto, este trabalho tem como objetivo investigar a transferência de calor no equipamento ciclone.

## 1.2 Objetivo

Realizar um estudo de caso de um ciclone operando com ar e partículas de areia e carga térmica.

Analisar o escoamento gás-sólido com transferência de calor através do ciclone utilizando a fluidodinâmica computacional (*CFD*). Avaliar o campo de velocidade do escoamento multifásico, perfil de temperatura, queda de pressão e por fim, avaliar o coeficiente de transferência de calor médio no ciclone.

# Capítulo 2

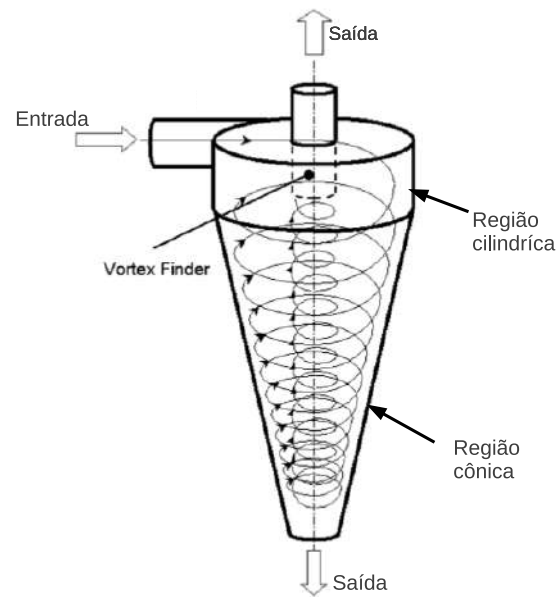
## Revisão da Literatura

### 2.1 O equipamento ciclone

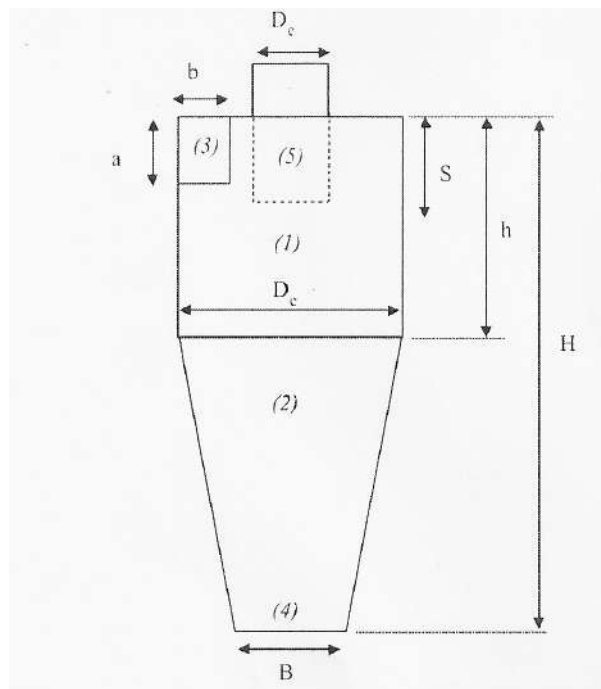
Ciclone é um equipamento industrial utilizado para separar partículas sólidas de uma corrente gasosa. Ele é capaz de operar com diversas combinações de pressão, temperatura e carga de sólidos, além de possuir uma estrutura simples, robusta e confiável (Cortés e Gil, 2007).

O ciclone é utilizado de acordo com a necessidade do processo, possuindo duas finalidades: uma delas é a recuperação do material particulado, quando este material é a matéria-prima do processo e, portanto, deseja-se reaproveitar esse material no processo; a outra finalidade é a purificação do gás quando as partículas são rejeitos do processo, a fim de atender as legislações ambientais ou a adequação da corrente gasosa para seguir para outro processo.

Independente da finalidade do ciclone, sua estrutura não possui muitas variações. É composta por uma câmara cilíndrica em sua parte superior e uma câmara cônica na parte inferior. Possui um canal na parte cilíndrica por onde a corrente gasosa concentrada de partículas entra no ciclone. Além desse canal, o ciclone possui outras duas aberturas para o seu exterior: uma localizada na parte inferior e outra superior. O gás concentrado de partículas sai pela parte inferior da câmara cônica, enquanto o gás diluído sai por um canal localizado na parte superior e central da câmara cilíndrica, chamado de *vortex finder*. A Figura 2.1 ilustra os principais componentes do ciclone.



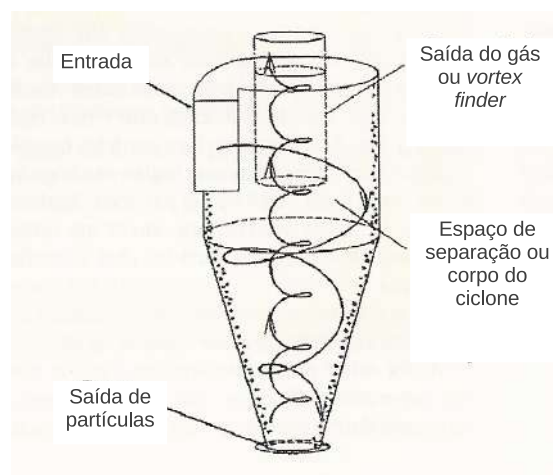
**Figura 2.1:** Principais componentes do ciclone adaptado de Cokljat et al.



**Figura 2.2:** Principais dimensões que caracterizam um ciclone (Cortés e Gil, 2007).

Embora a estrutura dos ciclones não possua muitas variações, existem diversos padrões conhecidos e utilizados na indústria, que se diferem nas dimensões de cada um dos seus componentes. A Figura 2.2 ilustra as principais dimensões que caracterizam um ciclone. Dentre elas, a mais importante é o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone ( $D_c$ ). Em geral, todas as outras dimensões são caracterizadas em função desta.

Independente da proporção geométrica que o ciclone possui, o objetivo de sua geome-

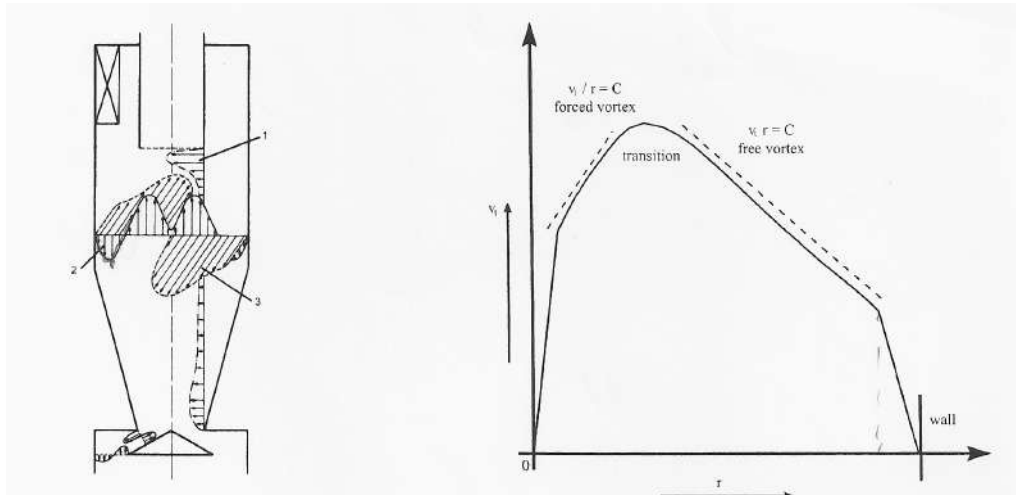


**Figura 2.3:** Movimento dos fluidos no interior do ciclone (Gronald e Derksen, 2011).

tria é formar um escoamento altamente rotacional em seu interior, pois a separação das partículas da fase gasosa ocorre devido a esse tipo de escoamento formado.

A corrente gasosa concentrada de partículas entra no ciclone e adquire um movimento em espiral, que se estende até a base do equipamento onde parte da corrente sai pela parte inferior da câmara cônica e o restante da corrente sobe em movimento espiral pelo centro do ciclone até sair pelo *vortex finder* (Cortés e Gil, 2007). A Figura 2.3 apresenta esse movimento no interior do ciclone. Ao longo do primeiro movimento, assim que a corrente entra no ciclone, as partículas sólidas são submetidas à força centrífuga e gravitacional e são carregadas em direção a parede do ciclone. Quando as partículas colidem com a parede, elas perdem quantidade de movimento e perdem suas trajetórias originais do escoamento. Após a colisão com a parede, estas partículas caem até o fundo do ciclone onde são carregadas para fora do equipamento pela corrente gasosa que deixa o ciclone pela sua parte inferior.

Esse escoamento altamente rotacional ao longo do ciclone possui características peculiares e, portanto, maiores detalhes sobre esse escoamento serão apresentados nos Tópicos 2.2 e 2.3.



**Figura 2.4:** A figura da esquerda apresenta os perfis típicos das três componentes de velocidade, sendo 1 a velocidade radial, 2 a velocidade axial e 3 a velocidade tangencial. A figura da direita apresenta o perfil típico da velocidade tangencial em ciclones. Adaptado de Cortés e Gil (2007)

## 2.2 Escoamento monofásico em ciclones

Desde que o ciclone foi desenvolvido, diversos trabalhos teóricos, experimentais e computacionais foram realizados com objetivo de investigar e compreender as principais características do seu escoamento.

Devido à alta complexidade do seu escoamento multifásico, muitos trabalhos restringiram-se ao escoamento do gás puro de forma a facilitar as análises e o entendimento desses escoamentos.

O escoamento no ciclone é dominado pela velocidade tangencial e um forte cisalhamento na direção radial. O perfil típico das velocidades em ciclones é ilustrado na Figura 2.4.

Embora a velocidade tangencial seja predominante nesse tipo de escoamento, as outras componentes da velocidade também são importantes. A velocidade axial tem maior importância para o processo de separação do que a força gravitacional (Robertson et al., 2005). Portanto, diversos modelos algébricos, muitos destes com base empírica, foram propostos para prever tanto a velocidade tangencial quanto as outras componentes. Estes modelos são encontrados com maiores detalhes em Cortés e Gil (2007).

Com o rápido desenvolvimento dos computadores e as técnicas *CFD*, estudos baseados na resolução numérica de modelos mais robustos tornaram-se uma opção para a predição



da performance de ciclones (Wan et al., 2008).

Estudos do escoamento em ciclones com *CFD* dependem fortemente de um modelo de turbulência que consiga caracterizar bem este tipo de escoamento. Simulações *CFD* usando o modelo de turbulência *k-epsilon* padrão não era acurado para prever o escoamento no ciclone. Este resultado deve-se ao fato do escoamento no ciclone ser altamente anisotrópico e, portanto, um modelo que possa caracterizar a alta anisotropia do escoamento é imprescindível para a obtenção de um bom resultado. (Cortés e Gil, 2007)

Foram obtidas simulações com resultados mais acurados com a utilização de modelos de turbulência de segunda ordem de fechamento, por exemplo, o *Reynolds Stress Transport Models (RSTM)* (Jakirlic e Hanjalic, 2002). Peres et al. (2002) compararam dados experimentais com os seus resultados de simulações utilizando o modelo de turbulência *RSTM* com esquemas de interpolação de alta ordem, mostrando que esta modelagem apresenta boa capacidade de representar o escoamento rotacional de um ciclone.

Simulações em ciclones utilizando os modelos de turbulência *k-epsilon*, *RSTM* e *RNG k-epsilon* foram avaliados por Hoekstra et al. (1999) a fim de verificar a performance desses modelos. Os três modelos foram comparados com dados experimentais realizados por Anemometria por Laser Doppler (LDA) e com base nesse estudo, pode-se notar que o *RNG k-epsilon* apresenta um resultado melhor que o *k-epsilon*, porém o *RSTM* foi o modelo que apresentou o melhor resultado frente aos dados experimentais.

Na busca de obter simulações com resultados melhores, abordagens mais robustas foram estudadas. A abordagem de turbulência Simulações de Grandes Vórtices (*LES*) foi comparada com a abordagem Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (*RANS*) utilizando o modelo de turbulência *RSTM* e dados experimentais por Gronald e Derksen (2011). Verificou-se que as velocidades axiais médias foram bem previstas por ambos os modelos. O pico de velocidade no interior do ciclone foi bem prevista pela abordagem *LES*, porém a abordagem *RANS* não previu bem esta variável.

## 2.3 escoamento Bifásico em Ciclones

Embora o estudo do escoamento monofásico tenha ajudado a compreensão do escoamento no ciclone, o escoamento real no ciclone difere do escoamento monofásico e, portanto, estudos do escoamento bifásico são importantes para o entendimento mais aprofundado dos escoamentos em ciclone.

Do ponto de vista do processo industrial, os parâmetros mais relevantes para aplicação do ciclone em determinado processo é a eficiência de separação e a perda de carga. Baseado nisso, diversos trabalhos foram desenvolvidos com objetivo de investigar essas duas variáveis. Maiores detalhes sobre esses modelos são apresentados por Cortés e Gil (2007).

Entretanto, para que o dimensionamento do ciclone possa ser melhorado, otimizado e customizado é fundamental conhecer e entender o escoamento no seu interior.

Após o entendimento do escoamento monofásico no ciclone, o desafio ficou por conta do escoamento das partículas. Tal escoamento é fundamental para entender os parâmetros que irão afetar a eficiência de separação do ciclone. Embora o escoamento da fase gasosa sem presença de partículas seja conhecido, nem sempre é possível garantir que tal escoamento não seja afetado pela presença das partículas.

Em escoamentos com baixa concentração de partículas, realizaram-se simulações considerando que as partículas não afetam o escoamento do gás. Entretanto, em escoamentos com concentrações não diluídas, essa hipótese perde sua aplicabilidade e, portanto, foi necessário buscar modelos mais robustos e capazes de caracterizar a interação entre fases.

Para o escoamento diluído, a abordagem *Euleriano-Lagrangeana* é adequada (Cortés e Gil, 2007). Essa abordagem consiste na integração da equação do movimento para cada partícula, e como resultado é possível obter a trajetória destas partículas. Entretanto, para altas concentrações de partículas essa abordagem é inviável devido ao alto custo computacional.

A abordagem *Euleriano-Euleriano* vem sendo utilizada em diversas simulações de escoamentos multifásicos, como leitos fluidizados e colunas de borbulhamento. Tal abordagem trata as duas fases como fluidos contínuos e interpenetrantes, diferentemente da

abordagem Euleriano-Lagrangeana, na qual não é possível obter a trajetória exata de cada partícula, e sim a distribuição das partículas em todo o domínio.

## 2.4 Transferência de calor em ciclones

Embora existam diversos trabalhos sobre ciclones na literatura, poucos deles abordam a transferência de calor em seu escoamento. Os trabalhos de Szekely e Carr (1966), Cremasco (1994) e Gupta e Nag (2000) reportam estudos experimentais envolvendo ciclone e transferência de calor, enquanto o trabalho de Karagoz e Kaya (2007) refere-se a um estudo de simulação CFD com ciclone e transferência de calor.

Szekely e Carr (1966) reportaram a transferência de calor em um escoamento gas-sólidos em ciclone e verificaram que a presença de partículas não aumentou significativamente a transferência de calor no ciclone estudado.

A influência da presença de particulados nos perfis de temperatura ao longo do raio e da altura de um ciclone foram analisados por Cremasco (1994). Verificou-se que a presença de particulados suaviza o perfil de temperatura, devido à absorção de energia pelas partículas.

O coeficiente de transferência de calor em um ciclone foi analisado experimentalmente por Gupta e Nag (2000). Foi verificado que nas condições analisadas, o coeficiente de transferência de calor aumenta com o aumento de concentração de partículas.

Karagoz e Kaya (2007) analisaram a transferência de calor no escoamento monofásico de ar em um ciclone e verificaram que a transferência de calor em todas as paredes do ciclone aumenta com o aumento da velocidade de entrada no ciclone. O número de *Nusselt* apresentou o maior valor na parede oposta ao canal de entrada do ciclone.

# Capítulo 3

## Modelagem Matemática

### 3.1 Equações Fundamentais

A modelagem utilizada, implementada no *Fluent 13.0*, é descrita nas seções seguintes. A abordagem multifásica adotada foi a Euleriano-Euleriano, com a utilização da Teoria Cinética Granular para caracterizar as interações da fase sólida. O modelo de turbulência utilizado foi o *Shear-Stress Transport (SST) k- $\omega$* .

#### 3.1.1 Equação Média de Conservação da Massa

A equação de conservação da massa para a fase  $q$  é dada por

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) = R_q \quad (3.1)$$

em que  $\alpha_q$  é a fração volumétrica da fase  $q$ ,  $\rho_q$  é a massa específica da fase  $q$ ,  $\mathbf{u}_q$  é a velocidade média da fase  $q$  e  $\mathbf{R}_q$  é o termo de transferência de massa de tal fase.

### 3.1.2 Equação Média de Conservação da Quantidade de Movimento

A equação de conservação da quantidade de movimento para a fase fluida  $q$  é dada por

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q)}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q \mathbf{u}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_q \bar{\boldsymbol{\tau}}_q) + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + K_{pq}(\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_q) \quad (3.2)$$

em que  $\bar{\boldsymbol{\tau}}_q$  é o tensor tensão,  $p$  é a pressão local,  $K_{pq}$  é o termo referente à troca de momento entre as fases  $q$  e  $p$  e  $\mathbf{g}$  é a aceleração da gravidade.

O tensor tensão é dado por

$$\bar{\boldsymbol{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \mathbf{u}_q + (\nabla \mathbf{u}_q)^T) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \mathbf{u}_q \mathbf{I} \quad (3.3)$$

em que  $\mu_q$  e  $\lambda_q$  são a viscosidade de cisalhamento e *bulk*.

A equação de conservação da quantidade de movimento para a fase sólida  $s$  é dada por

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s)}{\partial t} + \nabla(\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \mathbf{g} + K_{ls}(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) \quad (3.4)$$

em que  $p_s$  é a pressão de sólido da fase  $s$ ,  $K_{ls} = K_{sl}$  é o coeficiente de troca de quantidade de movimento entre a fase fluida  $l$  e a fase sólida  $s$ .

#### Coeficiente de troca de quantidade de movimento entre as fases

O coeficiente de transferência entre a fase fluida e sólida  $K_{sl}$  pode ser escrito na forma geral por

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{t_s} \quad (3.5)$$

sendo  $f$  um adimensional,  $t_s$  é o tempo de relaxação das partículas definido por

$$t_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_l} \quad (3.6)$$

em que  $d_p$  é o diâmetro das partículas da fase  $s$ . A função  $f$  varia de acordo com o modelo utilizado. Neste trabalho utilizou-se o modelo de Syamlal e O'Brien (1989) que é representado por

$$f = \frac{C_d Re_s \alpha_l}{24 v_{r,s}^2} \quad (3.7)$$

em que  $v_{r,s}$  é a razão entre duas velocidades: a velocidade relativa média entre as partículas sólidas e a fase fluida; a velocidade terminal da partícula sólida. O coeficiente de arrasto  $C_d$  é derivado por Valle (1948) da seguinte forma

$$C_d = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s/v_{r,s}}} \right) \quad (3.8)$$

sendo  $Re_s$  dado por

$$Re = \frac{\rho_l d_s |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_l|}{\mu_l} \quad (3.9)$$

em que  $d_s$  é o diâmetro das partículas da fase  $s$ , os subscritos  $l$  é para fase fluida e  $s$  para fase sólida. A variável  $v_{r,s}$  é calculada a partir da seguinte correlação

$$v_{r,s} = 0,5(A - 0,06Re_s + \sqrt{(0,06Re_s)^2 + 0,12Re_s(2B - A) + A^2}) \quad (3.10)$$

com

$$A = \alpha_l^{4,14} \quad (3.11)$$

e

$$B = \begin{cases} 0,8\alpha_l^{1,28} & \alpha_l \leq 0,85 \\ \alpha_l^{2,65} & \alpha_l > 0,85 \end{cases} \quad (3.12)$$

### Pressão de sólidos

A pressão de sólidos é composta por um termo cinético e um termo devido à colisão de partículas. Ela é dada por

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (3.13)$$

em que  $e_{ss}$  é o coeficiente de restituição para as colisões de partículas,  $g_{0,ss}$  é a função de distribuição radial e  $\Theta_s$  é a temperatura granular.

### Função de distribuição radial

A função de distribuição radial,  $g_0$ , é o fator de correção que modifica a probabilidade de colisão entre partículas quando a fase sólida se torna densa. Ela é dada por

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.14)$$

### Tensor tensão da fase sólida

O tensor tensão de sólidos contém viscosidade do *bulk* e de cisalhamento advindo da troca de quantidade de movimento da partícula devido à translação e à colisão. A viscosidade de fricção também pode ser incluída para caracterizar a transição viscoplástica que ocorre quando partículas da fase sólida atingem a máxima fração volumétrica. A viscosidade de cisalhamento de sólido é dada por

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.15)$$

### Viscosidade de colisão

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \alpha_s \quad (3.16)$$

### Viscosidade cinética

$$\mu_{s,kin} = \frac{\rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (3.17)$$

### Viscosidade *bulk*

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (3.18)$$

### Viscosidade de fricção

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \text{sen}(\phi)}{2\sqrt{I_{2d}}} \quad (3.19)$$

em que  $\text{sen}(\phi)$  é o ângulo interno da fricção, e  $I_{2d}$  é o segundo invariante do tensor deviatório.

### 3.1.3 Equação da conservação de energia

A equação da energia na abordagem Euleriano-Euleriano é dada por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q H_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q H_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \mathbf{u}_q - \nabla \cdot \mathbf{q}_q + \mathbf{S}_q + Q_{pq} + m_{pq} H_{pq} - m_{qp} H_{qp} \quad (3.20)$$

em que  $H_q$  é a entalpia específica da fase  $q$ ,  $\mathbf{q}_q$  é o fluxo de calor,  $\mathbf{S}_q$  é o termo fonte de energia,  $Q_{pq}$  é a intensidade de transferência de calor entre as fases  $p$  e  $q$  e  $H_{pq}$  é a entalpia da interface.

### 3.1.4 Temperatura granular

A temperatura granular para a fase sólida é proporcional à energia cinética de movimento aleatório das partículas. A equação de transporte derivada da energia cinética granular é dada por

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \mathbf{v}_s \Theta_s) \right] = (-p_s \mathbf{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \mathbf{v}_s + \nabla \cdot (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \phi_{ls} \quad (3.21)$$

em que  $(-p_s \mathbf{I} + \bar{\tau}_s)$  é o termo de geração de energia devido ao tensor tensão de sólidos,  $k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s$  é o termo de difusão de energia,  $\gamma_{\Theta_s}$  é o termo de dissipação de energia devido à colisão e  $\phi_{ls}$  é o a troca de energia entre as fases fluida e sólida.

O termo de geração de energia devido ao tensor tensão de sólidos é dado por

$$k_{\Theta_s} = \frac{15d_s \rho_s \alpha_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{4(41 - 33\eta)} \left[ 1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) \alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (3.22)$$

sendo  $\eta = \frac{1}{2}(1 + e_{ss})$ .



### 3.1.5 Modelo de turbulência *Shear-Stress Transport (SST) k- $\omega$* .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_w \nabla w) + G_w - Y_w + S_w \quad (3.24)$$

em que  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidade médio.  $G_w$  representa a geração de  $w$ .  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_w$  representam a difusividade efetiva de  $k$  e  $w$ , respectivamente.  $Y_k$  e  $Y_w$  representa a dissipação de  $k$  e  $w$  devido a turbulência.  $S_k$  e  $S_w$  são termos fontes.

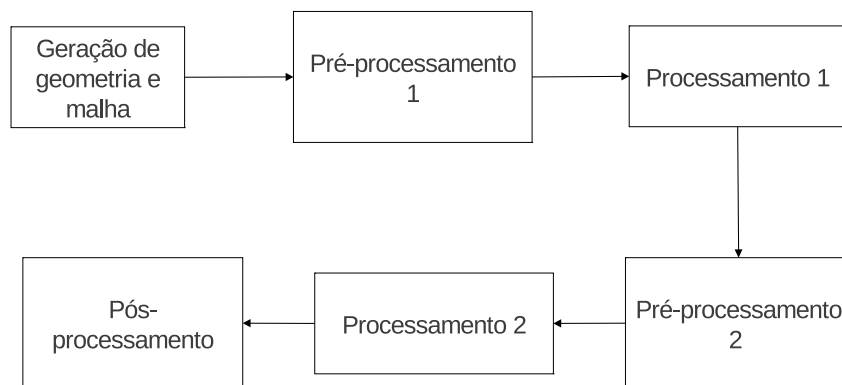
# Capítulo 4

## Metodologia de simulação

Toda simulação *CFD* possui, pelo menos, cinco etapas. A primeira é a geração da geometria, seguindo para a geração de malha, pré-processamento, processamento e por fim o pós-processamento. Entretanto, em alguns casos essa sequência não é satisfatória para obter a solução final do caso estudado devido a diversos problemas. Um deles, que ocorre com bastante frequência, é a divergência numérica na resolução do sistema de equações na etapa de processamento. Portanto, nestes casos é necessário adotar uma estratégia para atingir a solução do problema.

A simulação do escoamento multifásico com transferência de calor em um ciclone é complexa e de difícil convergência. Por causa disso, adotou-se uma estratégia para facilitar a solução do problema. A estratégia adotada é parecida com as etapas básicas de simulação, começando com as quatro primeiras etapas, mas antes de iniciar o pós-processamento introduziram-se duas novas etapas. Após a geração da malha, segue-se para o pré-processamento e processamento inicial, denominados de pré-processamento 1 e processamento 1, com objetivo de facilitar o pré-processamento 2 e processamento 2, que são os desejados. Por fim, finaliza-se com o pós-processamento.

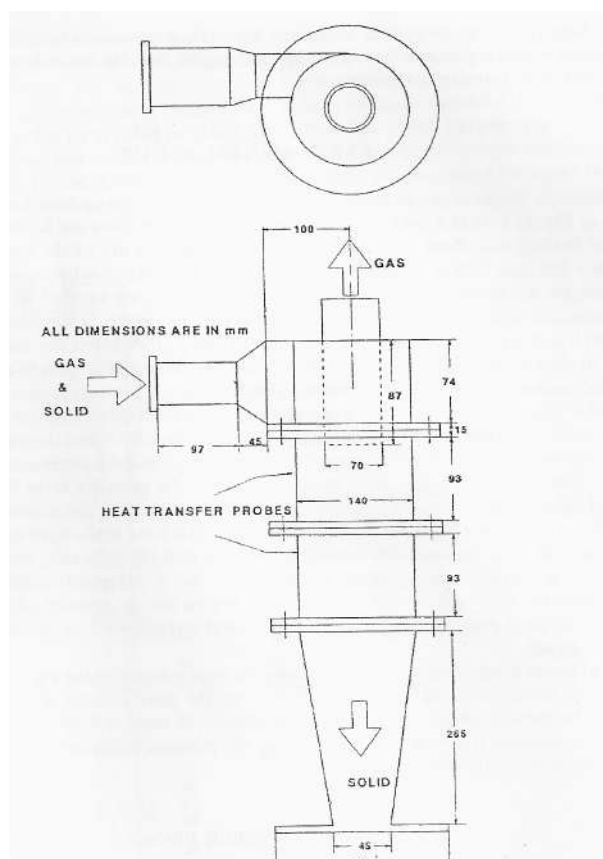
O conjunto pré-processamento 1 e processamento 1 é capaz de ajudar a obter a solução desejada do problema pois ele é mais simples, exige menos esforço computacional e possui maior facilidade na convergência do sistema de equações. A Figura 4.1 ilustra as etapas da estratégia utilizada para contornar a dificuldade de resolução numérica do problema. Nas seções a seguir, estas etapas serão apresentadas com maiores detalhes.



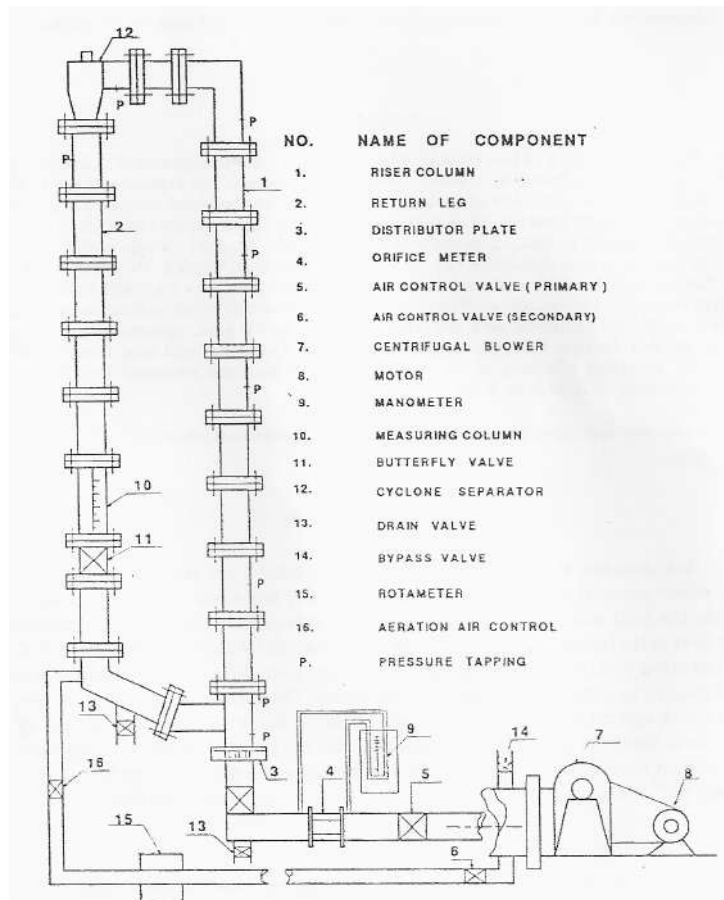
**Figura 4.1:** Estratégia utilizada para as simulações.

## 4.1 Geração de geometria e malha

A geração de geometria foi realizada com o software *DesignModeler* da *ANSYS*. A geometria foi baseada no ciclone do tipo *Lapple* e suas dimensões são apresentadas na Figura 4.2. Tanto a geometria quanto as dimensões foram baseadas no ciclone estudado por Gupta e Nag (2000). A Figura 4.3 apresenta o sistema experimental completo usado por eles. Outros detalhes sobre esse estudo serão apresentados na seção 5.1.



**Figura 4.2:** Principais dimensões do ciclone estudado (Gupta e Nag, 2000).



**Figura 4.3:** Sistema experimental estudado por (Gupta e Nag, 2000).

Com a geometria construída, a malha foi elaborada no software *ICEM CFD* 13.0. A malha elaborada foi do tipo hexaédrica em dois domínios: o primeiro possui o ciclone; e o segundo possui um canal quadrado que fica acoplado na saída inferior do ciclone.

Foram elaboradas duas malhas com a mesma estrutura, porém com número de elementos diferentes. A tabela 4.1 apresenta o número de elementos, nós e a qualidade de cada uma das malhas. A qualidade das malhas foi avaliada por meio de do *ICEM CFD* 13.0. A malha 1 é apresentada na Figura 4.4, enquanto a malha 2 é apresentada na Figura 4.5.

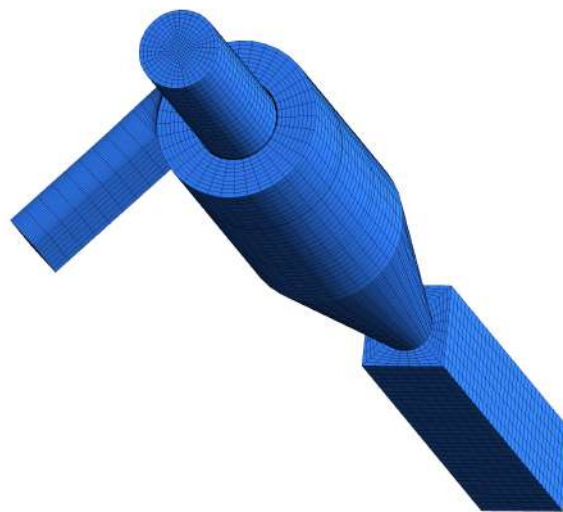


Figura 4.4: Vista da malha 1.



Figura 4.5: Vista da malha 2.

Tabela 4.1: Malhas utilizadas.

Malha	Número de elementos	Número de nós	Qualidade
Malha 1	63769	68020	> 5
Malha 2	202013	211287	> 5

## 4.2 Pré-processamento e Processamento

Como apresentado anteriormente, foram elaborados dois pré-processamentos seguidos dos seus processamentos. Os parâmetros entre os dois pré-processamentos foram bastante parecidos, diferenciando-se apenas na condição de contorno e na adição da equação de energia térmica para solução da transferência de calor no escoamento. As condições de contorno serão apresentadas na seção 5.2.

No pré-processamento inicial, definiu-se o escoamento multifásico utilizando a abordagem *euleriano-euleriano*, porém não foram alimentadas partículas de sólido no domínio e a equação da energia térmica não foi ativada. O modelo de turbulência utilizado foi o *SST k-omega*. A tabela 4.2 discrimina os modelos e seus parâmetros utilizados, enquanto as tabelas 4.3 e 4.4 apresentam informações sobre os parâmetros relacionados aos métodos numéricos e o critério de convergência, respectivamente.

Realizou-se a simulação em regime transiente durante 5 segundos, tempo suficiente para que o escoamento no interior do ciclone adquirisse o seu perfil rotacional. A tabela 4.5 apresenta as informações sobre os parâmetros relacionados à solução do regime transiente.

**Tabela 4.2:** Modelos e parâmetros utilizados no pré-processamento e processamento 1 e 2.

Modelos	Pré-processamento 1	Pré-processamento 2
Turbulência	<i>SST k-omega</i>	<i>SST k-omega</i>
Tubulência multifásica	<i>Mixture</i>	<i>Mixture</i>
Energia	Desligado	Ligado
Multifásico	<i>Eulerian</i>	<i>Eulerian</i>
	Esquema implícito	Esquema implícito
Modelo de temperatura granular	<i>Partial Differential Equation</i>	<i>Partial Differential Equation</i>
Diâmetro (m)	0.000259	0.000259
<i>Granular viscosity (<math>\frac{kg}{m.s}</math>)</i>	syamlal	syamlal
<i>Granular Bulk Viscosity (<math>\frac{kg}{m.s}</math>)</i>	lun-et-al	lun-et-al
<i>Frictional Viscosity (<math>\frac{kg}{m.s}</math>)</i>	<i>Schaeffer</i>	<i>Schaeffer</i>
<i>Angle of internal friction</i>	30	30
<i>Frictional Pressure (pascal)</i>	<i>based-ktgf</i>	<i>based-ktgf</i>
<i>Frictiotnal Modulus (pascal)</i>	<i>derived</i>	<i>derived</i>
<i>Friction Packing Limit</i>	0.61	0.61
<i>Granular Conductivity (<math>\frac{kg}{m.s}</math>)</i>	syamlal-obrien	syamlal-obrien
<i>Solids Pressure (pascal)</i>	lun-et-al	lun-et-al
<i>Radial Distribution</i>	lun-et-al	lun-et-al
<i>Elasticity Modulus (pascal)</i>	<i>derived</i>	<i>derived</i>
<i>Packing Limit</i>	0.63	0.63

**Tabela 4.3:** Parâmetros dos métodos numéricos.

Parâmetros	Pré-processamento 1	Pré-processamento 2
Solver	<i>Pressure-Based</i>	<i>Pressure-Based</i>
Acoplamento pressão-velocidade	<i>Multiphase Coupled</i>	<i>Multiphase Coupled</i>
<b>Discretização espacial</b>		
Gradiente	<i>Green-Gauss Node Based</i>	<i>Green-Gauss Node Based</i>
Quantidade de Movimento	<i>Second Order Upwind</i>	<i>Second Order Upwind</i>
Fração volumétrica	<i>QUICK</i>	<i>QUICK</i>
Temperatura granular	<i>First Order Upwind</i>	<i>First Order Upwind</i>
Energia cinética turbulenta	<i>First Order Upwind</i>	<i>First Order Upwind</i>
Taxa de dissipação turbulenta	<i>First Order Upwind</i>	<i>First Order Upwind</i>
Energia	-	<i>First Order Upwind</i>
Formulação transiente	<i>First Order Implicit</i>	<i>First Order Implicit</i>
<b>Controles de solução</b>		
Quantidade de Movimento	0.4	0.4
Pressão	0.4	0.4
<b>Fatores de relaxação</b>		
Densidade:	0.3	0.3
Forças de campo	0.5	0.5
Fração volumétrica	0.3	0.3
Temperatura granular	0.2	0.2
Energia cinética turbulenta	0.8	0.8
Taxa de dissipação turbulenta	0.8	0.8
Viscosidade turbulenta	1	1
Energia	1	1



**Tabela 4.4:** Critérios de convergência.

Equações	Resíduos (absolutos)	
	Pré-processamento 1	Pré-processamento 2
continuidade	0.0001	0.0001
quantidade de movimento para fase 1	0.001	0.001
quantidade de movimento para fase 2	0.001	0.001
energia para fase 1	-	0.001
energia para fase 2	-	0.001
Temperatura granular	-	0.001
k	0.001	0.001
omega	0.001	0.001
fração volumétrica de sólidos	0.001	0.001

**Tabela 4.5:** Parâmetros do regime transiente.

Parâmetros	Pré-processamento 1	Pré-processamento 2
Passo de tempo	Fixo 0.0001 s	Fixo 0.0001 s
Iterações máximas por passo de tempo	300	300
tempo simulado	5 s	95 s

Após esse processamento, a equação de energia térmica foi ligada e alimentaram-se partículas no domínio. Processou-se esse caso, partindo da solução obtida anteriormente, em que o escoamento já possuía um perfil rotacional desenvolvido até o tempo total de 100 segundos. Esta metodologia foi utilizada pois não foi possível obter convergência partindo-se direto do caso com escoamento multifásico com transferência de calor.

Os processamentos 1 e 2 foram realizados utilizando processamento paralelo. A tabela 4.6 apresenta as informações sobre o *hardware* utilizado para cada um dos processamentos.

**Tabela 4.6:** *Hardware* utilizado nos processamentos.

	Pré-processamento 1	Pré-processamento 2
Processador	Quad-Core AMD Opteron 2356	Quad-Core AMD Opteron 2356
Número de núcleos utilizados	8	16

### 4.3 Pós-processamento

Atingindo o tempo de simulação de 100 segundos, o resultado foi exportado para o *software ANSYS CFX 13.0* devido à sua melhor interface gráfica para visualização dos resultados.

O coeficiente de transferência de calor é obtido pela seguinte equação

$$h = \frac{Q}{A(T_p - T_b)} \quad (4.1)$$

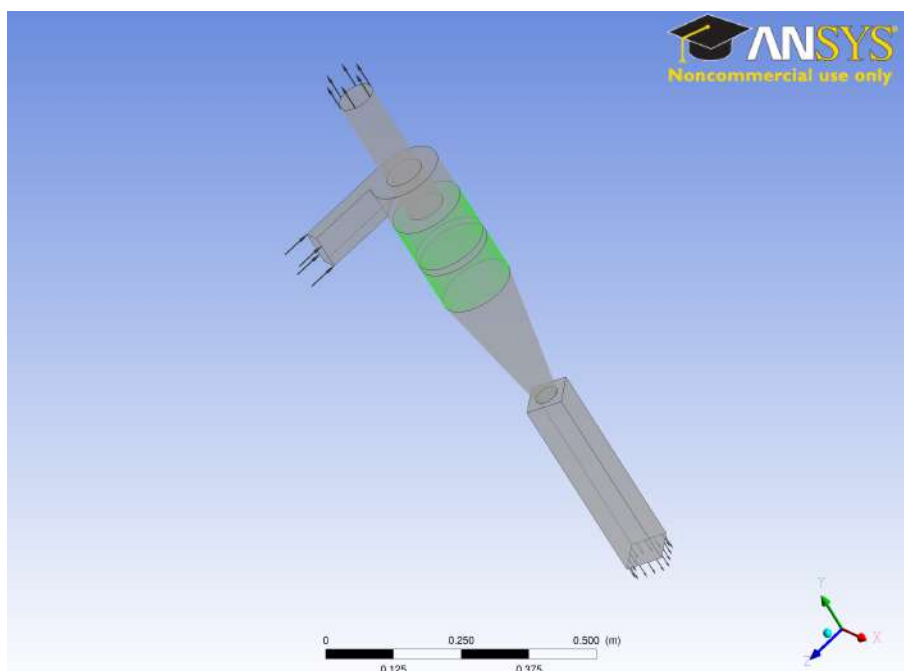
em que  $h$  é o coeficiente de transferência de calor médio,  $Q$  é o calor recebido pelo ciclone na região de transferência,  $T_p$  é a temperatura média na superfície que recebe calor,  $T_b$  é a temperatura média no centro do ciclone e  $A$  é a área da região de transferência de calor. A Figura 4.6 ilustra a superfície em que é tirada a média das temperaturas para obter  $T_p$ , enquanto a Figura 4.7 apresenta a linha no centro do ciclone em que é tirada a média das temperaturas para obter  $T_b$ .

O coeficiente de transferência de calor médio temporal,  $hm$ , é obtido pela média temporal dos coeficientes de transferência de calor.

O perfil de temperatura é obtido ao longo das linhas 1, 2, 3 e 4, traçadas na direção radial. Enquanto que o perfil de velocidade é obtido ao longo apenas da linha 1. As linhas são ilustradas na Figura 4.8, enquanto suas informações são apresentadas na tabela 4.7.

**Tabela 4.7:** Localização das linhas 1, 2, 3 e 4.

Linha	Eixo	Distância do topo do <i>vortex finder</i>
1	x	47,3 cm
2	x	45,3 cm
3	x	43,3 cm
4	x	41,3 cm

**Figura 4.6:** Localização da superfície que recebe calor.

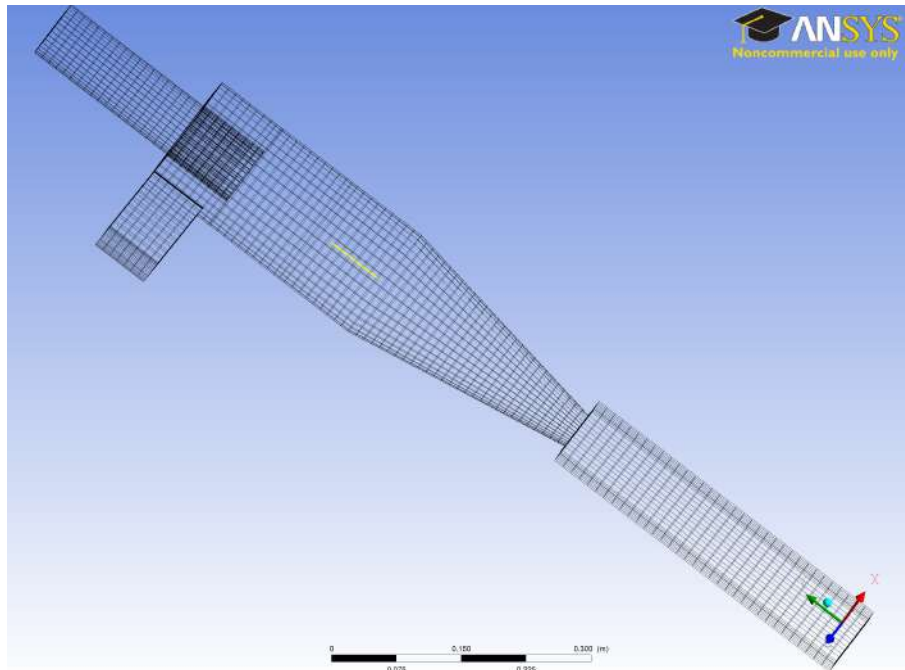


Figura 4.7: Localização da linha em que é obtida a  $T_b$ .

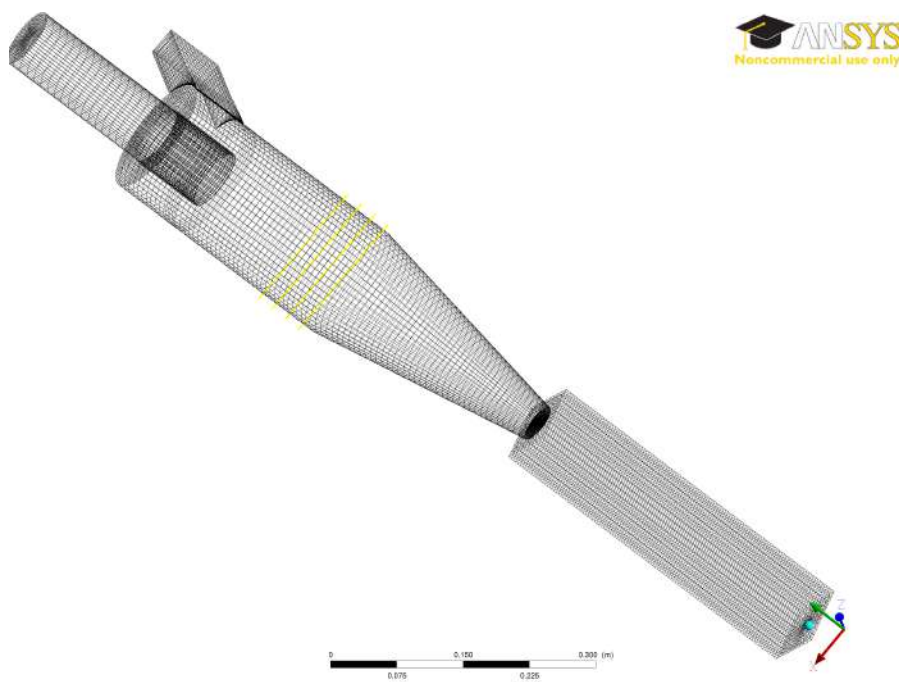


Figura 4.8: Localização das linhas 1, 2, 3 e 4 no ciclone.

# Capítulo 5

## Casos estudados

Neste capítulo, são apresentadas as condições operacionais do ciclone que serviram de base para as simulações e as condições de contorno utilizadas nas simulações.

### 5.1 Ciclone estudado

Gupta e Nag (2000) realizaram experimentos utilizando um ciclone do tipo Lapple operando com alimentação de ar e partículas de areia em regime estacionário com transferência de calor.

Dentre as diferentes condições operacionais estudadas por eles, duas destas foram utilizadas como base para as simulações. Ambas possuem escoamento de ar com partículas de areia e transferência de calor, mas as duas condições operacionais diferenciam-se pela carga de sólidos na alimentação do ciclone, mantendo todos os outros parâmetros iguais.

A tabela 5.1 apresenta os valores dos principais parâmetros das duas condições operacionais.

**Tabela 5.1:** Condições operacionais do ciclone

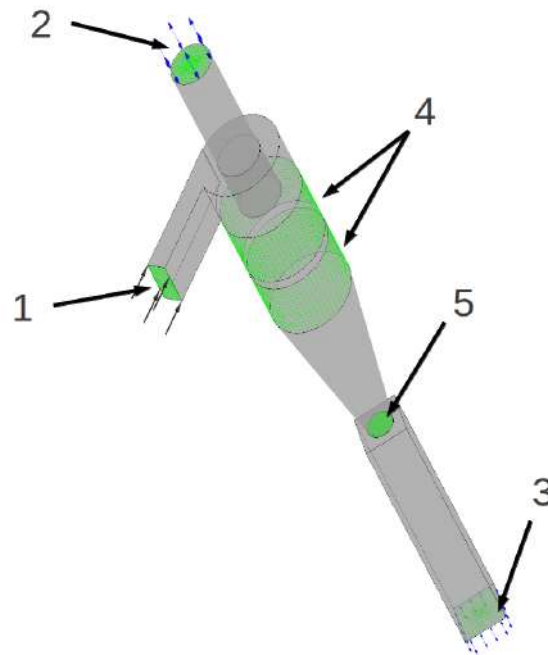
Parâmetros	Caso A	Caso B
Velocidade da corrente de entrada	17,05 m/s	17,05 m/s
Fracão volumétrica de sólidos na corrente de entrada	0.000519	0.000778
Fluxo térmico nas seções de troca térmica	1969 $W/m^2$	1969 $W/m^2$
Temperatura de entrada da corrente	300K	300K

## 5.2 Simulações

Baseado nas condições operacionais descritas na seção anterior, foram realizadas quatro simulações, duas para cada condição operacional.

A realização de duas simulações para cada condição operacional teve como objetivo analisar a influência da malha na solução final. Ou seja, realizou-se para a mesma condição operacional duas simulações com o mesmo pré-processamento, uma para a Malha 1 e outra para a Malha 2.

Nas seções a seguir, as condições de contorno para cada caso são apresentadas. A Figura 5.1 ilustra a localização e o nome das principais condições de contorno. A tabela 5.3 apresenta o tipo de cada uma dessas condições de contorno. A tabela 5.2 apresenta as propriedades físicas do ar e da areia utilizadas nas simulações.



**Figura 5.1:** Localização e nome das principais condições de contorno. 1 - Inlet, 2 - OutletUP, 3 - OutletDown, 4 - Heat, 5 - Interface.

**Tabela 5.2:** Propriedades físicas dos materiais.

Propriedade	Ar	Areia
densidade ( $kg/m^3$ )	1,225	1500
viscosidade ( $kg/ms$ )	0,00001789	-
diâmetro de partícula ( $m$ )	-	0.000259
capacidade calorífica ( $J/kgK$ )	1006,43	800
condutividade térmica ( $W/mK$ )	0,0242	0,2700

**Tabela 5.3:** Tipos de condição de contorno utilizadas no *Fluent 13.0*.

Superfície	Tipo de condição de contorno.
Inlet	<i>velocity-inlet</i>
OutletUP	<i>pressure-outlet</i>
OutletDown	<i>pressure-outlet</i>
Heat	<i>wall</i>
Interface	<i>Interface</i>

Nas seções 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4 são apresentados as condições de contorno das superfícies Inlet, OutletUP, OutletDown e Heat para os Casos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As outras superfícies possuem a condição de contorno do tipo *Wall* sendo adiabática para todos os casos.

### 5.2.1 Caso 1

No caso 1, foi simulada a condição operacional A utilizando a Malha 1. A tabela 5.1 apresenta as condições de contorno deste caso.

### 5.2.2 Caso 2

No caso 2, foi simulada a condição operacional B utilizando a Malha 1. A tabela 5.1 apresenta as condições de contorno deste caso.

### 5.2.3 Caso 3

No caso 3, foi simulada a condição operacional A utilizando a Malha 2. A tabela 5.1 apresenta as condições de contorno deste caso.

### 5.2.4 Caso 4

No caso 4, foi simulada a condição operacional B utilizando a Malha 2. A tabela 5.1 apresenta as condições de contorno deste caso.



# Capítulo 6

## Resultados e Discussão

### 6.1 Resultados

A disposição dos resultados gerados se dará da seguinte forma: uma tabela e 10 figuras serão apresentadas para cada caso.

A primeira figura apresenta os valores do coeficiente de transferência de calor instantâneo,  $h$ , e o coeficiente de transferência de calor médio,  $hm$ , de 81 a 100 segundos de simulação.

A segunda figura apresenta os valores de queda de pressão instantâneo,  $\Delta P$ , e a queda de pressão média,  $\Delta P_m$ , de 81 a 100 segundos de simulação.

A terceira, quarta, quinta e sexta figuras apresentam o perfil de temperatura,  $T$ , para os tempos de 98, 99 e 100 segundos ao longo das linha 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

A sétima figura apresenta o perfil de velocidade tangencial,  $vt$ , ao longo da linha 4, para os tempos de 98, 99 e 100 segundos.

A oitava figura apresenta as linhas de correntes do escoamento com as suas frações volumétricas de sólidos no tempo de simulação de 100 segundos.

A nona figura apresenta o perfil de pressão no ciclone no plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.

A décima figura apresenta o perfil de fração volumétrica de sólidos média temporal no plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.

A primeira tabela apresenta o tempo de simulação total e o tempo computacional

utilizado.

A segunda tabela apresenta os valores de  $y^+$  na área Heat no tempo de simulação de 100 segundos. Três valores são apresentados, o maior valor da área,  $y_{max}^+$ , o valor médio na área,  $y_{med}^+$ , e mínimo valor da área,  $y_{min}^+$ .

### 6.1.1 Caso 1

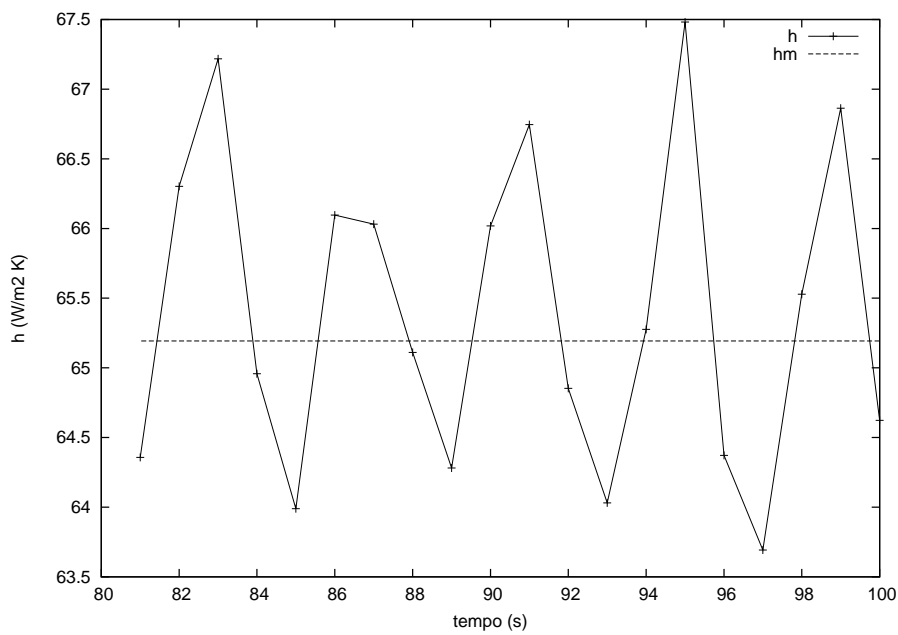


Figura 6.1: Coeficiente de transferência de calor instantâneo e médio do Caso 1.

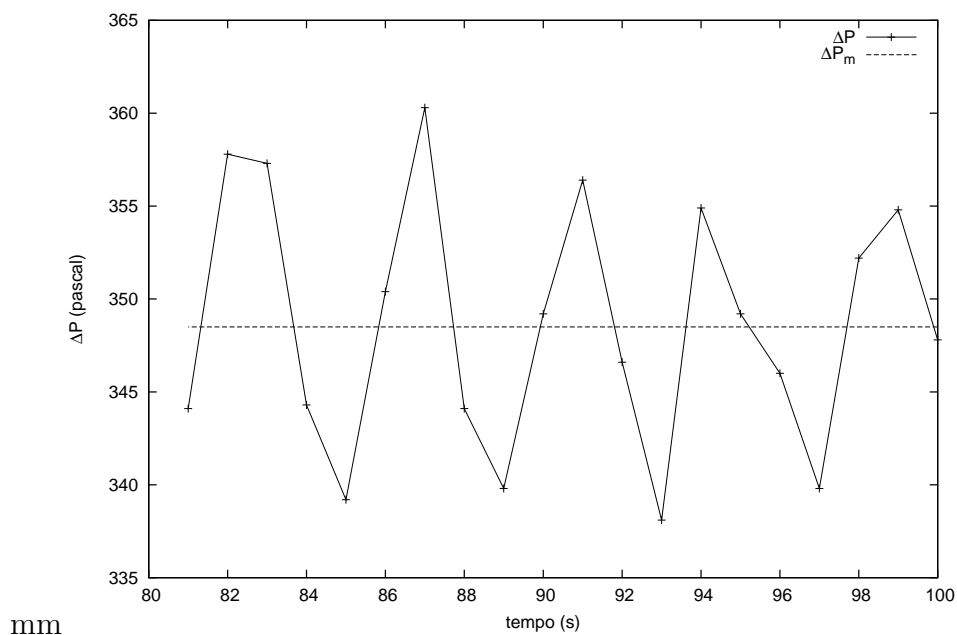


Figura 6.2: Queda de pressão instantânea e médio do Caso 1.

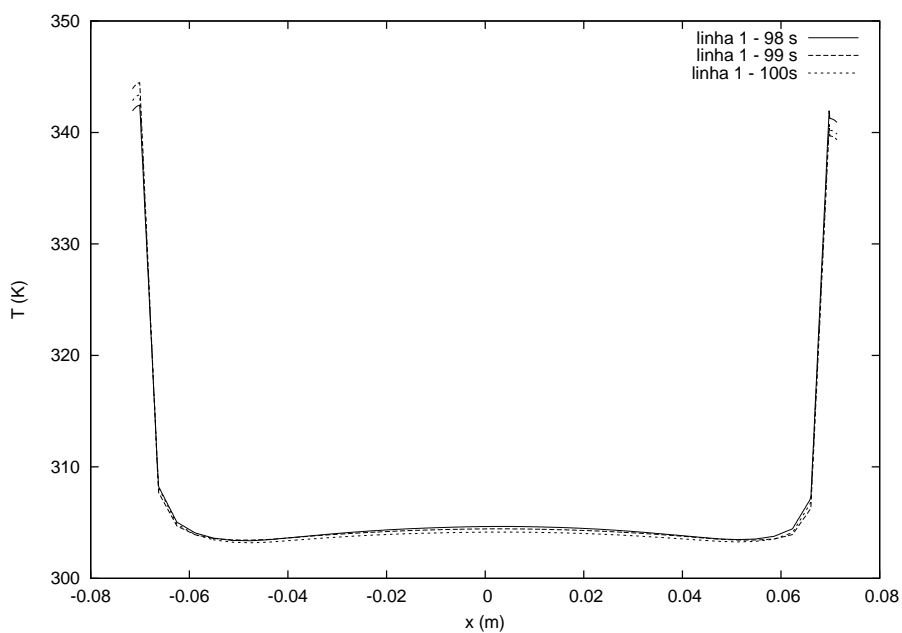


Figura 6.3: Perfil de temperatura ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

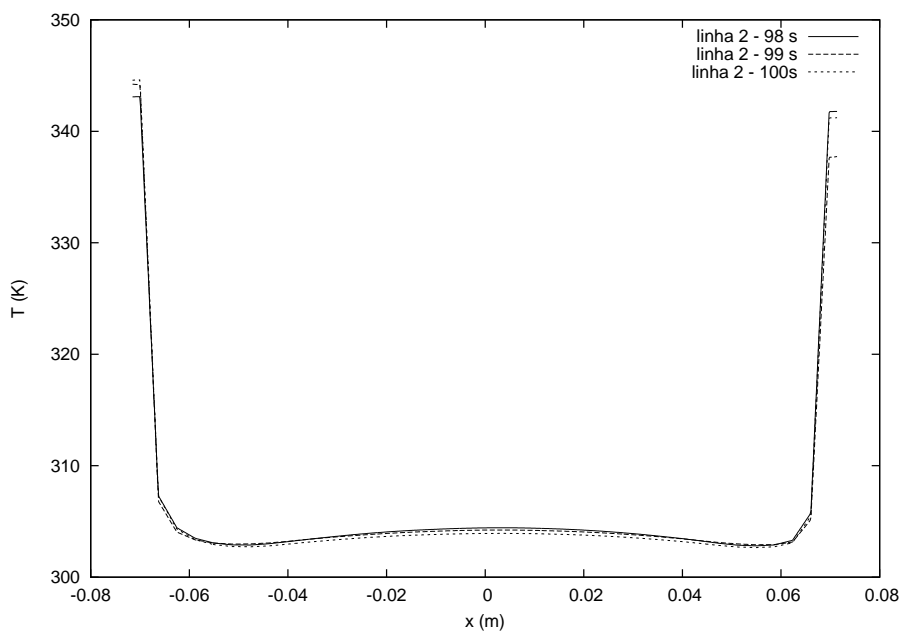


Figura 6.4: Perfil de temperatura ao longo da linha 2 em 98, 99 e 100 segundos.

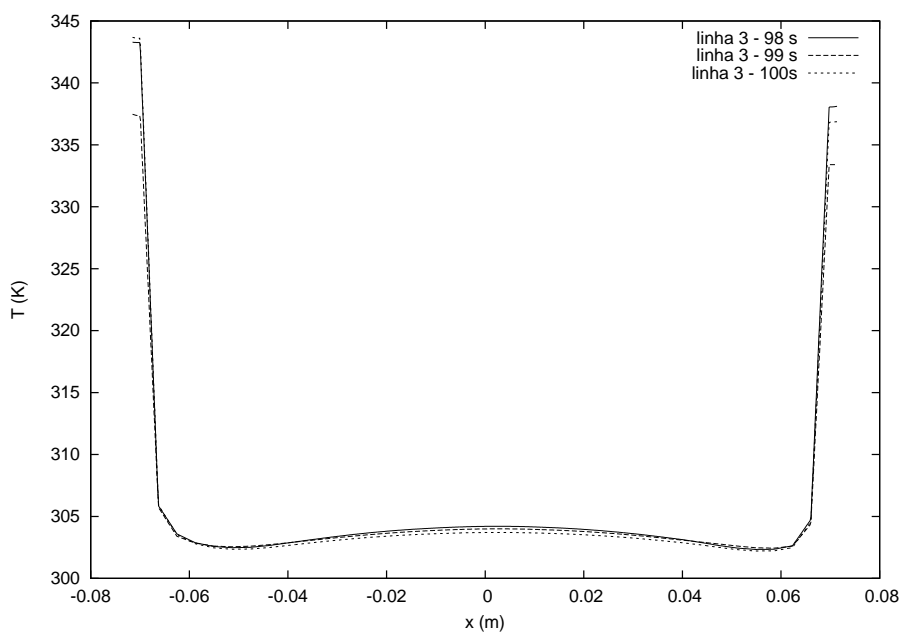


Figura 6.5: Perfil de temperatura ao longo da linha 3 em 98, 99 e 100 segundos.

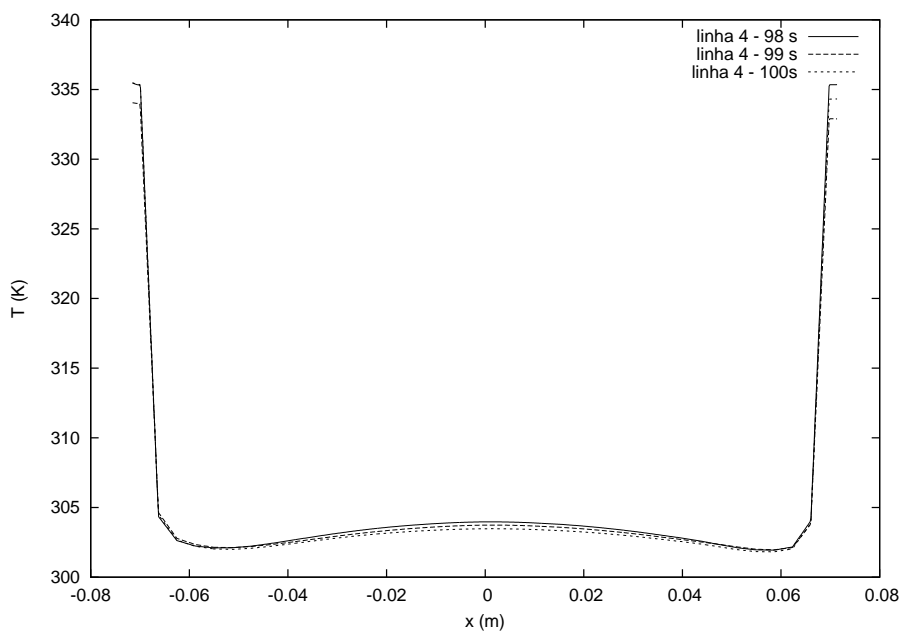


Figura 6.6: Perfil de temperatura ao longo da linha 4 em 98, 99 e 100 segundos.

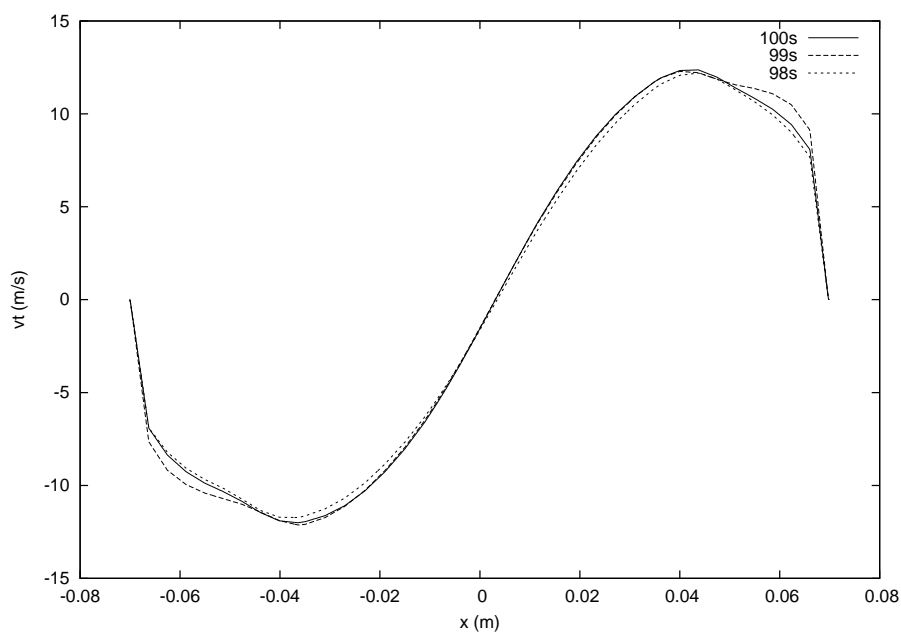


Figura 6.7: Perfil de velocidade ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

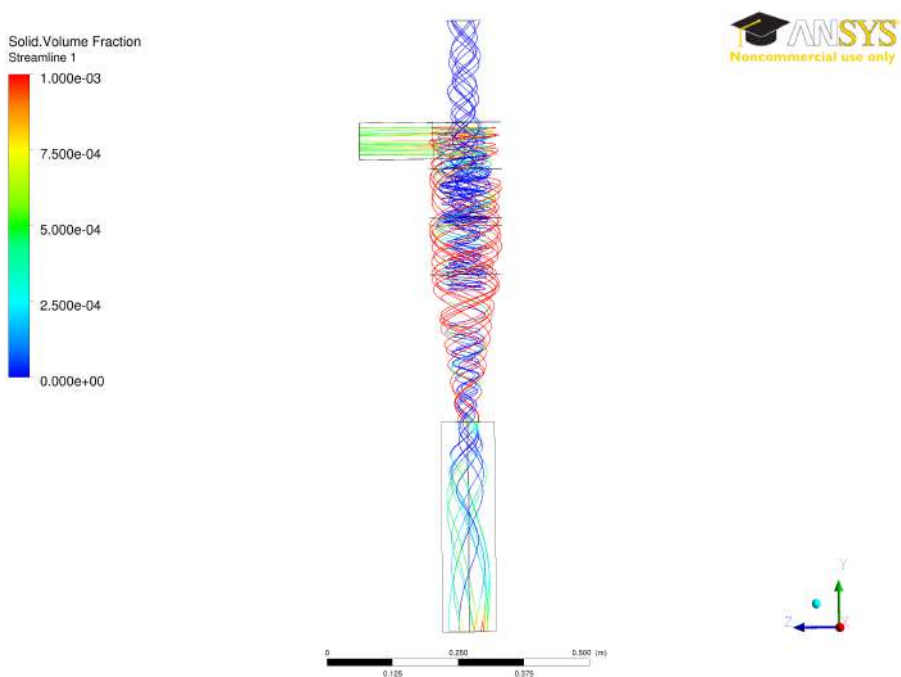
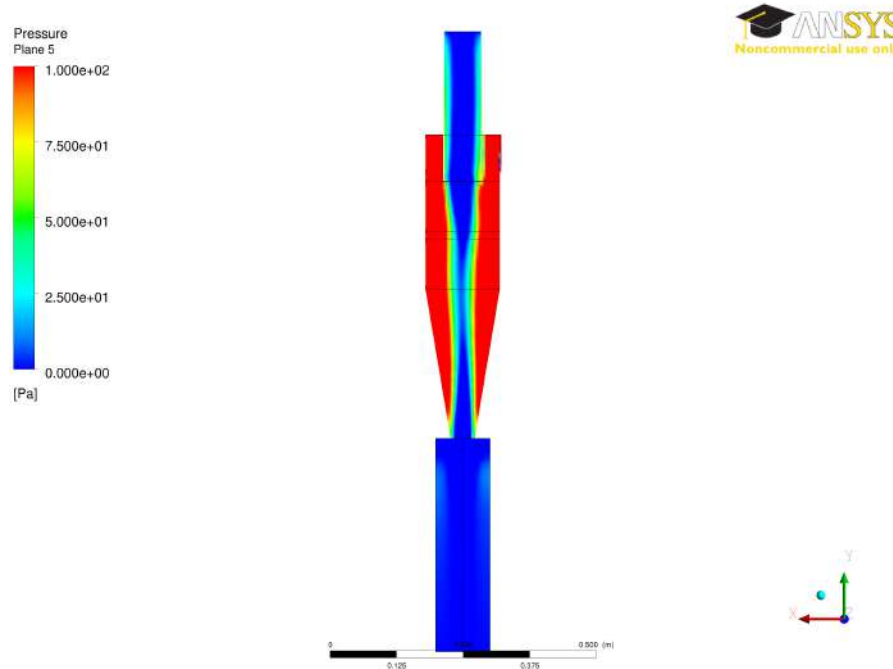
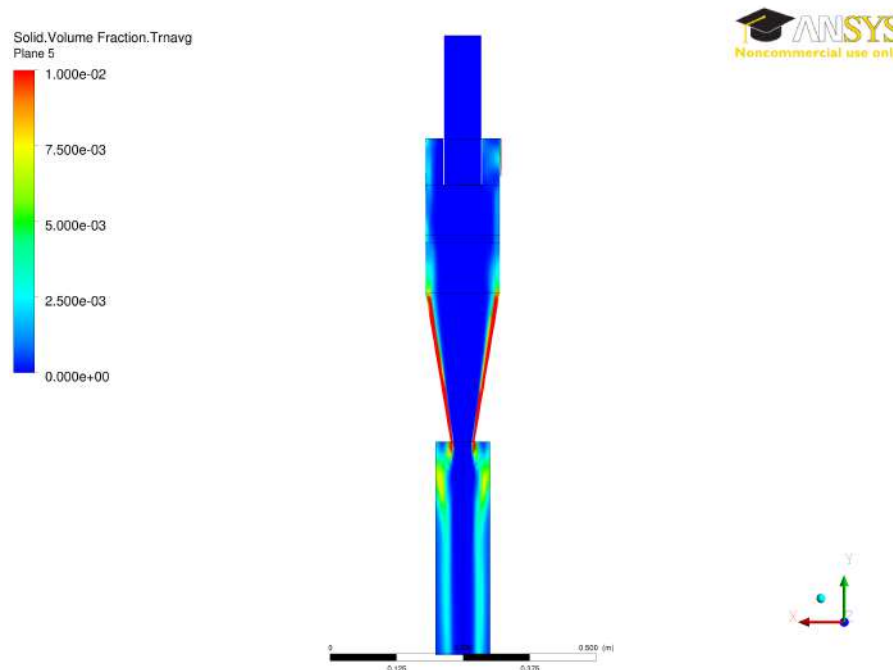


Figura 6.8: Linhas de correntes do escoamento com as suas frações volumétricas de sólidos no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.9:** Perfil de pressão no plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.10:** Perfil de fração volumétrica de sólidos média temporal através do plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.

**Tabela 6.1:** Tempo de simulação e computacional do Caso 1.

Tempo de simulação	Tempo computacional
100 s	18 dias e 18 horas

Tabela 6.2: Valores de  $y^+$  máximo, médio e mínimo na região Heat para o Caso 1.

$y_{max}^+$	$y_{med}^+$	$y_{min}^+$
112	83	63

6.1.2 Caso 2

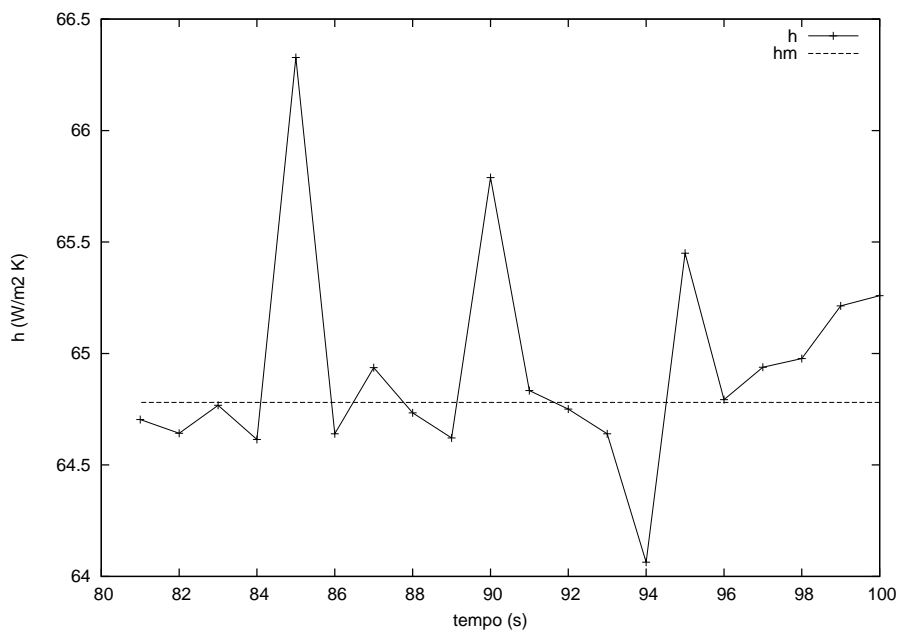


Figura 6.11: Coeficiente de transferência de calor instantâneo e médio do Caso 2.

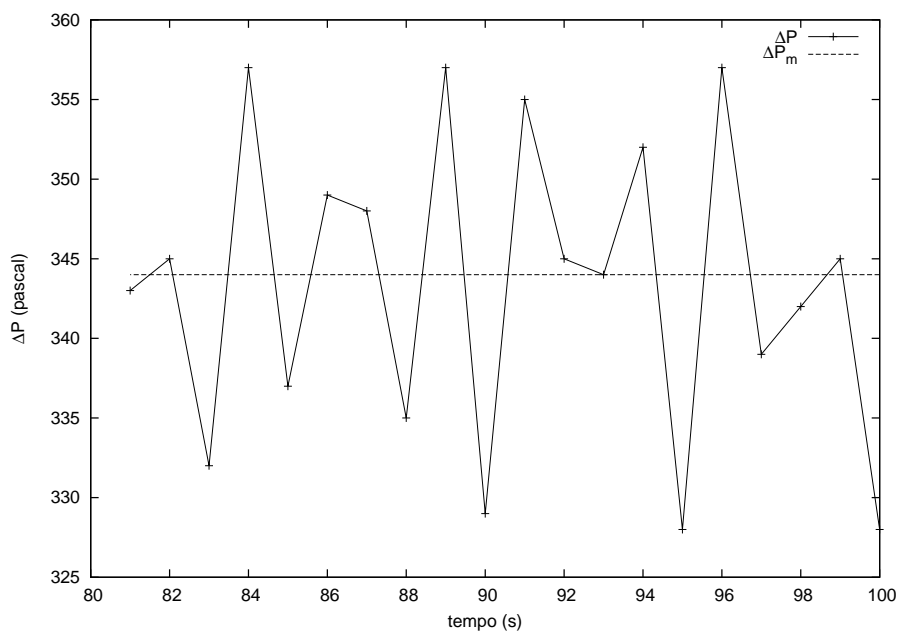


Figura 6.12: Queda de pressão instantânea e média do Caso 2.

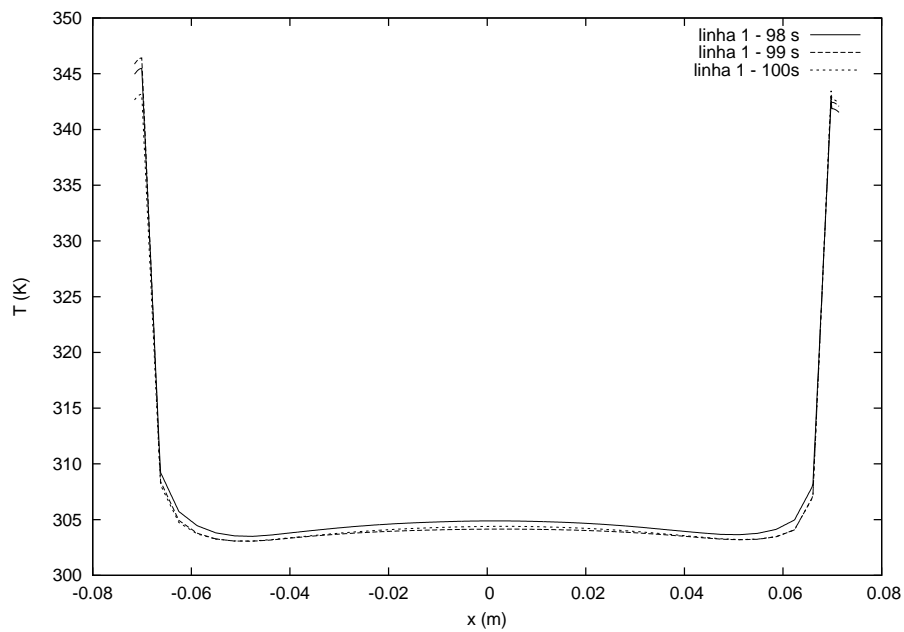


Figura 6.13: Perfil de temperatura ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

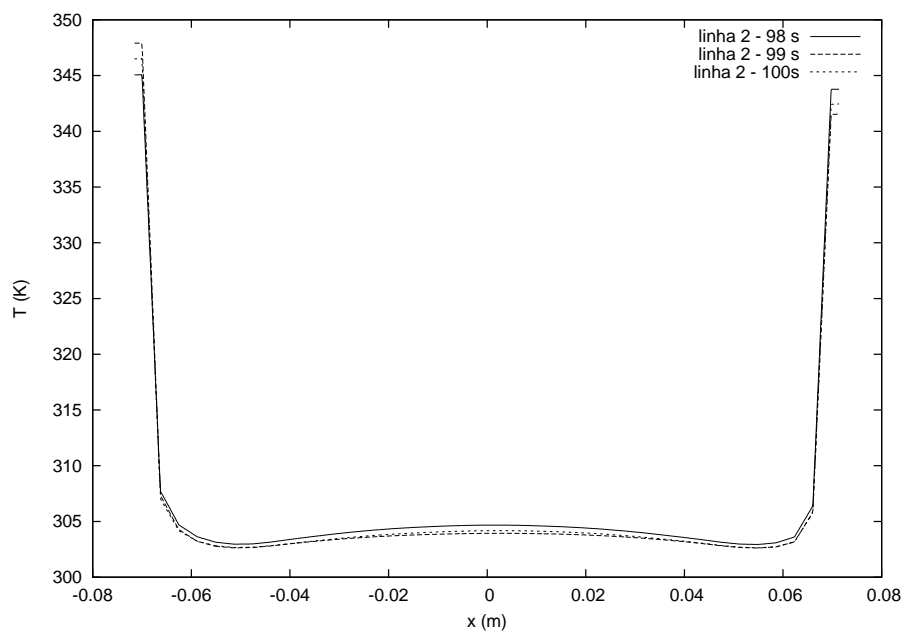


Figura 6.14: Perfil de temperatura ao longo da linha 2 em 98, 99 e 100 segundos.



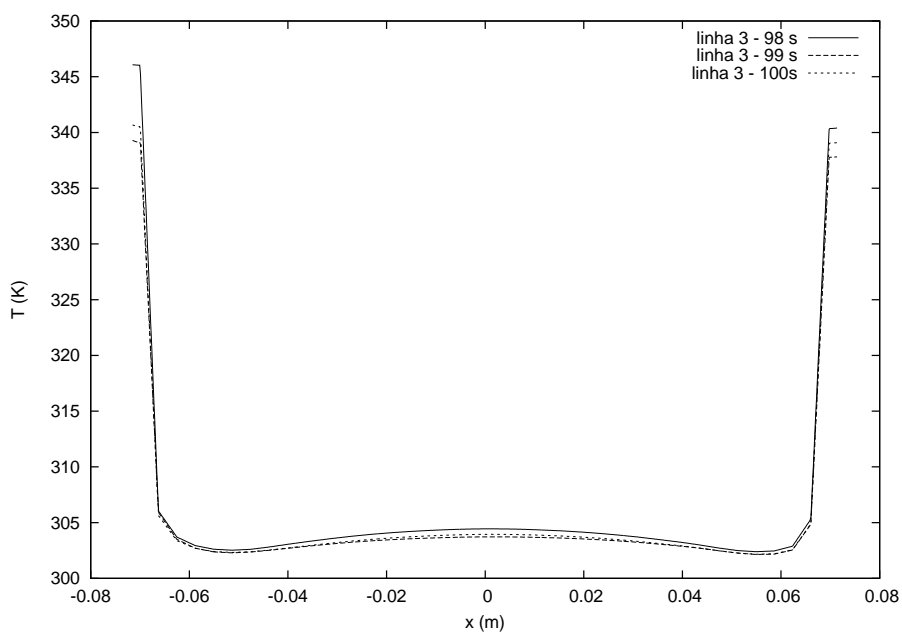


Figura 6.15: Perfil de temperatura ao longo da linha 3 em 98, 99 e 100 segundos.

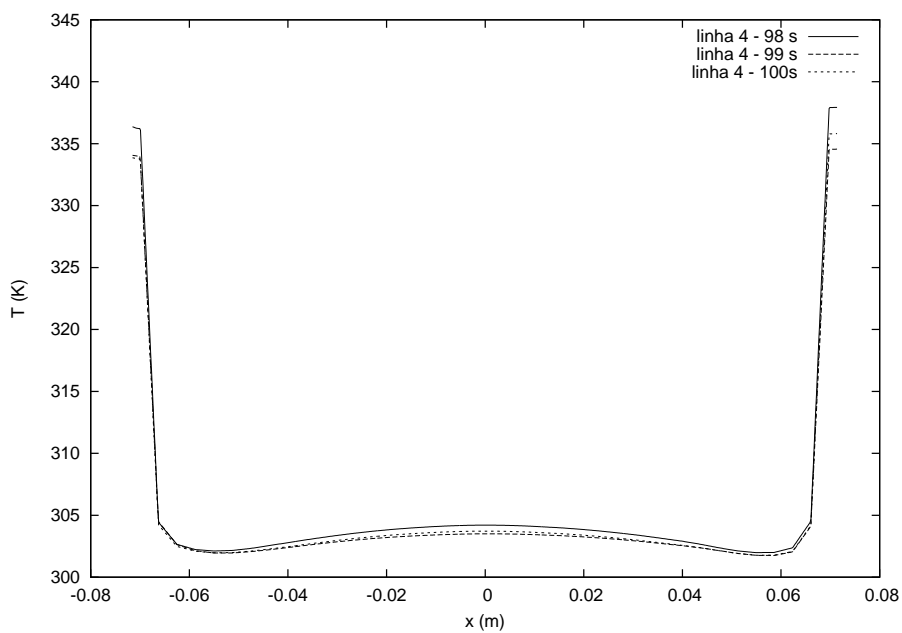


Figura 6.16: Perfil de temperatura ao longo da linha 4 em 98, 99 e 100 segundos.

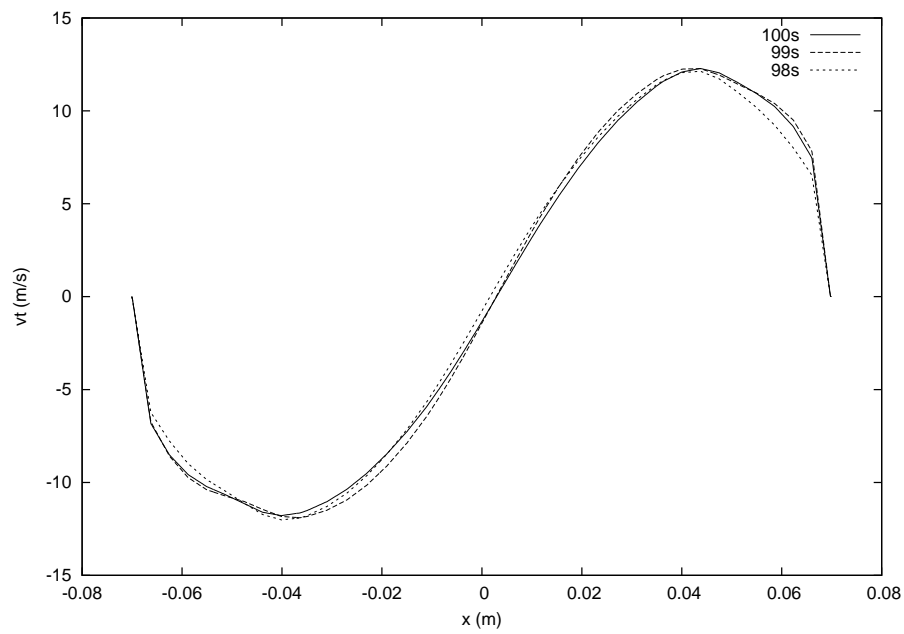


Figura 6.17: Perfil de velocidade ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

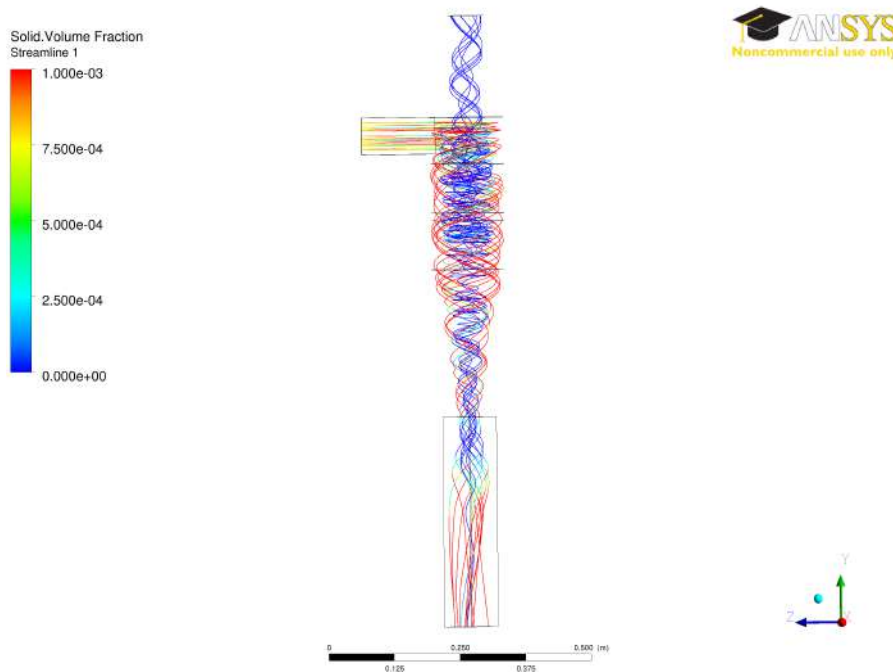
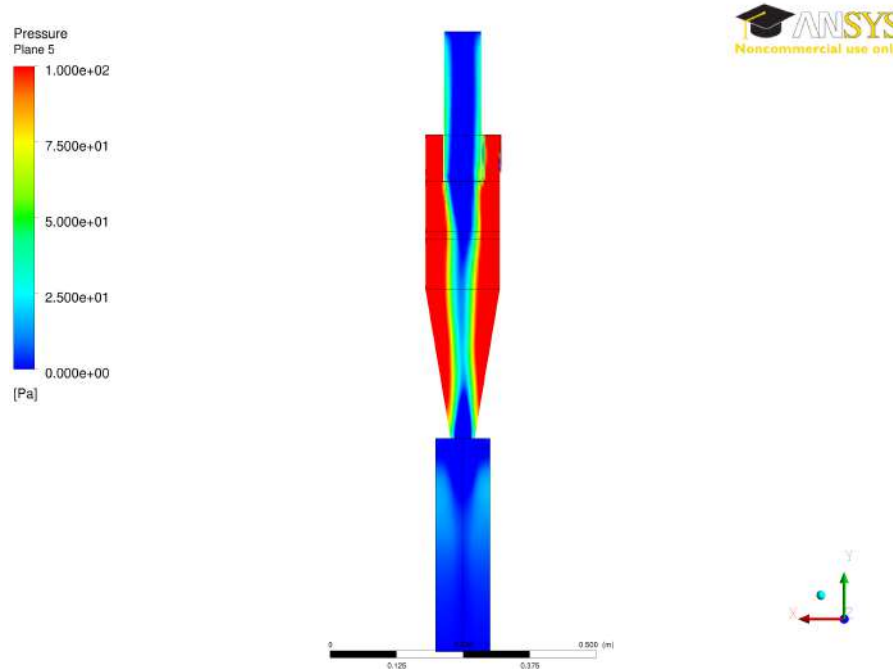
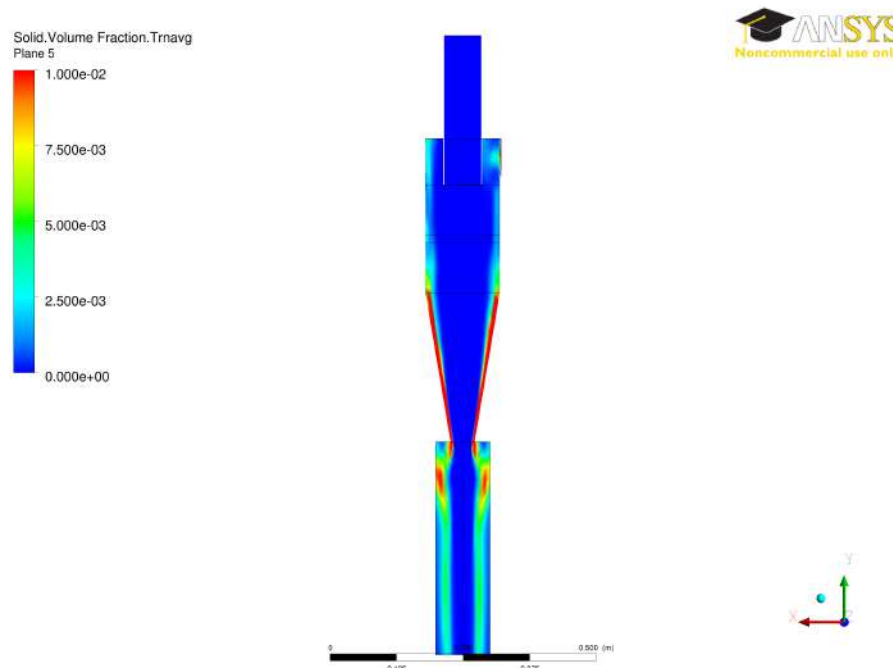


Figura 6.18: Linhas de correntes do escoamento com as suas frações volumétricas de sólidos no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.19:** Perfil de pressão no plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.20:** Perfil de fração volumétrica de sólidos média temporal através do plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.

**Tabela 6.3:** Tempo de simulação e computacional do Caso 2.

Tempo de simulação	Tempo computacional
100 s	16 dias e 15 horas

Tabela 6.4: Valores de  $y^+$  máximo, médio e mínimo na região Heat para o Caso 2.

$y_{max}^+$	$y_{med}^+$	$y_{min}^+$
113	84	61

6.1.3 Caso 3

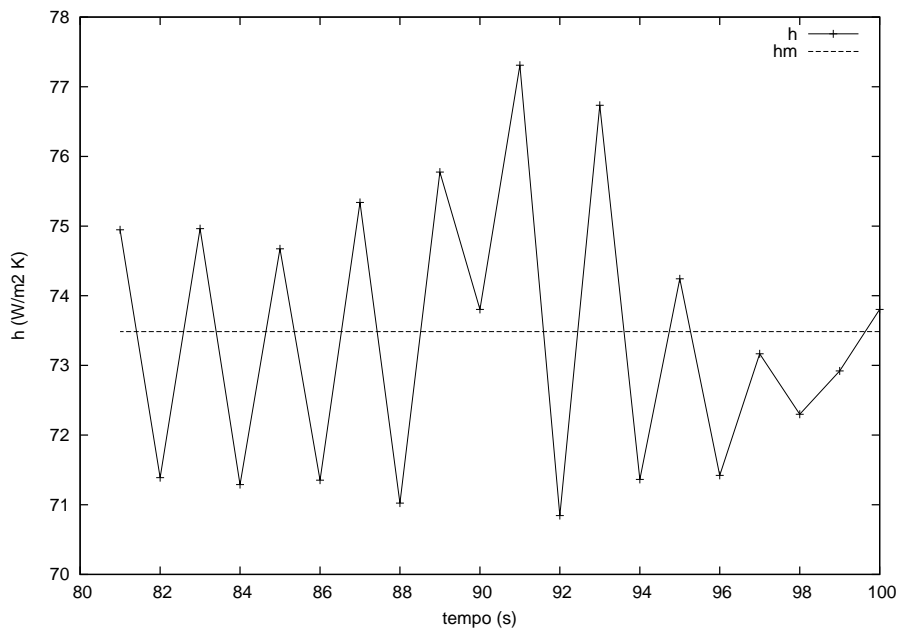


Figura 6.21: Coeficiente de transferência de calor instantâneo e médio do Caso 3.

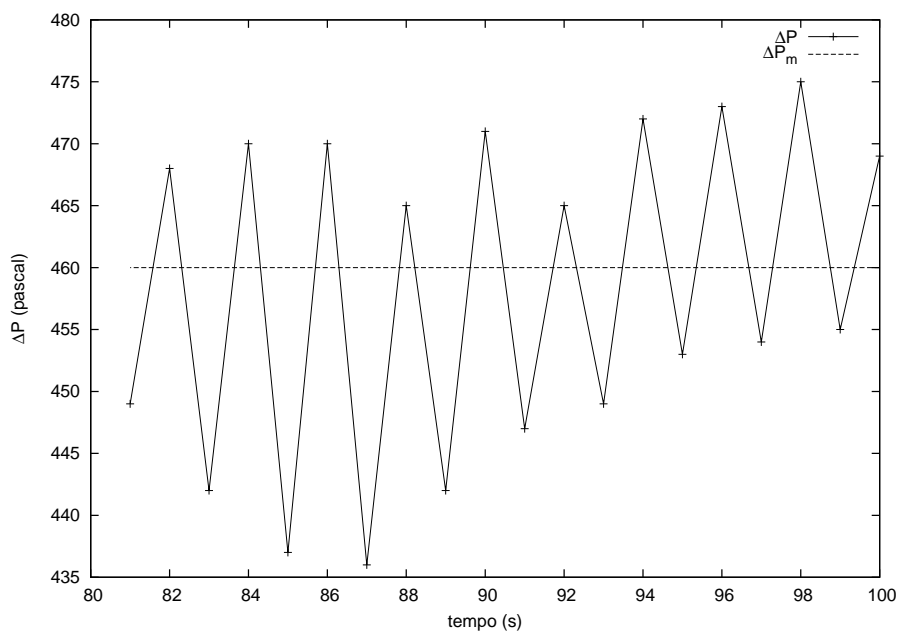


Figura 6.22: Queda de pressão instantânea e média do Caso 3.

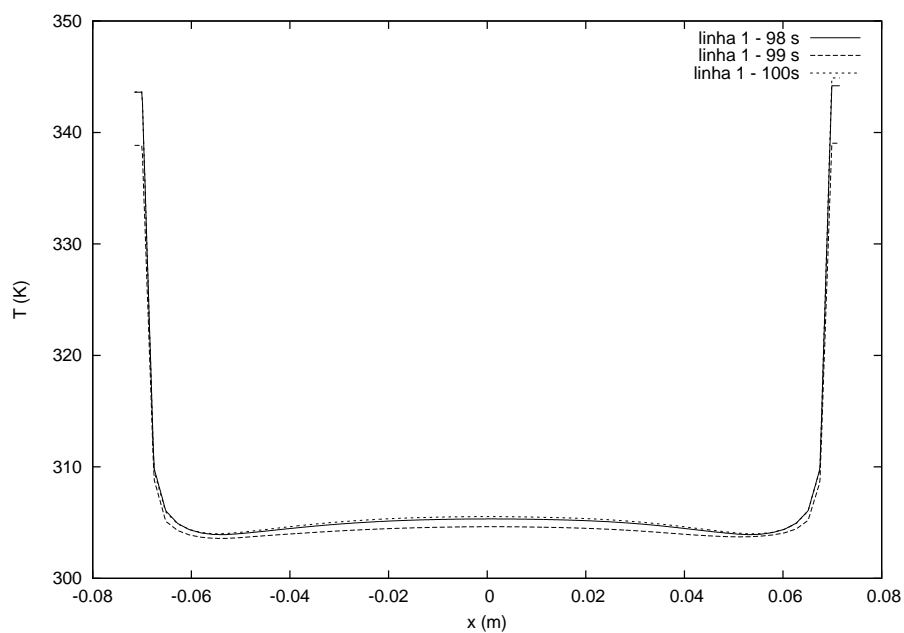


Figura 6.23: Perfil de temperatura ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

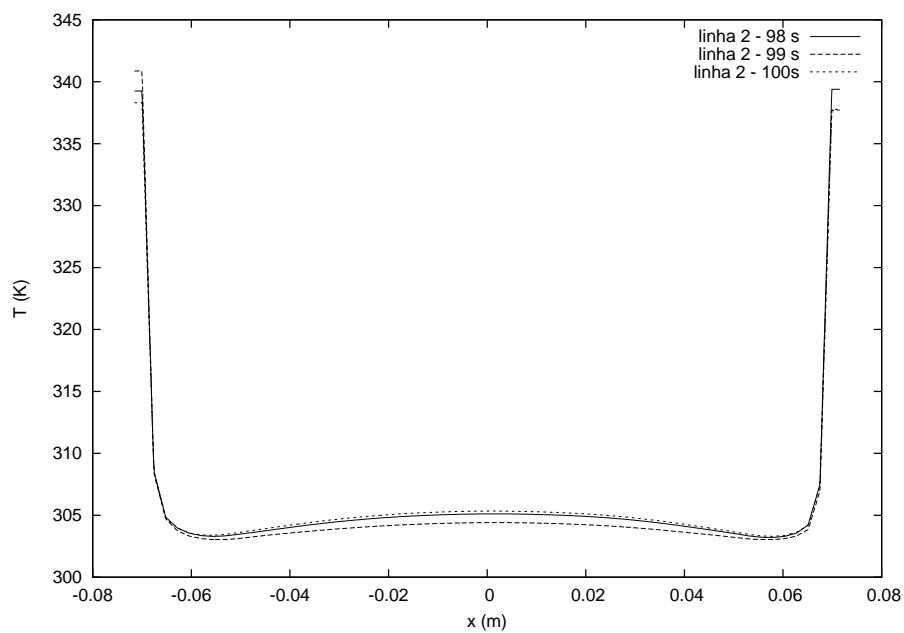


Figura 6.24: Perfil de temperatura ao longo da linha 2 em 98, 99 e 100 segundos.

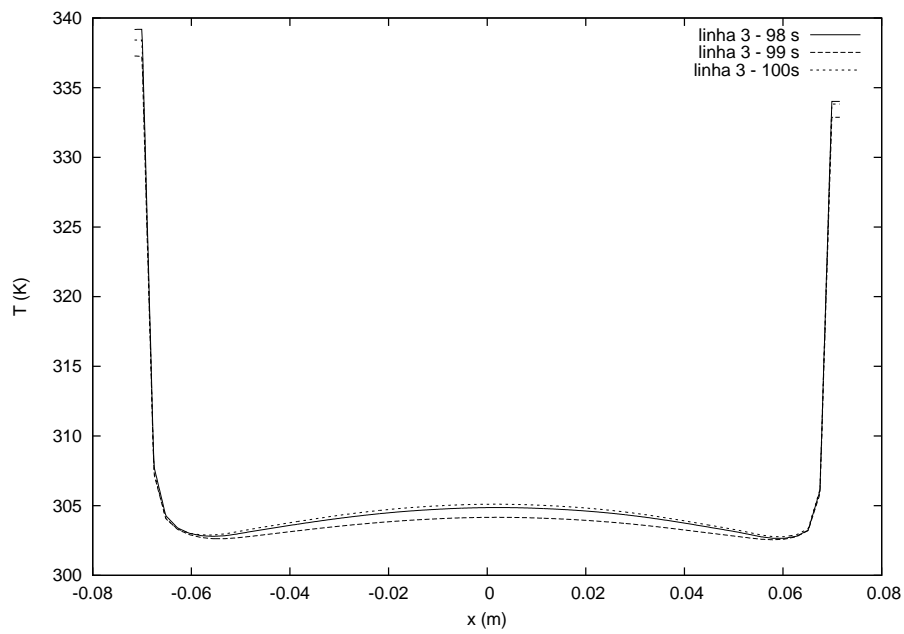


Figura 6.25: Perfil de temperatura ao longo da linha 3 em 98, 99 e 100 segundos.

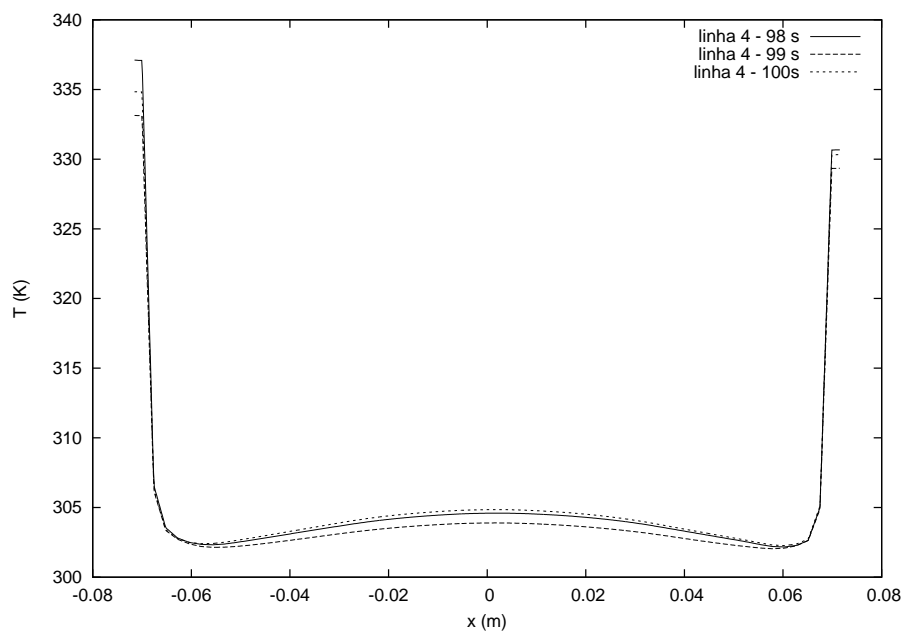


Figura 6.26: Perfil de temperatura ao longo da linha 4 em 98, 99 e 100 segundos.

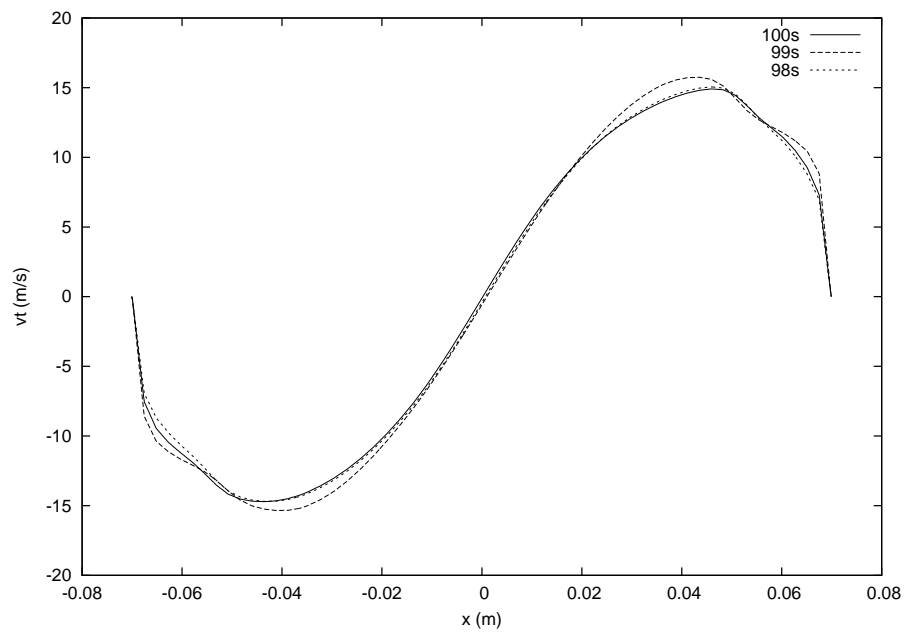


Figura 6.27: Perfil de velocidade ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

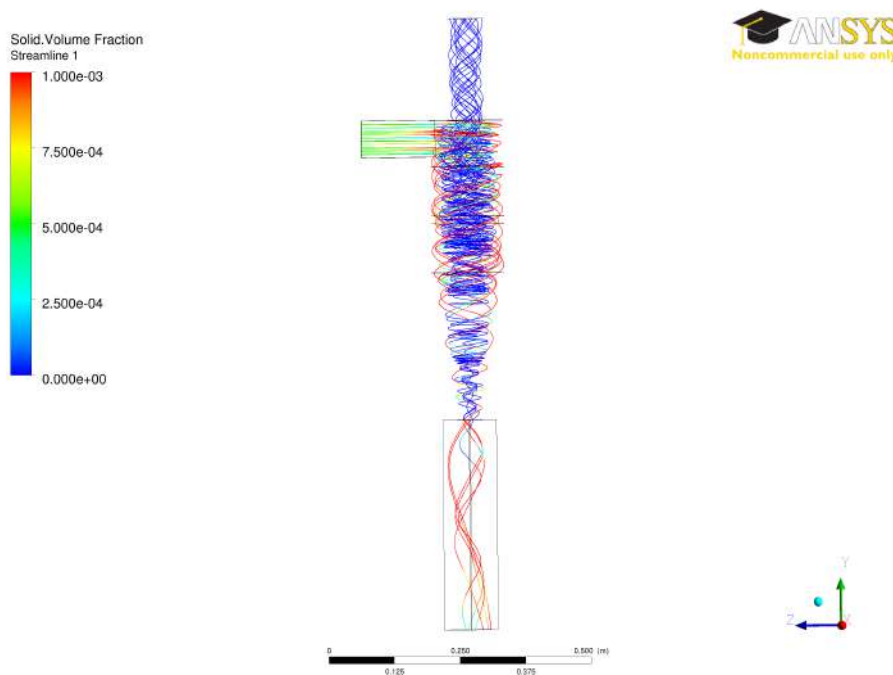
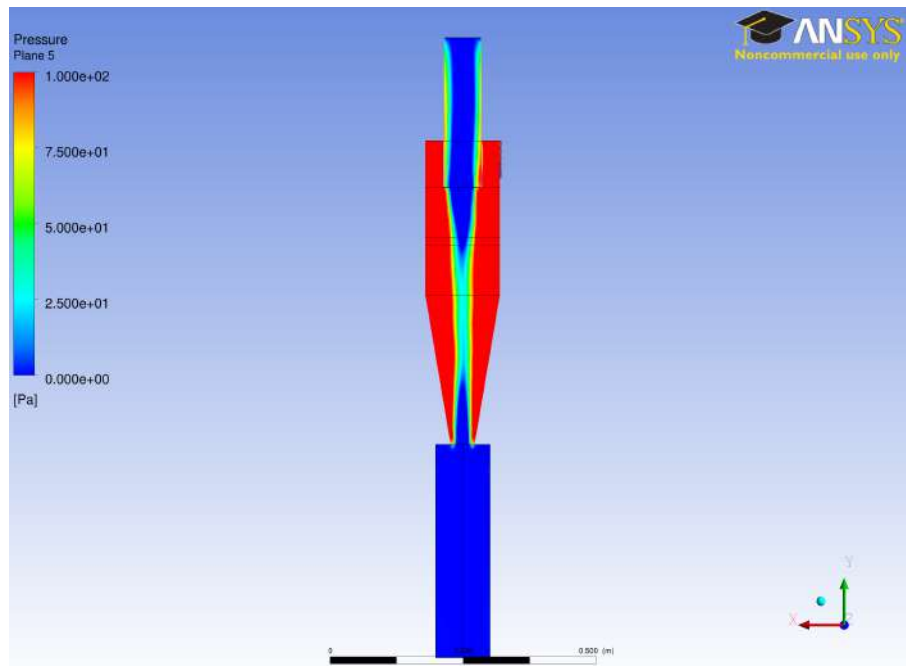
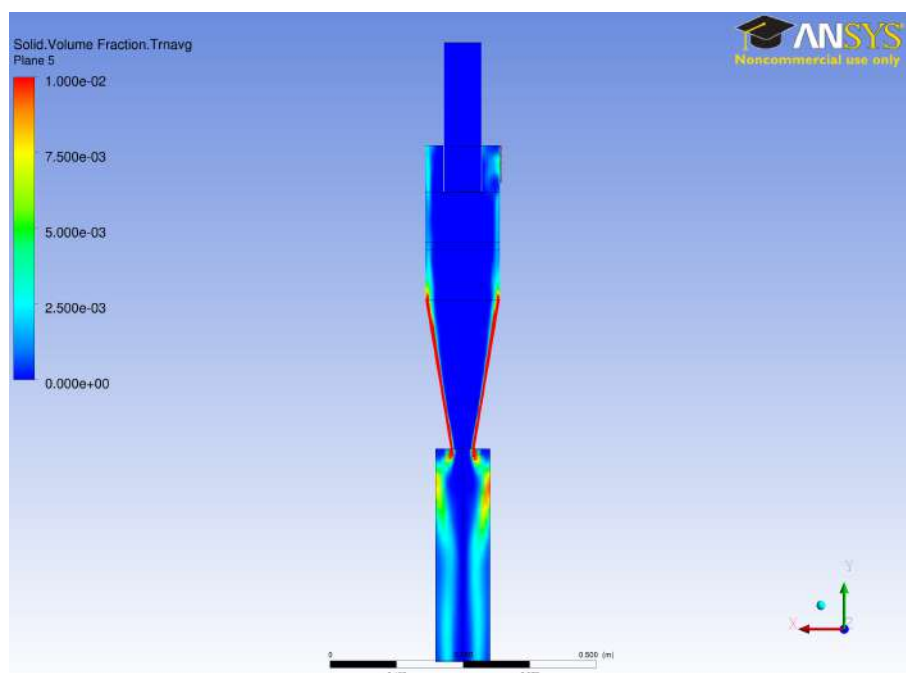


Figura 6.28: Linhas de correntes do escoamento com as suas frações volumétricas de sólidos no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.29:** Perfil de pressão no plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.30:** Perfil de fração volumétrica de sólidos média temporal através do plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.

**Tabela 6.5:** Tempo de simulação e computacional do Caso 3.

Tempo de simulação	Tempo computacional
100 s	25 dias e 17 horas



Tabela 6.6: Valores de  $y^+$  máximo, médio e mínimo na região Heat para o Caso 3.

$y_{max}^+$	$y_{med}^+$	$y_{min}^+$
81	59	37

6.1.4 Caso 4

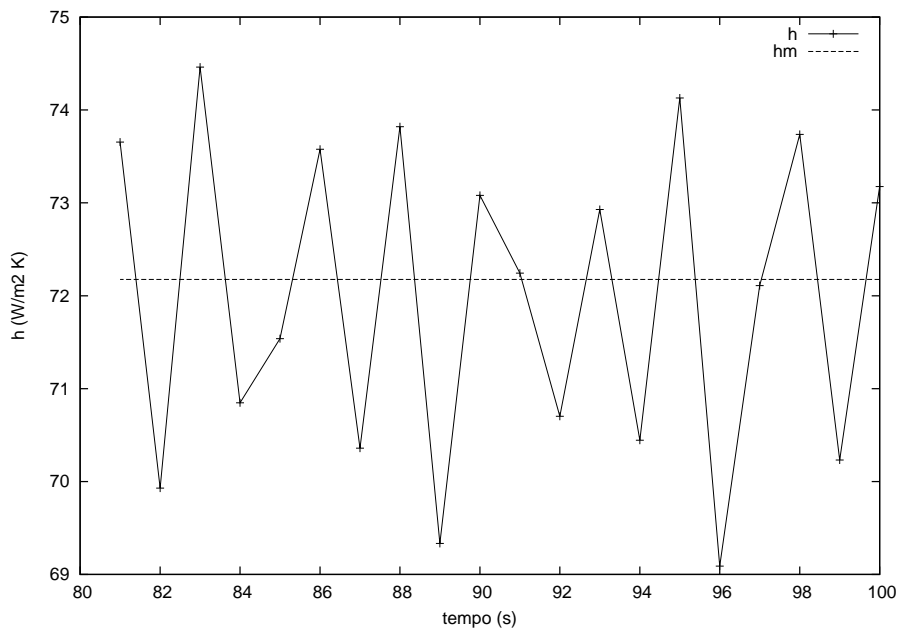


Figura 6.31: Coeficiente de transferência de calor instantâneo e médio do Caso 4.

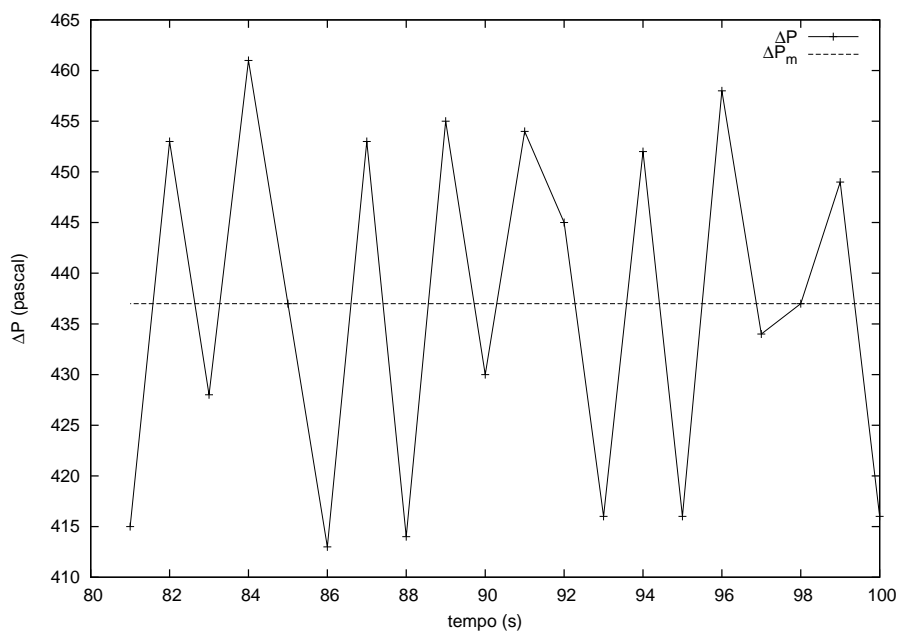


Figura 6.32: Queda de pressão instantânea e média do Caso 4.

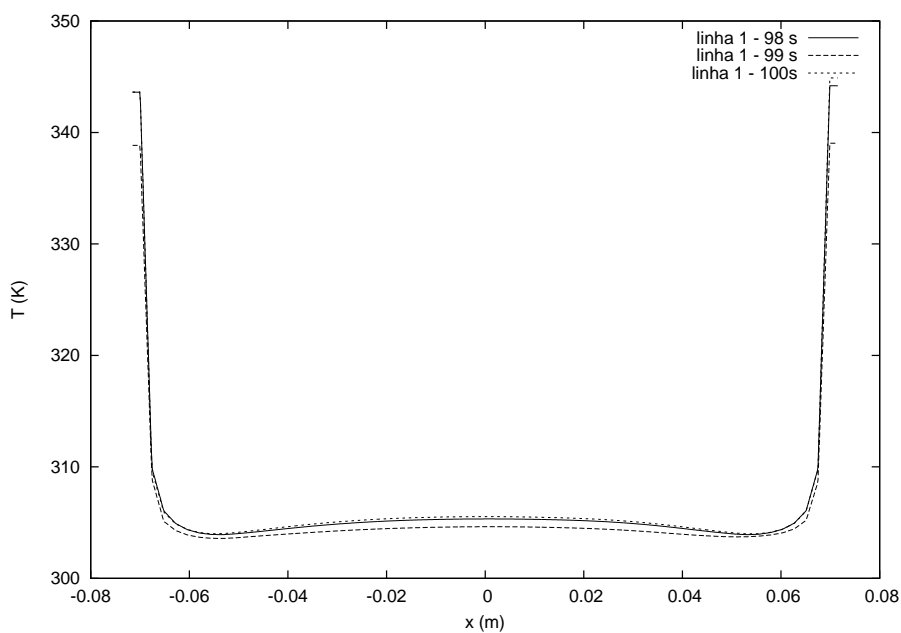


Figura 6.33: Perfil de temperatura ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

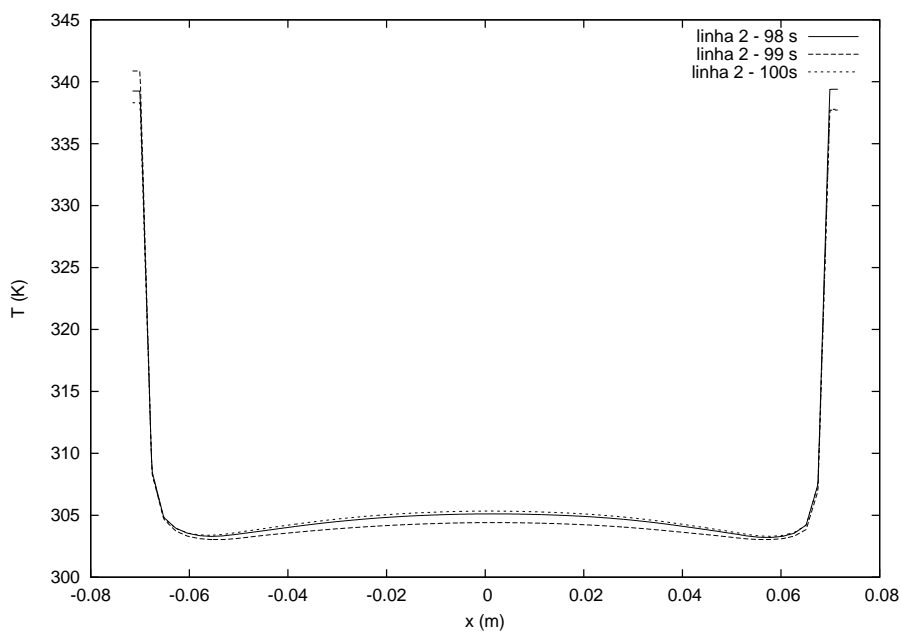


Figura 6.34: Perfil de temperatura ao longo da linha 2 em 98, 99 e 100 segundos.

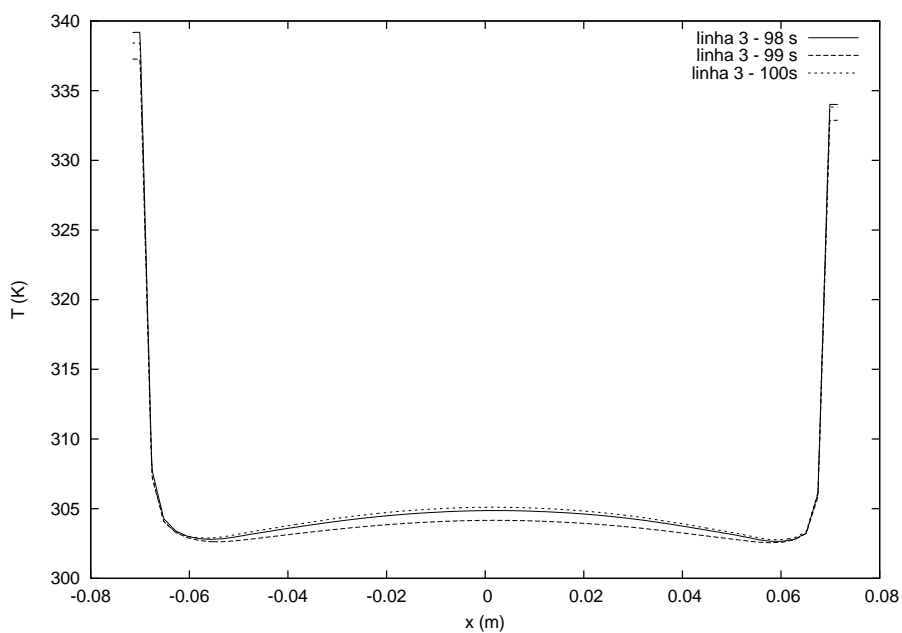


Figura 6.35: Perfil de temperatura ao longo da linha 3 em 98, 99 e 100 segundos.

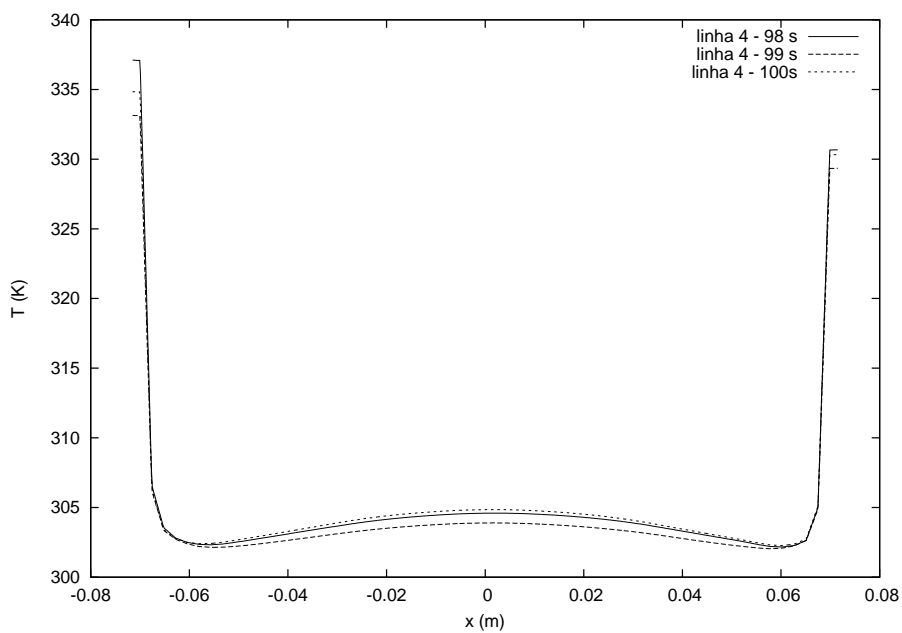


Figura 6.36: Perfil de temperatura ao longo da linha 4 em 98, 99 e 100 segundos.

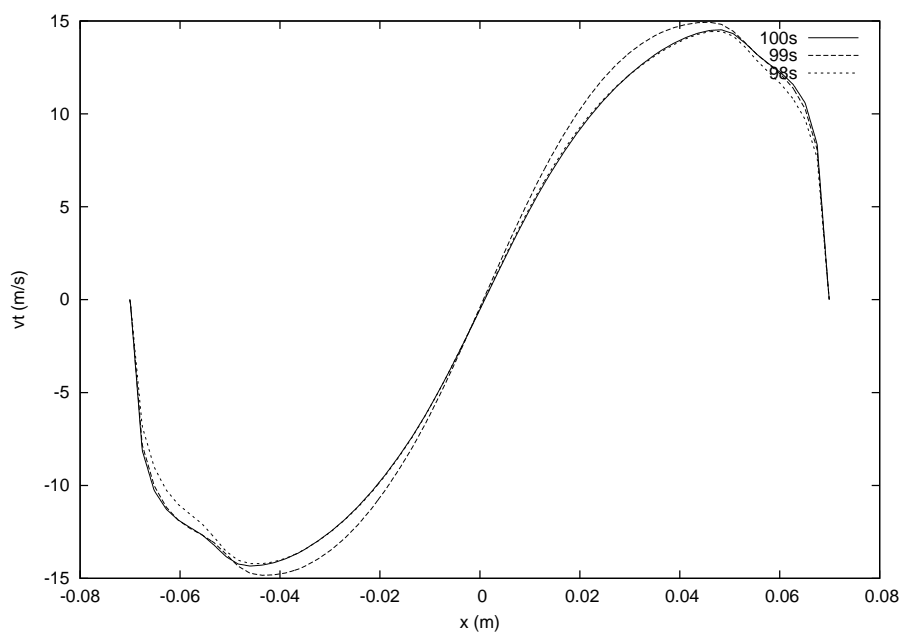


Figura 6.37: Perfil de velocidade ao longo da linha 1 em 98, 99 e 100 segundos.

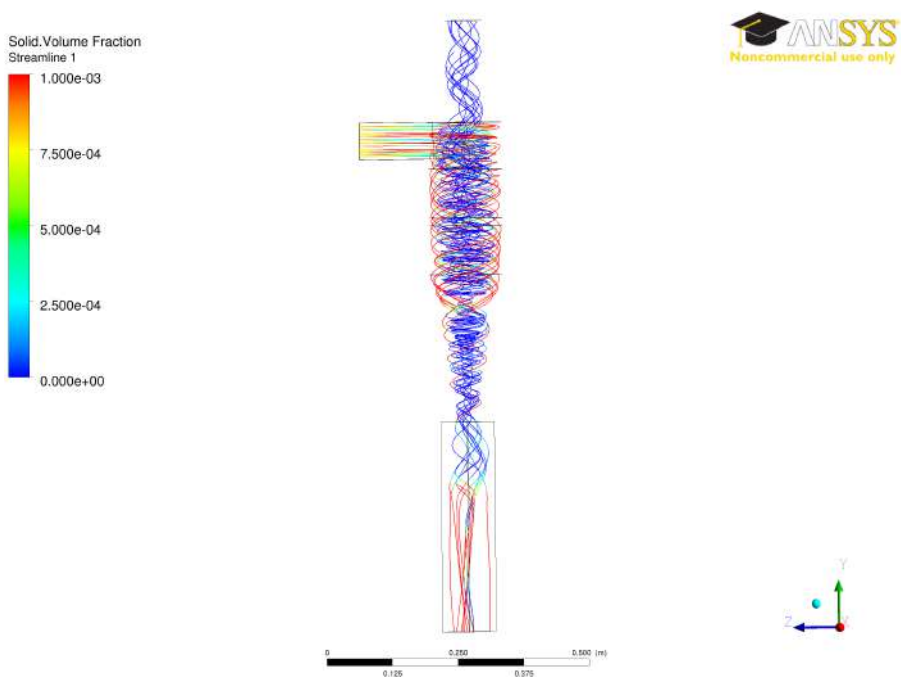
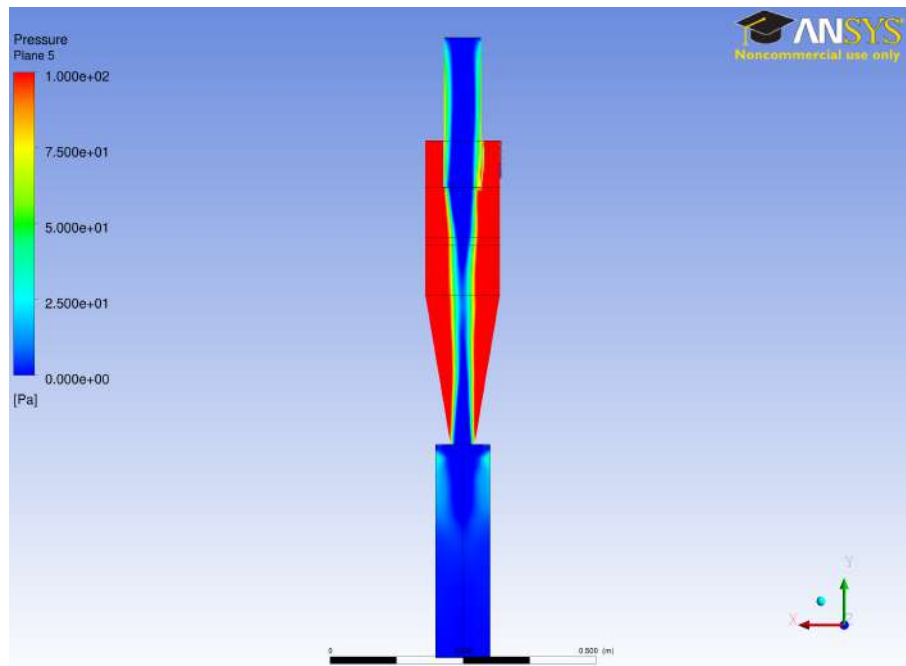
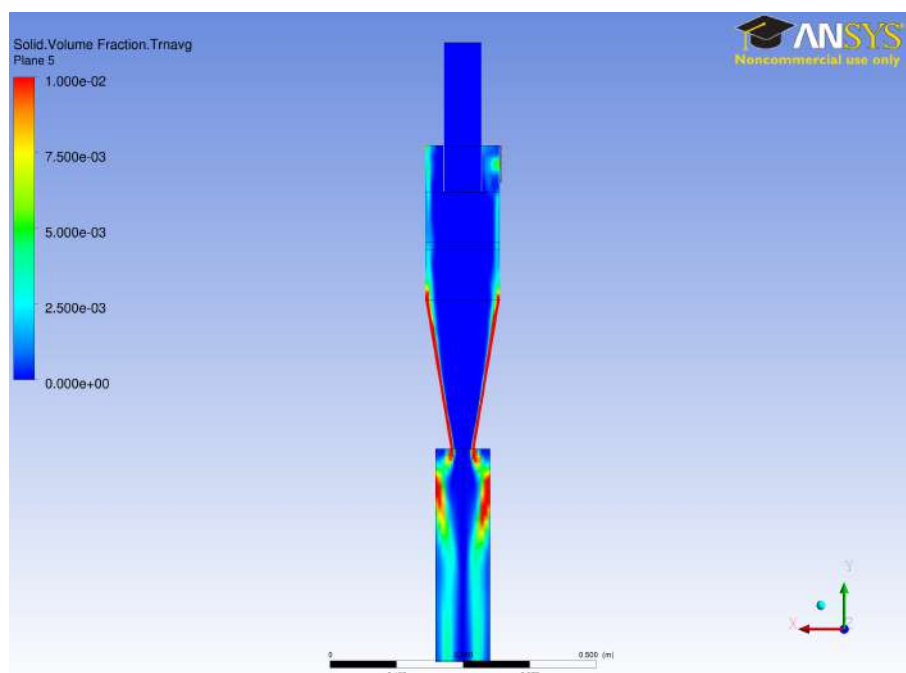


Figura 6.38: Linhas de correntes do escoamento com as suas frações volumétricas de sólidos no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.39:** Perfil de pressão no plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.



**Figura 6.40:** Perfil de fração volumétrica de sólidos média temporal através do plano XY em  $Z = 0$  no tempo de simulação de 100 segundos.

**Tabela 6.7:** Tempo de simulação e computacional do Caso 4.

Tempo de simulação	Tempo computacional
100 s	25 dias

**Tabela 6.8:** Valores de  $y^+$  máximo, médio e mínimo na região Heat para o Caso 4.

$y_{max}^+$	$y_{med}^+$	$y_{min}^+$
82	59	41

### 6.1.5 Comparação com os dados experimentais

O objetivo desta seção é comparar os coeficientes de transferência de calor médio,  $hm$ , e de queda de pressão médio,  $\Delta P_m$ , obtidos de todos os casos com os dados experimentais disponíveis por Gupta e Nag (2000).

**Tabela 6.9:** Comparação dos coeficientes de transferência de calor médio,  $hm$ , obtidos pelas simulações com os coeficientes de transferência de calor,  $h_{exp}$ , obtidos experimentalmente por Gupta e Nag (2000).

Condição Operacional	Caso	$hm$ ( $W/m^2K$ )	$h_{exp}$ ( $W/m^2K$ )	Erro (%)
A	1	65,1	177,0	63,2
A	3	73,4	177,0	58,5
B	2	64,7	178,5	63,7
B	4	72,1	178,5	59,6

**Tabela 6.10:** Comparação da queda de pressão média,  $\Delta P_m$ , obtidas pelas simulações com a queda de pressão,  $\Delta P_{exp}$ , obtidas experimentalmente por Gupta e Nag (2000).

Condição Operacional	Caso	$\Delta P_m$ (pascal)	$\Delta P_{exp}$ (pascal)	Erro (%)
A	1	348,5	735,4	52,6
A	3	460,4	735,4	37,4
B	2	344,9	764,9	54,9
B	4	437,4	764,9	42,8

## 6.2 Discussões

Analisando o coeficiente de transferência de calor, a queda de pressão e os perfis de velocidade ao longo do tempo, pode-se perceber que o regime não alcança o estado estacionário, porém percebe-se que todos os casos tendem a um regime pseudoestacionário com oscilações que tendem a formar um padrão de repetibilidade. Isto se deve a característica da natureza transiente do escoamento no ciclone.

Para todos os casos os valores de  $y^+$  deram acima de 1, valor recomendado para o modelo de turbulência utilizado. Entretanto, não realizaram-se simulações com malhas mais refinadas devido ao alto custo computacional.

Os coeficientes de transferência de calor médio de todos os casos apresentaram erros significantes frente aos dados experimentais. Embora a fração volumétrica de sólidos na alimentação aumente do Caso 1 para o Caso 2, percebe-se que o coeficiente de transferência de calor médio diminuiu, contrariando os dados experimentais. Essa mesma situação aconteceu para o Caso 3 e 4. Estes elevados erros em relação aos experimentos podem ter sido provocados devido aos altos valores de  $y^+$ .

Os casos que utilizaram a Malha 2, malha mais refinada, apresentaram erro menor frente aos dados experimentais, evidenciando que a malha teve bastante influência no resultado final de cada um dos casos.

# Capítulo 7

## Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados não apresentaram uma boa adequação com os resultados experimentais de Gupta e Nag (2000).

Recomendam-se simulações utilizando malhas mais refinadas que a utilizada, assim como a utilização de modelos de turbulência mais robustos, como *Reynolds Stress* e *Low-Re stress-omega*.

Como sugestões para trabalhos futuros, deve-se avaliar a influência dos modelos de turbulência no coeficiente de transferência de calor.



# Referências Bibliográficas

- Cokljat, D., Slack, M., Vasquez, S., e Bakker, A. (xxxx). Reynolds-stress model for eulerian multiphase. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, x:xxx–xxx.
- Cortés, C. e Gil, A. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33:409 – 452.
- Crevasco, M. A. (1994). *Estudo sobre escoamento ar-partículas em um reator ciclônico*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Gronald, G. e Derksen, J. (2011). Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches. *Powder Technology*, 205:160 – 171.
- Gupta, A. V. S. S. K. S. e Nag, P. K. (2000). Prediction of heat transfer coefficient in the cyclone separator of a cfb. *International Journal of Energy Research*, 24:1065 – 1079.
- Hoekstra, A., Derksen, J., e Akker, H. V. D. (1999). An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. *Chemical Engineering Science*, 54:2055 – 2065.
- Jakirlic, S. e Hanjalic, K. (2002). Modeling rotating and swirling turbulent flows: a perpetual challenge. *AIAA*, 40:1984–96.
- Karagoz, I. e Kaya, F. (2007). Cfd investigation of the flow and heat transfer characteristics in a tangential inlet cyclone. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34:1119 – 1126.
- Peres, A., Meier, H., Huziwara, W., e Mori, M. (2002). Experimental study and advances in 3-D simulation of gas flow in a cyclone using CFD. In *European Symposium on Com-*

## Referências Bibliográficas

---

*puter Aided Process Engineering-12 35th European Symposium of the Working Party on Computer Aided Process Engineering.*

Robertson, A., Fan, Z., Goldstein, H., Horazak, D., Newby, R., e Bose, A. (2005). Second generation PFB plant with super critical pressure. In *Proceedings of International Pittsburgh Coal Conference.*

Shimizu, A., Yokomine, T., e Nagafuchi, T. (2004). Development of gas–solid direct contact heat exchanger by use of axial flow cyclone. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:4601 – 4614.

Syamlal, M. e O'Brien, T. J. (1989). Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. *AIChE*, 85:22–31.

Szekely, J. e Carr, R. (1966). Heat transfer in a cyclone. *Chemical Engineering Science*, 21:1119 – 1132.

Valle, J. M. D. (1948). *Micromeritics*. London.

Wan, G., Sun, G., Xue, X., e Shi, M. (2008). Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*, 183:94 – 104.