



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



MARINA DA SILVA ZIMMERMANN

**PROCESSO DE SEPARAÇÃO CHUMBO/AR USANDO SEPARADOR  
CICLÔNICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Campina Grande, Abril de 2018.

**MARINA DA SILVA ZIMMERMANN**

**PROCESSO DE SEPARAÇÃO CHUMBO/AR USANDO SEPARADOR  
CICLÔNICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Dissertação de Mestrado a ser apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Modelagem e Simulação

Orientador: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

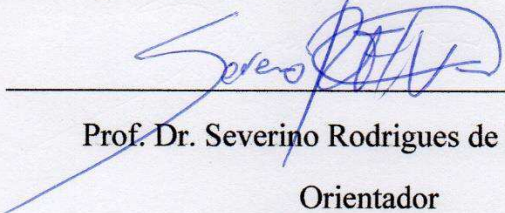
Campina Grande

Abril de 2018

**Marina da Silva Zimmermann**

**PROCESSO DE SEPARAÇÃO CHUMBO/AR USANDO SEPARADOR  
CICLÔNICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

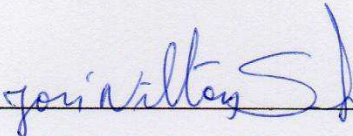


---

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Orientador

UAEQ/CCT/UFCG

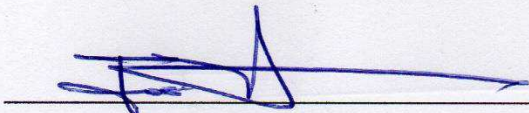


---

Prof. Dr. José Nilton Silva

Avaliador Interno

UAEQ/CCT/UFCG

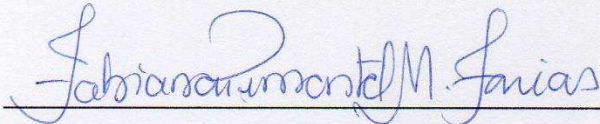


---

Prof. Dr. José Jailson Nicacio Alves

Avaliador Interno

UAEQ/CCT/UFCG



---

Profa. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias

Avaliadora Externa

UATEC/CDSA/UFCG

**Campina Grande**

**2018**

## DEDICATÓRIA

*Em memória a minha avó Maria que é exemplo de força e determinação, uma mulher muito à frente de seu tempo que sempre lutou por aquilo que acreditava.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha vida e amor incondicional.

Aos meus pais, Cláudia Maria da Silva Zimmermann e Renary Quadros Zimmermann, pela minha vida, pelos ensinamentos e por tanto amor;

Ao meu marido, Wesley Michel, por estar sempre ao meu lado, por me apoiar em todos os momentos e me dar forças para continuar nas horas mais difíceis, pelo amor, companheirismo, carinho e paciência.

À minha avó Maria (*in memoriam*) por todos os ensinamentos e oportunidades que a senhora me proporcionou. Obrigada por seu carinho, preocupação e atenção.

Ao Professor Dr. Severino Rodrigues Faria Neto por todos os ensinamentos e por mostrar o verdadeiro amor pela profissão e dar real importância ao aprendizado do aluno.

À todos os professores do Departamento de Engenharia Química pelo conhecimento adquirido.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem e do Laboratório de Simulação de Processos, pelo auxílio e apoio.

Aos meus grandes amigos que sempre estão do meu lado, nos momentos alegres e nos momentos difíceis: Anderson Alister, Beth Costa, Cleber Filho, Mayara Beatriz, Vanessa Guimarães, Thiago Henrique, e Thiago Kramer.

À tantos outros que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste projeto.

*“O maior erro que você pode cometer, é  
o de ficar o tempo todo com medo de  
cometer algum.”*

*Elbert Hubbard*

Zimmermann, Marina da Silva. **Processo de separação chumbo/ar usando separador ciclônico: modelagem e simulação**. Dissertação - Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2018.

## RESUMO

Durante a produção de baterias automotivas partículas de chumbo podem ficar suspensas no ar causando riscos ao meio ambiente e sobretudo aos trabalhadores e a comunidade em torno da fábrica. Geralmente são utilizados exaustores nos galpões das fábricas que direcionam o ar para ser tratado por um filtro de mangas. Estes filtros devem passar por manutenção periódica e em alguns casos a substituição das mangas. Com o intuito de reduzir o tempo de manutenção do filtro ou substituição das mangas foi proposta a utilização de um separador ciclônico como pré-tratamento para o filtro. Para isso fez-se necessário o estudo do escoamento chumbo/ar no interior do separador para viabilizar essa aplicação. Neste sentido foi realizada a análise do separador ciclônico empregando a fluidodinâmica computacional visando avaliar a influência de alguns aspectos geométricos do separador ciclônico sobre a eficiência de separação das partículas de chumbo do ar. Foi igualmente avaliado o efeito da concentração e diâmetro das partículas de chumbo. Foi utilizado o pacote computacional ANSYS CFX<sup>®</sup> 15 adotando-se a abordagem Euleriana-Euleriana, considerando o modelo de partículas. Foi utilizado o modelo de turbulência  $\kappa - \varepsilon$  padrão. Para o tratamento da fase dispersa (partículas de chumbo) foi adotada a teoria cinética dos escoamentos granulares. Os resultados das simulações indicaram que o modelo matemático utilizado foi capaz de prever os fenômenos físicos envolvidos no processo de separação usando o separador ciclônico. Observou-se que na maioria dos casos avaliados a eficiência de separação partículas de chumbo ficou acima dos 70%, o que indica que o equipamento em estudo apresentou um comportamento favorável a separação. Os resultados proporcionaram afirmar que o separador ciclônico se mostrou promissor como um pré-tratamento para o filtro de mangas nos casos avaliados.

**Palavras-chave:** separação gás/sólido, chumbo, separador ciclônico, fluidodinâmica computacional, teoria cinética dos escoamentos granulares.

Zimmermann, Marina da Silva. **Lead/air separation process using cyclonic separator: modeling and simulation.** Dissertation. Universidade Federal de Campina Grande. 2018.

## ABSTRACT

In the automotive batteries manufacturing process some lead particles can be released in the air causing risks to the environment, to the health of the workers and to the community around the factory. Generally, exhaust fans are usually used in the factory sheds that direct air to be treated by a bag filter. A periodic maintenance is required to these filters. To reduce the maintenance time of the filter or replacement of the bags it was proposed to use a cyclonic separator as a pretreatment for the filter. For this, it was necessary to study the lead / air flow inside the separator to evaluate the feasibility of this application. In this sense, the cyclonic separator was analyzed using computational fluid dynamics to evaluate the influence of some geometric aspects of the cyclonic separator on the separation efficiency of the lead particles of the air. The effect of the concentration and diameter of the lead particles was also evaluated. The ANSYS CFX<sup>®</sup> 15 software package was used, adopting the Eulerian-Eulerian approach, considering the particle model. The standard  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model was used. For the treatment of the dispersed phase (lead particles) the kinetic theory of granular flows was adopted. The results of the simulations indicated that the mathematical model used was able to predict the physical phenomena involved in the separation process using the cyclonic separator. It was observed that in most of the cases evaluated the separation efficiency lead particles remained above 70%, which indicates that the equipment under study showed a favorable separation behavior. The results showed that the cyclonic separator was promising as a pretreatment for the bag filter in these cases.

**Keywords:** gas/solid separation, lead, cyclonic separator, computational fluid dynamics, kinetic theory to granular flows.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Amostrador de grande volume - AGV-PTS: (a) Amostrador fechado durante a utilização e (b) representação do equipamento aberto. ....	29
Figura 2 – Funcionamento de um Filtro de Manga. ....	30
Figura 3 – Ciclone tradicional. ....	31
Figura 4 – Esquema do funcionamento de um ciclone.....	32
Figura 5 – Diagrama do tronco cônico. ....	33
Figura 6 - Representação esquemática do acoplamento entre fases e seus efeitos.....	35
Figura 7- Geometria de tronco cônico de 75 mm e saída comum. ....	39
Figura 8 – Geometria de um ciclone padrão.....	39
Figura 9 – Geometrias criadas a partir de pontos, curvas e superfícies.....	40
Figura 10 – Blocagem.....	41
Figura 11 – Malha com tronco cônico de 75 mm.....	41
Figura 12 – Linhas de fluxo de chumbo e de gás (a), apenas chumbo (b) e apenas gás (c). ....	53
Figura 13 - Posição em metros das linhas de perfil no separador ciclônico com alongamento interno de 50 mm e saída boca de sino. ....	54
Figura 14 - Geometrias de tronco cônico de (a) 50mm (b) 75mm e (c) 100 mm.....	54
Figura 15 – Saídas modificadas: (a) saída comum (b) saída comum com adição de tubo interno de 25 mm, (c) saída boca de sino com tubo interno de 25 mm, (d) saída losango com tubo interno de 25 mm. ....	55
Figura 16 - Ajuste de malha para a geometria 01: número de elementos versus eficiências.....	56
Figura 17 - Ajuste de malha para a geometria 01: número de elementos versus queda de pressão.....	57
Figura 18 – Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	57
Figura 19 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	58
Figura 20 - Ajuste de malha para a geometria 02: número de elementos versus eficiências.....	58
Figura 21 - Ajuste de malha para a geometria 02: número de elementos versus queda de pressão.....	59
Figura 22 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	59
Figura 23 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	60
Figura 24 - Ajuste de malha para a geometria 03: número de elementos versus eficiências.....	61
Figura 25 - Ajuste de malha para a geometria 03: número de elementos versus queda de pressão.....	61
Figura 26 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	62

Figura 27 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	62
Figura 28 - Ajuste de malha para a geometria 04: número de elementos versus eficiências.....	63
Figura 29 - Ajuste de malha para a geometria 04: número de elementos versus queda de pressão.....	63
Figura 30 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	64
Figura 31 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	64
Figura 32 - Ajuste de malha para geometria 05: número de elementos versus eficiências.....	65
Figura 33 - Ajuste de malha para geometria 05: número de elementos versus queda de pressão.....	65
Figura 34 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	66
Figura 35 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	66
Figura 36 - Ajuste de malha para geometria 06: número de elementos versus eficiências.....	67
Figura 37 - Ajuste de malha para a geometria 06: número de elementos versus queda de pressão.....	67
Figura 38 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	68
Figura 39 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	68
Figura 40 - Ajuste de malha para a geometria 07: número de elementos versus eficiências.....	69
Figura 41 - Ajuste de malha para a geometria 07: número de elementos versus queda de pressão.....	69
Figura 42 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	70
Figura 43 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.....	70
Figura 44 – Perfil de pressão absoluta utilizando o separador ciclônico aplicado ao caso 01.....	72
Figura 45 – Perfil de fração volumétrica (a) de gás e (b) das partículas de chumbo no separador ciclônico aplicado ao caso 01. ....	73
Figura 46 – Perfil de velocidade axial do gás no separador ciclônico aplicado ao caso 01.....	73
Figura 47 - Perfil de velocidade axial das partículas de chumbo no separador ciclônico aplicado ao caso 01. ....	74
Figura 48 – Perfil de velocidade tangencial do gás no separador ciclônico aplicado ao caso 01.....	74
Figura 49 - Perfil de velocidade tangencial do chumbo no separador ciclônico aplicado ao caso 01.....	75

Figura 50 – Perfil de pressão em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).....	77
Figura 51 – Perfil da fração volumétrica (a) do gás e (b) das partículas de chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).....	77
Figura 52 – Perfil de velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m). .....	78
Figura 53 - Perfil de velocidade axial do chumbo, em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m). .....	78
Figura 54 - Perfil de velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m). .....	79
Figura 55 - Perfil de velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial para avaliação das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03.....	79
Figura 56 - Perfil de pressão, em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).....	81
Figura 57 - Perfil da fração volumétrica do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m). .....	81
Figura 58 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m). .....	82
Figura 59 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m). .....	82
Figura 60 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m). .....	83
Figura 61 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m). .....	83
Figura 62 - Perfil de pressão em função da posição radial para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).....	85
Figura 63 - Perfil da fração volumétrica do gás (a) e partículas de chumbo (b) em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).....	86
Figura 64 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m). .....	86
Figura 65 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m). .....	87
Figura 66 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m). .....	87

Figura 67 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m). .....	88
Figura 68 – Campos de pressão nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm. ....	90
Figura 69 – Campos da fração volumétrica de gás nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm. ....	90
Figura 70 - Perfil da fração volumétrica (a) do gás e (b) das partículas de chumbo em função da posição radial (Y), em metros, para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m). ....	91
Figura 71 - Campos de velocidade axial do gás nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm. ....	91
Figura 72 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m)...	92
Figura 73 - Campos de velocidade axial do chumbo nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm. ....	92
Figura 74 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m)...	93
Figura 75 - Campos de velocidade tangencial do gás nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm. ....	93
Figura 76 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m)...	94
Figura 77 - Campos de velocidade tangencial do chumbo nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm. ....	94
Figura 78 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m). ....	95
Figura 79 – Campos de pressão nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.....	97
Figura 80 - Campos da fração volumétrica das partículas de chumbo nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno. ....	97
Figura 81 - Campos da velocidade axial do gás nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno. ....	98
Figura 82 - Campos da velocidade axial do chumbo nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno. ....	98
Figura 83 - Campos da velocidade tangencial do gás nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno. ....	99
Figura 84 - Campos da velocidade tangencial do chumbo nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno. ....	99
Figura 85 – Campos de Pressão das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão. ....	101

Figura 86 - Perfil de pressão em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m). .....	102
Figura 87 – Campo de pressão da malha de ciclone comum no plano ZY. ....	102
Figura 88 – Representação do campo de pressão nas ampliações na região próxima as entradas de alimentação do hidrociclone para diferentes vazões de alimentação (Barbosa, 2011). .....	103
Figura 89 - Campos da fração volumétrica do gás das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão. ....	104
Figura 90 - Perfil da fração volumétrica (a) do gás e (b) das partículas de chumbo em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m). ....	104
Figura 91 - Campos da velocidade axial do gás das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão. ....	105
Figura 92 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m). ....	105
Figura 93 - Campos da velocidade axial do chumbo das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão. ....	106
Figura 94 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m). ....	106
Figura 95 - Campos da velocidade tangencial do gás das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão. ....	107
Figura 96 – Representação da componente velocidade tangencial para o ciclone com uma entrada tangencial e sem <i>vortex finder</i> (Barbosa, 2011). ....	107
Figura 97 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m). ....	108
Figura 98 - Campos da velocidade tangencial do chumbo das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão. ....	108
Figura 99 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m). ....	109
Figura 100 – Eficiência de Chumbo e de Gás, em porcentagem, para cada caso avaliado. ....	111

## LISTA DE SIGLAS

UAEQ – Unidade Acadêmica de Engenharia Química;

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande;

Pb – Símbolo químico do chumbo;

NR – Norma Regulamentadora;

PbS – Chumbo no Sangue;

ZPP – Zinco protoporfirina (indicador de chumbo no sangue);

PTS – Partículas Totais em suspensão;

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

EPA - *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos);

AGV-PTS – Amostrador de Grande Volume para Partículas Totais em Suspensão;

EPC – Equipamento de Proteção Coletiva;

CFD – *Computational Fluid Dynamics* – Fluidodinâmica computacional;

MDF – Método das diferenças finitas;

MEF – Método dos elementos finitos;

MVF – Método dos volumes finitos.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros empregados nas simulações.....	51
Tabela 2 – Relação dos casos estudados. ....	52
Tabela 3 – Características das malhas numéricas da geometria 01.....	56
Tabela 4 - Características das malhas numéricas da geometria 02.....	58
Tabela 5 - Características das malhas numéricas da geometria 03.....	60
Tabela 6 - Características das malhas numéricas da geometria 04.....	63
Tabela 7 - Características das malhas numéricas da geometria 05.....	65
Tabela 8 - Características das malhas numéricas da geometria 06.....	67
Tabela 9 - Características das malhas numéricas da geometria 07.....	69
Tabela 10 – Identificação dos casos estudados com variação na velocidade de entrada. .....	76
Tabela 11 - Identificação dos casos estudados com variação na fração volumétrica.....	80
Tabela 12 – Eficiência de separação das partículas de chumbo e diâmetro médio das partículas. ....	84
Tabela 13 - Identificação dos casos estudados com variação na altura do tronco cônico. .....	88
Tabela 14 - Identificação dos casos estudados com variação nas saídas da geometria. .	95
Tabela 15 - Identificação dos casos estudados com variação na geometria: separador ciclônico versus ciclone comum com as mesmas dimensões. ....	100
Tabela 16 - Eficiência de Chumbo e de Gás, em porcentagem, para cada caso avaliado. .....	110

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$A_{\alpha\beta}$	Área superficial por unidade de volume	[m <sup>2</sup> ]
$C_{\alpha\beta}^{(d)}$	Coefficiente de arraste interfacial	[-]
$C_D$	Coefficiente de Arrasto	[-]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante empírica do modelo de turbulência	[-]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante empírica do modelo de turbulência	[-]
$C_\mu$	Constante de calibração experimental do mod. de turb.	[-]
$d_p$	Diâmetro da partícula	[m]
$d_c$	Diâmetro do cilindro	[m]
$e$	Coefficiente de restituição	[-]
$f$	Fração volumétrica	[-]
$g_0$	Função da distribuição radial	[-]
$\vec{g}$	Vetor aceleração da gravidade	[m. s <sup>-2</sup> ]
$l$	Comprimento	[m]
$m$	Massa	[kg]
$\vec{M}$	Força total por unidade de volume	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}$	Transferência de momento interfacial entre as fases $\alpha$ e $\beta$	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^D$	Forças de arraste interfacial	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^L$	Forças de sustentação	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB}$	Forças de lubrificação nas paredes	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^{VM}$	Forças de massa virtual	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^{TD}$	Forças de dispersão turbulenta	[N]
$\vec{M}_S$	Forças devido à pressão dos sólidos	[N]
$p_\alpha$	Pressão na fase alfa	[Pa]
$p_s$	Pressão na fase sólida	[Pa]
$p_{kb}$	Termo de produção de empuxo	[kg. m <sup>-1</sup> . s <sup>-3</sup> ]
$r$	Raio	[m]
$Re$	Número de Reynolds	[-]



$S$	Tensor médio da taxa de deformação	[-]
$s$	Distância entre as partículas	[-]
$\overline{S}_M$	Termo das forças externas que atuam sobre o sistema	$[N \cdot m^{-3}]$
$t$	Tempo	[s]
$u$	Velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
$u_i$	Velocidade Inicial	$[m \cdot s^{-1}]$
$\vec{U}$	Vetor velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
$V$	Volume	$[m^3]$
$\dot{w}$	Fluxo mássico	$[kg \cdot s^{-1}]$

### Letras Gregas

$\delta$	Função delta de Kronecker	[-]
$\kappa$	Energia Cinética Turbulenta	$m^2 \cdot s^{-2}$
$\mu_t$	Viscosidade Turbulenta	[Pa.s]
$\mu_{ef}$	Viscosidade Efetiva	[Pa.s]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
$\mu_s$	Viscosidade de cisalhamento da fase sólida	[Pa.s]
$\mu_{s,col}$	Viscosidade de cisalhamento devido ao efeito de colisão	[Pa.s]
$\mu_{s,kin}$	Viscosidade de cisalhamento devido ao efeito cinético	[Pa.s]
$\mu_{s,fr}$	Viscosidade de cisalhamento devido ao efeito de fricção	[Pa.s]
$\sigma_\rho$	Número de Prandtl turbulento	[-]
$\sigma_k$	Constante empírica do modelo de turbulência	[-]
$\sigma_\varepsilon$	Constante empírica do modelo de turbulência	[-]
$\varepsilon$	Dissipação Turbilhonar	$[m^2 \cdot s^{-3}]$
$\theta_s$	Temperatura granular	[-]
$\rho$	Massa Específica	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\pi$	Constante numérica Pi	[-]
$\tau_\alpha$	Tensões Viscosas, turbulentas e tensão da fase sólida	[-]
$\tau_s$	Tensor de pressão dos sólidos	[-]
$\xi_s$	Viscosidade do meio sólido ( <i>bulk</i> )	[Pa.s]

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1 Objetivos .....	21
1.1.1 Geral .....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
2.1 Chumbo .....	22
2.1.1 Histórico .....	22
2.1.2 Utilização Industrial e Contaminação Ambiental .....	23
2.1.3 Toxicologia .....	24
2.1.4 Legislação e Monitoramento do Chumbo no Ar .....	26
2.1.5 Amostrador de Grande Volume (AGV-PTS) .....	28
2.1.6 Filtro de Mangas .....	29
2.2 Ciclones .....	31
2.2.1 Separador Ciclônico .....	32
2.3 Escoamento Multifásico .....	35
2.3.1 Modelagem do Escoamento Multifásico .....	36
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	38
3.1 Descrição do Problema .....	38
3.2 Geração do Domínio Computacional .....	38
3.2.1 Geometrias .....	38
3.1.1 Malhas .....	40
3.3 Modelagem Matemática .....	42
3.3.1 Modelo de Turbulência para a Fase Contínua .....	43
3.3.2 Equações Constitutivas – Transferência de Momento .....	44
3.3.3 Teoria Cinética dos Escoamentos Granulares .....	46
3.3.4 Condições de Contorno .....	50
3.3.5 Casos Estudados .....	52
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
4.1 Avaliação das Malhas .....	54
4.2 Análise do escoamento gás/chumbo no caso 01 .....	71
4.3 Variação da velocidade de entrada .....	75
4.4 Variação da fração volumétrica .....	80
4.5 Variação do diâmetro médio das partículas de chumbo .....	84
4.6 Comparação entre as geometrias de diferentes troncos cônicos .....	88

4.7 Comparação entre as geometrias de diferentes saídas .....	95
4.8 Comparação com o ciclone padrão .....	100
4.9 Eficiências de separação .....	109
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>112</b>
<b>6. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>114</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>122</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em um processo fabril, por exemplo a indústria de baterias chumbo-ácido, é comum o desprendimento de partículas que podem ficar suspensas no ar e, dependendo do material e do tamanho de partícula, pode ser bastante prejudicial à saúde dos trabalhadores e ao ambiente ao redor da fábrica. Durante a fabricação de baterias, o chumbo (Pb) passa por diversos processos e pode facilmente se desprender das linhas de produção e ficar suspenso no ar. Daí a grande preocupação em relação ao ambiente fabril na captação e tratamento do ar.

O chumbo, por ser um metal pesado, pode trazer diversos malefícios a saúde humana e poluição ambiental. Devido a isso, diversas legislações ditam os limites de tolerância deste metal e as empresas precisam se adequar a essas restrições para poderem continuar suas produções. O meio mais comum do tratamento do ar é a utilização do filtro de mangas que retêm o particulado e libera o ar filtrado. Este dispositivo tem alta eficiência de filtração ou retenção de partículas muito pequenas (na ordem de micrometros). No entanto, seu alto custo de manutenção (principalmente a trocas de mangas) causa grande impacto econômico na indústria.

Visando contribuir na redução desse impacto econômico, o presente trabalho propôs a adição de um separador ciclônico como um pré-tratamento, com o objetivo de aumentar a vida útil das mangas e, com isso, reduzir os custos de manutenção do filtro de mangas.

A separação das fases no separador ciclônico é influenciada por diversos fatores, como por exemplo, as condições geométricas e operacionais do equipamento, as propriedades físicas das fases em escoamento e o padrão do escoamento. Entretanto, modelar e prever a distribuição de fases que ocorre no escoamento real no separador ciclônico é uma tarefa complexa. O escoamento das fases no interior do equipamento foi modelado empregando a fluidodinâmica computacional, mais especificamente usando o *Ansys CFX*. É nesse contexto, que o presente trabalho, se propõe dar sua contribuição à indústria de baterias, mais especificamente no processo de separação multifásica chumbo/ar.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Avaliar a eficiência de um separador ciclônico no processo de separação chumbo/ar atmosférico.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir um modelo matemático para prever a separação chumbo/ar usando o separador ciclônico;
- Avaliar a influência dos aspectos geométricos: dimensões do tronco cônico e dutos de saída inferior;
- Avaliar a influência do diâmetro da partícula, da fração volumétrica e velocidade de entrada;
- Comparar os resultados do processo de separação usando o separador ciclônico com os de um ciclone padrão com as mesmas dimensões.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Chumbo

O chumbo é um metal branco azulado e lustroso nas condições normais de pressão e temperatura (Atkins e Jones, 2012). Considerado um metal pesado, esse elemento que pertence à família do carbono (Grupo 14) tem o símbolo Pb, tem número atômico 82, possui massa molar de  $207,2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  e densidade de  $11,34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

De acordo com Evangelista e Silva (2013) o chumbo pode ser obtido de forma natural sendo mais comum associado a outros minerais. O minério de chumbo mais utilizado como matéria prima é a galena (sulfeto de chumbo).

Segundo Lima e Merçon (2011) o conceito de metal pesado segue diversas definições, sendo as principais a massa específica, a massa atômica e o número atômico. Os metais pesados apresentam a massa específica elevada, sendo maior ou igual a um determinado valor de referência entre 3,5 e  $7,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . De acordo com as outras definições, eles apresentam massa atômica e/ou número atômico elevados, sendo maiores que determinado valor padrão. A massa atômica tem o valor de referência igual a 23 (massa atômica do sódio) e para o número atômico, o cálcio (número atômico 20) é usado como referência.

#### 2.1.1 Histórico

Existem evidências, segundo Sadao (2002), que o chumbo já era utilizado em 4000 a.C., porém foi Hipócrates (600 a.C.) o primeiro a ligar os sintomas de intoxicação com o fator causal.

Landsdown e Yule (*apud* Evangelista e Silva 2013) citam o uso do chumbo como pintura para os olhos no antigo Egito e como maquiagem para a clarear a pele na Grécia e China. É citado também por Fitch (*apud* Evangelista e Silva 2013) que existem fortes suspeitas de envenenamento por chumbo como causa da morte de alguns pintores famosos, como o brasileiro Portinari, devido ao uso desse metal na produção dos pigmentos.

Existem estudos que sugerem que o chumbo era utilizado na fabricação do material bélico do império romano (Albert *et al.*, *apud* Silva 2001) e isso pode ter provocado intoxicações em determinadas classes populacionais da época. Nesse mesmo período, o chumbo foi muito utilizado nas tubulações de abastecimento de água das cidades do império romano, bem como na construção de edifícios, utensílios domésticos e em projetos artísticos (TPL, *apud* Silva 2001).

A primeira descrição moderna do saturnismo (intoxicação por chumbo) foi realizada por Tanquereel em 1839. Seu estudo foi tão complexo que, desde então, pouco foi acrescentado ao seu caso clínico (Sadao, 2002).

A poluição do ar (em relação à concentração atmosférica de chumbo) durante boa parte do século 20 deveu-se à adição do composto organo-metálico chumbo tetraetila à gasolina (De Capitani *et al.*, 2009). O grande aumento na quantidade de chumbo na atmosfera a partir de 1940 deve-se a expansão da frota de veículos que utilizava gasolina contendo o chumbo tetraetila (Gerlach *et al.*, 2009). No entanto, no Brasil, com o início do programa PróÁlcool nos anos 70, houve uma gradativa substituição do chumbo tetraetila por etanol anidro (Evangelista e Silva, 2013).

### 2.1.2 Utilização Industrial e Contaminação Ambiental

O chumbo apresenta características interessantes para o uso industrial como a durabilidade e maleabilidade. Outra propriedade importante é sua alta densidade que o torna útil como bloqueador de radiação (Atkins e Jones, 2012). Devido à sua resistência à corrosão é empregado na constituição de cabos, tubulação em indústrias, transporte de reagentes oxidantes, indústria metalúrgica, entre outros (De Capitani, 2009; Mardones *apud* Evangelista e Silva 2013). De acordo com Medina e Gomes *apud* Forbes (2008), mais de 70% da produção mundial do chumbo é consumida na produção de baterias.

Devido à sua abundância na crosta terrestre, o chumbo está amplamente distribuído no ambiente, e suas fontes naturais incluem as emissões vulcânicas,

o intemperismo geoquímico e as emissões provenientes do mar (Quiterio *et al.*, 2001). Porém as fontes antrópicas são a maior contribuição na entrada de chumbo no meio ambiente (Evangelista e Silva, 2013).

Segundo Pantaroto e Figueiredo (2007), o Brasil é um pequeno produtor de chumbo, com cerca de 0,2% do que se consome mundialmente. As maiores jazidas do país se encontram em Minas Gerais. No Brasil, a maior parte do chumbo utilizado é fruto de importações (Pontes, 2009). Além disso, as sucatas de bateria são um grande ponto estratégico para a reutilização desse material.

Durante o processo de fabricação dessas baterias há um desprendimento de grandes quantidades de poeira (particulado) que é constituída principalmente de chumbo sob a forma metálica e de óxidos. Não são apenas os trabalhadores dessas empresas que estão expostos a essas partículas, uma vez que o particulado se espalha pelo ar e pode viajar grandes distâncias.

As partículas de chumbo podem se depositar no solo e então serem absorvidas por plantas ou atingir águas superficiais e ser levado por grandes distâncias contaminando pessoas, animais e plantas.

Um estudo desenvolvido por Gonzaga *et al.* (2015) mostra a avaliação dos impactos ambientais causados por fábricas de baterias automotivas e elabora planos de controle e ações mitigadoras para melhoria dos processos. Além da poluição ambiental por via atmosférica, são citados perigos de poluição do solo e da água devido ao descarte incorreto de resíduos sólidos e líquidos.

### 2.1.3 Toxicologia

O chumbo foi largamente utilizado no passado devido ao seu fácil processamento e à alta resistência a corrosão, porém quando descobertos os malefícios que traziam a saúde humana, foi rapidamente dispensado de diversas atividades. A exposição ao chumbo pode causar disfunções no sistema nervoso, problemas ósseos, entre outros. Esse metal não existe naturalmente no corpo humano, tampouco desempenha funções nutricionais ou bioquímicas, bem pelo



contrário, a presença desse metal pode prejudicar a absorção de nutrientes (Pontes, 2009).

De acordo com Sadao (2002) os compostos de chumbo podem ser absorvidos por via respiratória ou oral. Apenas os compostos metal-orgânicos podem ser absorvidos por via cutânea. E segundo Schifer et al. (2005), a absorção do chumbo pelo organismo não depende unicamente da concentração e do tempo de exposição, mas também depende de fatores como tamanho da partícula, idade do indivíduo, constituição genética, entre outros.

Após a absorção, o chumbo é distribuído pelo sangue e, com o tempo, é depositado nos ossos, cabelos e dentes (Sadao, 2002).

A exposição aguda ao chumbo pode causar efeitos fisiológicos sérios, como morte ou dano permanente à função cerebral e outros órgãos (Carvalho *et al.*, 2003).

Moreira e Moreira (2004) afirmam que o chumbo, como os outros metais pesados, pode danificar toda e qualquer atividade biológica e isso explicaria porque há tantos tipos de respostas biológicas a esses metais. Vários efeitos no organismo são discutidos em sua pesquisa, dentre eles: Efeitos gastrointestinais, efeitos hepáticos, efeitos neurológicos, efeitos hematológicos (anemia), efeitos renais, efeitos sobre o crescimento de crianças, efeito de reprodução e desenvolvimento do feto, efeitos cancerígenos, efeitos cardiovasculares e efeitos endocrinológicos.

As crianças são mais suscetíveis aos efeitos do chumbo. De acordo com Sadao (2002) o chumbo presente no sangue pode passar livremente pela barreira placentária, igualando os níveis de chumbo no sangue da mãe e do bebê. Outro fator importante é que o chumbo também pode estar presente no leite materno. Isso também é mostrado e discutido por Saiani (2012) que estudou a presença de chumbo nos dentes de crianças com problemas neurológicos.

Carvalho *et al.* (2003) fizeram um estudo com crianças que moravam a menos de 1 km de uma fundição de chumbo desativada em 1993 na cidade de Santo Amaro da Purificação - BA. Em 1998 encontraram uma média de chumbo no sangue de  $17,1 \pm 7,3 \mu\text{g}/\text{dL}$  (considera-se como intoxicação relevante de

chumbo uma concentração superior a  $9 \mu\text{g}/\text{dL}$ ). Todas as crianças examinadas nasceram após o fechamento da fábrica.

Funayama (2009) analisou pesquisas que falavam a respeito dos efeitos do chumbo sobre o cérebro em desenvolvimento. Foram destacados prejuízos motores, sensoriais, adaptativos, cognitivos e comportamentais (relacionados ao aumento da criminalidade anos depois).

As sequelas da exposição a baixas doses nos primeiros anos de vida podem ser permanentes e lesam não apenas o indivíduo exposto e sua família, mas toda a sociedade (Gerlach *et al.*, 2009).

#### 2.1.4 Legislação e Monitoramento do Chumbo no Ar

A legislação de chumbo no ar pode ser dividida em ambiental e ocupacional. A legislação ocupacional é remetida ao ambiente de trabalho, já a ambiental aos arredores da fábrica ou ambientes não fabris.

Na Norma Regulamentadora (NR) 15 instituída pelo Ministério do Trabalho estão estabelecidos os limites de tolerância para o chumbo por  $\text{m}^3$  de ar. Em uma jornada de trabalho de até 48 horas semanais o limite de tolerância é de  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  (Szabó Júnior, 2016).

Na Norma Regulamentadora (NR) 07 instituída pelo Ministério do Trabalho estão estabelecidos os limites de chumbo no organismo de trabalhadores expostos. Para o chumbo os materiais biológicos que podem ser testados são sangue e urina. Para o sangue pode-se analisar o chumbo (PbS) e zinco protoporfirina (ZPP). O valor de referência para o chumbo é de até  $40 \mu\text{g}/100\text{ml}$  e o índice biológico máximo para o chumbo é de  $60 \mu\text{g}/100\text{ml}$ . O método analítico é o da espectrofotometria de absorção atômica. Já para o ZPP o valor de referência é de até  $40 \mu\text{g}/100\text{ml}$  e o índice biológico máximo é de  $100 \mu\text{g}/100\text{ml}$ . O método analítico é o do Hematofluorômetro. Para a urina pode-se analisar o ácido delta aminolevulínico com valor de referência de até  $4,5 \text{ mg}/\text{g}$  creatinina e o índice biológico máximo é de  $10\text{mg}/\text{g}$  creatinina. O método analítico é o da espectrofotometria Ultravioleta/visível (Szabó Júnior, 2016).

Na presença de intoxicação pelo chumbo, há a inibição da enzima ferroquelatase, fazendo com que no lugar do ferro junte-se o zinco à protoporfirina, formando a Zinco Protoporfirina. Logo ZPP elevado é um grande indicativo de intoxicação por chumbo (NAS, *apud* Carvalho *et al.*, 1996).

Na NR 07 ainda é previsto que os exames para os trabalhadores expostos ao chumbo devem ter uma periodicidade no mínimo semestral (Szabó Júnior, 2016).

A Resolução CONAMA nº 3 de 1990 define os parâmetros nacionais de qualidade do ar no Brasil. Nesse documento são definidos padrões para as Partículas Totais em Suspensão (onde se encontram as partículas de chumbo), Fumaça, Partículas Inaláveis, Dióxido de Enxofre, Monóxido de Carbono, Ozônio. E para as Partículas Totais em Suspensão (PTS) fica definido o método de amostragem como sendo o amostrador de grandes volumes.

A Resolução CONAMA nº 382 de 2007 traz os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. A Resolução CONAMA nº 436 de 2011, que complementa a anterior, traz os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Fonte fixa é definida como qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria para a atmosfera, por emissão pontual ou fugitiva. É definido no Anexo VIII da Resolução CONAMA nº 436 de 2011 que deve haver um monitoramento periódico na qualidade do ar no entorno da empresa e a contribuição das fontes de poluição não deve ultrapassar  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (média aritmética trimestral). Já no CONAMA nº 382 de 2007 (para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação posteriores a 02 de janeiro de 2007), define-se que deve ser realizado um estudo de dispersão de poluentes para o chumbo, utilizando modelos de dispersão aceitos pelo órgão ambiental licenciador e que a contribuição das fontes de poluição do empreendimento não deverá ultrapassar 50% do padrão de qualidade do ar. Além disso, em ambas as Resoluções são definidos limites de emissão para cada tipo de processo relacionado ao chumbo.

A Norma ABNT NBR 9547 de 1997 – Material particulado em suspensão no ar ambiente – Determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume – especifica o método para determinação de concentração de partículas totais em suspensão utilizando o amostrador de grande volume (AGV-PTS).

A EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) define o limite para o chumbo ambiental nos Estados Unidos como  $0,15\mu\text{g}/\text{m}^3$  (United States Environmental Protection Agency, 2016).

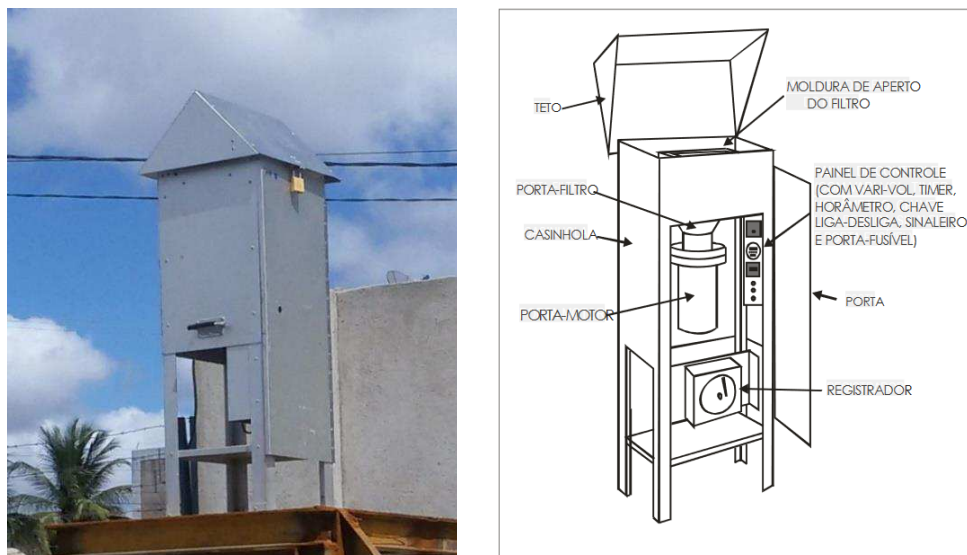
#### 2.1.5 Amostrador de Grande Volume (AGV-PTS)

O amostrador de grande volume (Figura 1) é um equipamento de amostragem de particulados totais em suspensão no ar ambiente. Esses equipamentos devem ficar situados ao redor da fábrica para analisar o particulado que está saindo do ambiente fabril em direção à comunidade e/ou à natureza.

Dentro do amostrador (Figura 1(b)) é colocado um filtro retangular de dimensão 203 mm x 254 mm (Dias, 2016) onde as partículas são filtradas durante a passagem de ar. No decorrer da amostragem é registrado em uma carta gráfica a vazão a cada hora, sendo possível calcular o volume de ar que passou pelo equipamento. A amostragem padrão tem duração de 24 horas e indica-se que sejam feitas medições todas as semanas, mas em dias diferentes para explorar todas as atividades semanais da fábrica.

A determinação de particulado no filtro é feita por meio de pesagem, mas uma análise mais complexa pode mostrar a concentração de certos componentes no filtro. Em laboratório é possível analisar a concentração de chumbo que está saindo do ambiente fabril e contaminando a comunidade.

Figura 1 - Amostrador de grande volume - AGV-PTS: (a) Amostrador fechado durante a utilização e (b) representação do equipamento aberto.



(a)

(b)

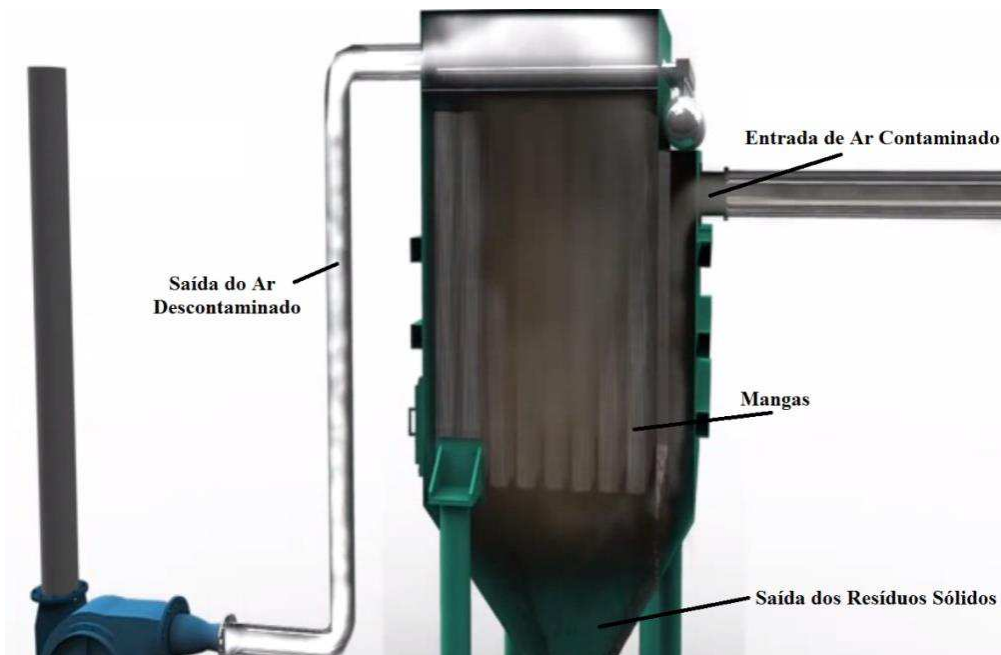
Fonte: (a) Própria e (b) Manual AGV-PTS Energética® (Dias, 2016).

### 2.1.6 Filtro de Mangas

Para reduzir a quantidade de particulado de chumbo dentro dos ambientes fabris podem ser utilizados, como equipamentos de proteção coletiva (EPC), exaustores que puxam o ar de dentro da fábrica. Para evitar lançar partículas que contaminem o ambiente exterior à fábrica devem ser utilizados equipamentos que purifiquem o ar, ou seja, façam a separação do chumbo e do ar como, por exemplo, o filtro de mangas.

O funcionamento de um filtro de mangas (Figura 2) é bastante simples, o ar entra no equipamento contaminado com partículas de chumbo e é aspirado em direção as mangas. O ar atravessa e as partículas são retidas na superfície das mangas e nos poros das fibras, formando a torta de filtração. Depois de certo tempo (quando se atinge a queda de pressão máxima) a torta deve ser removida (Rocha, 2010).

Figura 2 – Funcionamento de um Filtro de Manga.



Fonte: Dust Collection Systems Pulse Jet Dust Collection Systems - Manufacturer Índia (2013).

Ainda de acordo com Rocha (2010), na primeira utilização da manga ocorre a filtração de profundidade e com o passar do tempo a penetração é reduzida. Quanto mais rápido essa fase passar, melhor é para a filtração. Com a continuidade da filtração, faz-se necessária a limpeza (os meios mais utilizados são por vibração das mangas, inversão do fluxo de ar ou a combinação desses dois métodos). Cada ciclo tem seu tempo reduzido em comparação com o anterior. Isso ocorre porque em um caso real, a limpeza não é eficiente o suficiente para voltar ao aspecto de uma manga virgem.

O filtro de mangas tem um custo de manutenção elevado, pois periodicamente, todas as mangas devem ser retiradas e substituídas por novas. O procedimento é geralmente complicado porque, na maioria das vezes, é necessário que seja feito em um momento de parada da fábrica, além do valor elevado das mangas.

## 2.2 Ciclones

Ciclones têm sido usados na indústria para separação sólido/gás desde o final do século 19 (Carvalho, 2008). Isso se deve ao baixo custo de construção e manutenção desse equipamento, além de não ter peças móveis. Além disso, tem alta eficiência em separação de partículas e podem trabalhar em altas pressões e temperaturas.

Ciclones são equipamentos que têm como princípio básico de separação a sedimentação centrífuga, ou seja, as partículas suspensas são submetidas à aceleração centrífuga que as fazem separar-se do fluido.

A mistura é injetada no ciclone através de um duto de entrada tangencial ao corpo cilíndrico-cônica (Figura 3). A fase mais pesada fica mais próxima à parede e é conduzida em direção a saída inferior (*underflow*) enquanto a mais leve se movimenta helicoidalmente na região central do ciclone, fazendo com que se desprenda da fase mais pesada e siga em direção a saída superior do ciclone (*overflow*), conforme ilustra o esquema da Figura 4.

Os ciclones são amplamente utilizados no controle da poluição do ar e recuperação de produtos ou reagentes com alto valor agregado (Cerri, 2010).

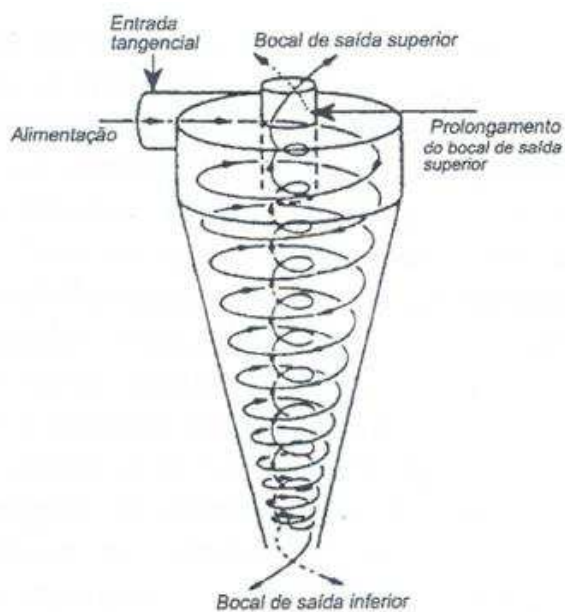
De acordo com Carvalho (2008), os ciclones podem ser classificados em dois grandes grupos: separadores e classificadores. No primeiro grupo o objetivo é separar fases (recuperação da fase mais pesada). E no segundo, geralmente o objetivo é separar a fase dispersa em duas classes: recuperar partículas grandes e partículas pequenas serem arrastadas.

Figura 3 – Ciclone tradicional.



Fonte: Maldaner, 2012.

Figura 4 – Esquema do funcionamento de um ciclone.



Fonte: Marins, 2007.

A diferença entre o ciclone e hidrociclone é que o primeiro é utilizado para promover a separação de partículas em uma corrente gás-sólido e no segundo uma das fases é um líquido (Modificado de Cerri, 2010).

### 2.2.1 Separador Ciclônico

Luna e Farias Neto (2011) apresentaram uma variação do hidrociclone ao estudar escoamento axial e turbilhonar em um dispositivo formado por um tubo cilíndrico munido de uma entrada e duas saídas, sendo uma tangencial e outra axial no lado oposto, denominado de separador ciclônico. Luna e Farias Neto (2011) avaliaram numericamente este dispositivo para o processo de separação água/óleo para o tratamento de águas produzidas. Eles variaram a concentração de óleo de alimentação e verificaram um comportamento assimétrico do escoamento e que a eficiência de separação reduzia em consequência de uma zona de mistura observada nas proximidades da seção de alimentação.

Farias Neto *et al.* (2011) avaliaram a variação da concentração de areia na corrente de alimentação e a variação do diâmetro da saída superior (overflow)



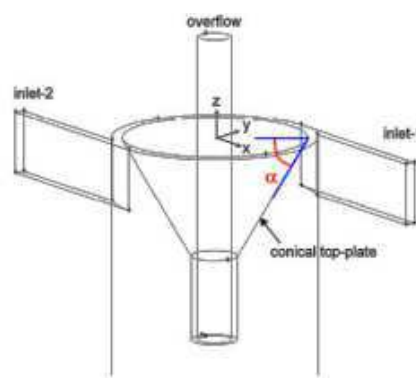
do hidrociclone. Foi proposto um caminho para mostrar a dependência da concentração de sólidos na corrente de alimentação e a forte dependência da efetividade em relação ao diâmetro de saída superior.

Souza *et al.* (2010) avaliaram a eficiência de separação água/óleo com a variação da temperatura. Nas condições utilizadas, pode-se observar a dependência em relação à temperatura e a intensidade turbilhonar aumentou com o aumento da temperatura.

Hwang *et al.* (2012) modificaram a estrutura do hidrociclone para ver quais são os efeitos sobre a eficiência de separação das partículas. Os resultados mostram que o aumento do número de entradas e um estreitamento da largura da entrada são meios eficazes para melhorar a eficiência da separação das partículas, devido ao aumento de velocidade do fluido nas partes cilíndricas do hidrociclone. A parte superior em forma de cone-placa reduz a área de circulação de partículas finas, melhorando significativamente a eficiência da separação das mesmas. No entanto, o aumento do ângulo de cone tem um efeito contrário, devido à diminuição do tempo de residência das partículas.

Shigemori *et al.* (2012) alteraram a parte superior do hidrociclone colocando um tronco cônico como mostrado na Figura 5. Isso foi proposto no intuito de reduzir as regiões de baixa velocidade próximas a entrada, pois diminuindo a área da seção transversal da entrada, aumentaria o fluxo de circulação e, com isso, aumentar a velocidade tangencial e efeito centrífugo próximo da parede do hidrociclone. O ângulo ótimo encontrado foi de 30° para as condições utilizadas.

Figura 5 – Diagrama do tronco cônico.



Fonte: Shigemori *et al.* (2012).

Zimmermann (2014) avaliou numericamente a influência das dimensões tronco cônico posicionado perpendicularmente as entradas tangenciais do separador ciclônico no processo de separação gás/óleo. Foram estudados troncos cônicos de 50, 75 e 100 mm, onde o tronco de 75 mm apresentou os melhores resultados, com 99,63% em relação à pureza do óleo.

Zimmermann (2015) analisou a influência da geometria da saída na separação gás/óleo. As alterações na geometria de saída constituem-se em uma adição de um cilindro interno de 25 ou 50 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro para coletar o gás em uma posição superior à do óleo, com o objetivo de não perder o núcleo de gás formado no centro do hidrociclone. Além disso, foram testadas saídas de gás com geometrias diferentes, como a boca de sino e a losango. Foi concluído que o alongamento interno de 25 mm proporcionou a formação do núcleo de gás em quase todo o separador ciclônico, enquanto que no de 50 mm observou-se um processo mais lento para a formação do núcleo de gás ao longo do equipamento. Já as modificações da saída do gás não trouxeram melhoras para as eficiências, porém foi possível observar que o separador ciclônico com alongamento interno de 50 mm e saída de boca de sino alcançou as velocidades mais altas.

Wei *et al.* (2016) estudou o comportamento do escoamento gás-sólido, como o fluxo de gás se altera com a adição das partículas e as velocidades relativas entre as fases. Quando uma tubulação é conectada ao ciclone, geralmente se utiliza uma tubulação menor que a entrada do ciclone e isso acarreta na redução da velocidade do gás em relação as partículas. Isso causa ruptura das partículas e desgaste das paredes dos ciclones, reduzindo sua vida útil e podendo causar uma redução na eficiência de separação devido à redução do diâmetro das partículas. São sugeridas algumas mudanças como a área de seção transversal do duto ser ajustável na entrada do ciclone ou estender o comprimento da junta de mudança do diâmetro para que as partículas tenham mais tempo para reduzir a velocidade antes de entrar no ciclone.

Juengcharoensukying *et al.* (2017) fez testes em quatro novas geometrias de separadores em busca de uma melhora na eficiência de separação gás-sólidos (escoamento proveniente de queima de biomassa para geração de energia). As modificações ocorreram no ângulo de entrada do ciclone e no diâmetro do tubo

de saída superior (*vortex finder*). O separador que obteve a melhor eficiência de separação foi a geometria com redução de 30% (em relação a geometria original) do diâmetro do tubo de saída superior, porém nesse mesmo separador também foi encontrada a maior queda de pressão.

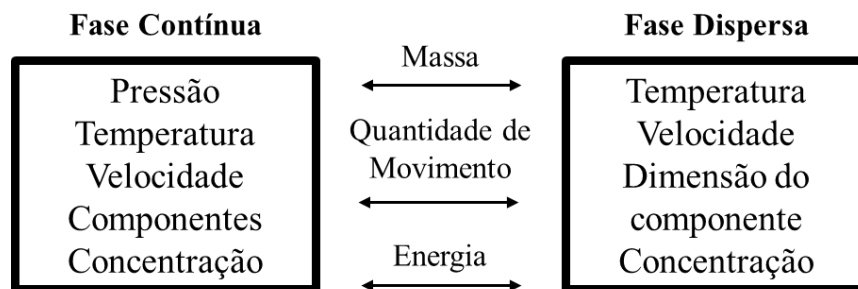
Balestrin *et al.* (2017) investigou os efeitos de uma redução na seção transversal do duto de saída superior juntamente com a extensão do corpo cilíndrico de um ciclone em um escoamento gás/sólido. Foi observada uma melhora na eficiência de separação de pequenas partículas com a redução na seção transversal do duto de saída superior.

### 2.3 Escoamento Multifásico

O escoamento multifásico se apresenta quando há mais de uma fase escoando. Por exemplo, tem-se escoando ar com partículas de chumbo, então apresenta-se aí a mistura de gases com partículas sólidas (mistura bifásica). Outro exemplo de mistura bifásica pode ser observado quando se tem água escoando com bolhas de gás, neste caso tem-se uma fase gasosa e uma fase líquida. Nos setores de petróleo é comum ter escoamento de óleo, água, gás natural e areia nos dutos (mistura multifásica).

A dificuldade em prever o escoamento multifásico não é somente em resolver o extenso número de equações e incógnitas, mas sim no acoplamento dessas fases. Na Figura 6 mostra-se a representação do acoplamento entre essas fases e os efeitos.

Figura 6 - Representação esquemática do acoplamento entre fases e seus efeitos.



Fonte: Modificado de Rosa, (2012).

De acordo com Rosa (2012), para um modelo ser capaz de capturar o comportamento físico dos termos interfaciais, é necessário saber como é a distribuição das fases espacialmente no escoamento, a dimensão característica e sua densidade de área interfacial.

### 2.3.1 Modelagem do Escoamento Multifásico

De acordo com Santos (2009), uma das classificações mais utilizadas para modelos multifásicos divide-os em duas grandes abordagens: Euleriana-Euleriana e Euleriana-Lagrangeana.

#### I. Abordagem Euleriana-Lagrangeana

Essa abordagem é utilizada em sistemas que a fase dispersa ocupa uma pequena fração volumétrica do sistema. Neste modelo a fase líquida, por exemplo, é tratada como contínua, sendo representada pela equação de movimento. A fase dispersa é considerada como um grande número de partículas (sólidas, líquidas, gasosas ou ainda combinação delas) e são tratadas pela mecânica clássica do corpo sólido. É considerado que a fase dispersa pode trocar massa, energia e quantidade de movimento com a fase contínua.

De acordo com Rosa (2012), a fase contínua é tratada a partir de um referencial Euleriano, como um escoamento monofásico. A interação partícula/fluido é representada como se fossem forças pontuais e o tratamento é Lagrangeano. O método identifica cada partícula individualmente.

Uma grande dificuldade pode ser apontada nessa abordagem no caso de um grande número de partículas serem necessárias, trazendo um alto custo computacional ou até mesmo impossibilitando a resolução (Portela, *apud* Santos, 2008). Isso porque seriam necessárias tantas equações quanto o número de partículas presentes no domínio.

## II. Abordagem Euleriana-Euleriana

Nesta abordagem é considerado que as diferentes fases do sistema são contínuas e interpenetrantes. É formado então um conjunto de equações para cada fase.

Essa abordagem considera a fase gasosa e a fase sólida como fases diferentes, mas que interagem entre si. Cerri (2010) define que em um modelo multifásico gás-sólido existe a presença de um fluido real e um hipotético que admitem transferências entre eles. A fase gás é definida como fluido real e a fase sólida como fluido hipotético, por exemplo.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem e no Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos das Unidades Acadêmicas de Engenharia Química e Mecânica, respectivamente, os quais dispõem de toda infraestrutura necessária para a execução deste trabalho.

#### 3.1 Descrição do Problema

Em busca de uma solução para o alto custo de manutenção dos filtros de mangas foi proposta a adição de um separador ciclônico para se obter uma pré-separação das partículas com o objetivo de aumentar a vida útil das mangas e, com isso, reduzir os custos de manutenção. Para avaliar esta proposta, foi necessário o estudo do escoamento chumbo/ar dentro do separador ciclônico.

#### 3.2 Geração do Domínio Computacional

##### 3.2.1 Geometrias

O domínio de estudo referente ao separador ciclônico corresponde ao utilizado por Zimmermann (2014), modificado de Luna (2014), ilustrado na Figura 7. O diâmetro da parte cônica (D1) é de 70 mm, da parte cilíndrica (D2) é de 18 mm, da saída (D3) é de 10 mm e do cone interno da parte superior (D4) é 19 mm. O comprimento da região cilíndrica (L2) é de 750 mm e da saída (L3) é de 50 mm. As entradas tangenciais têm 50 mm de largura (L6), 50 mm de comprimento (L4) e 50 mm de altura (L1). A largura (L5) é de 5 mm.

Com a finalidade de se comparar o separador ciclônico (desenvolvido pelo grupo de pesquisa) foi criada a geometria de um ciclone padrão (Figura 8) com as mesmas dimensões do separador ciclônico, porém apenas uma entrada tangencial, saída superior (*overflow*) e saída inferior (*underflow*).

Figura 7- Geometria de tronco cônico de 75 mm e saída comum.

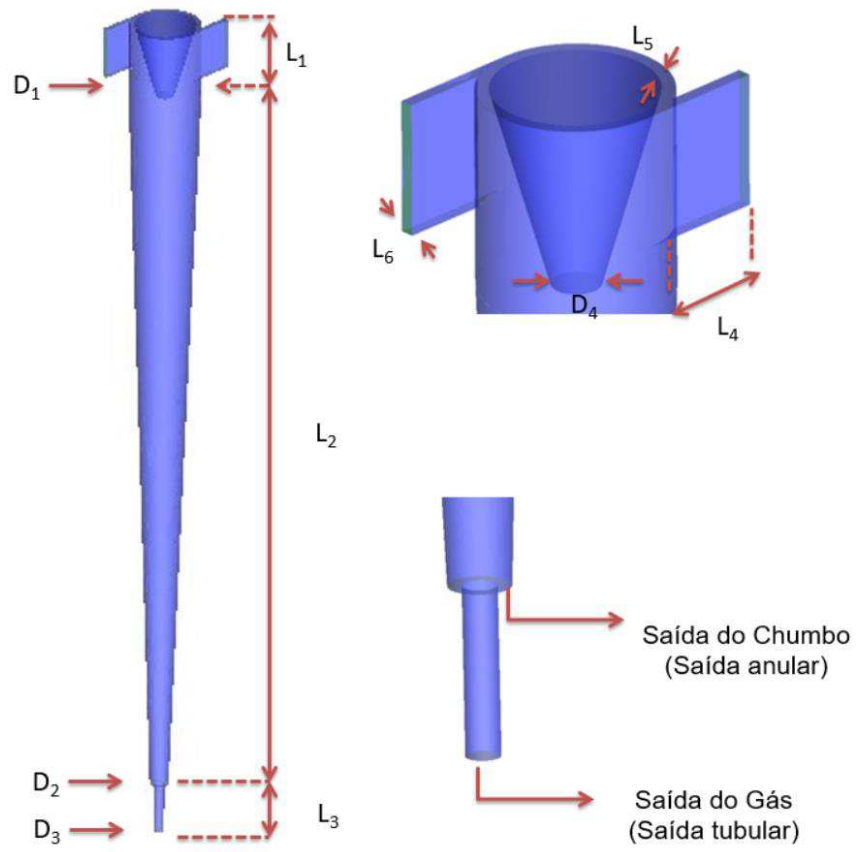
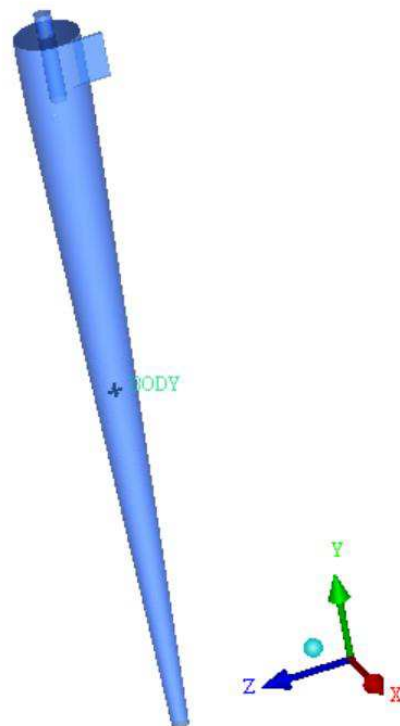
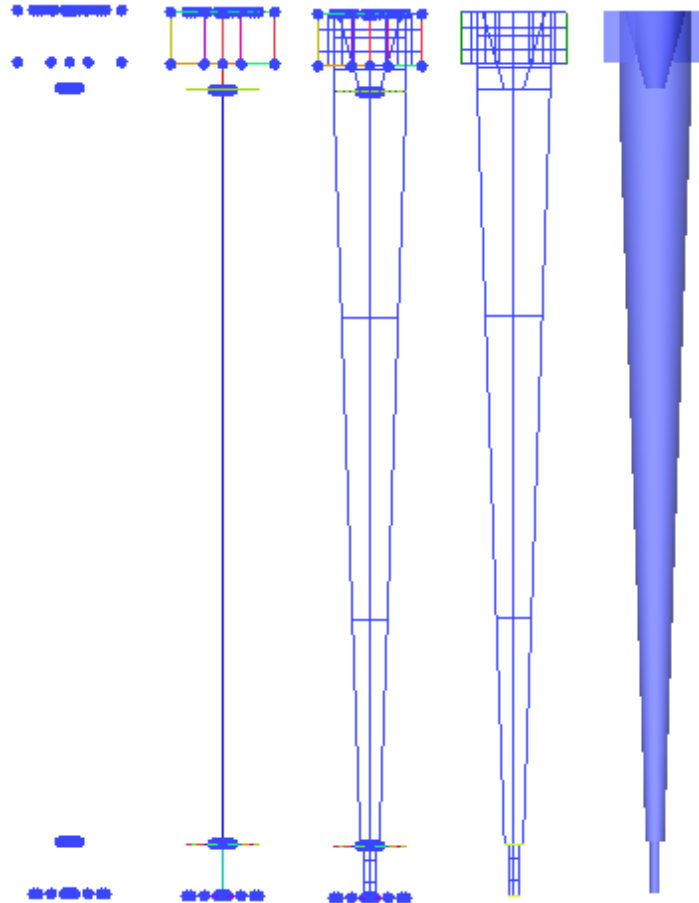


Figura 8 – Geometria de um ciclone padrão.



As geometrias foram criadas a partir de pontos, curvas e superfícies como é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Geometrias criadas a partir de pontos, curvas e superfícies.



### 3.1.1 Malhas

As malhas de elementos hexaédricos foram confeccionadas adotando o conceito de multi-blocos como pode ser visto na Figura 10. Uma das malhas construídas pode ser observada na Figura 11.



Figura 10 – Blocagem.

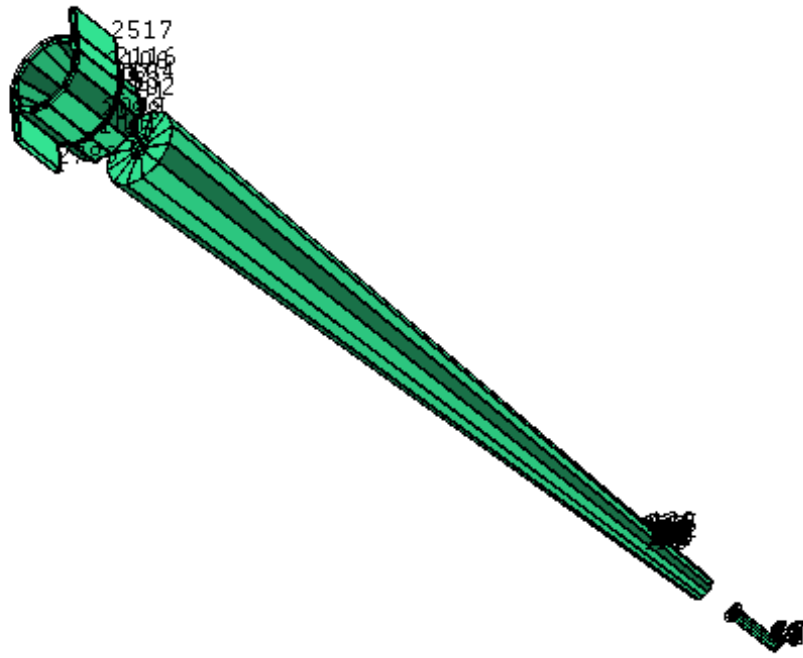
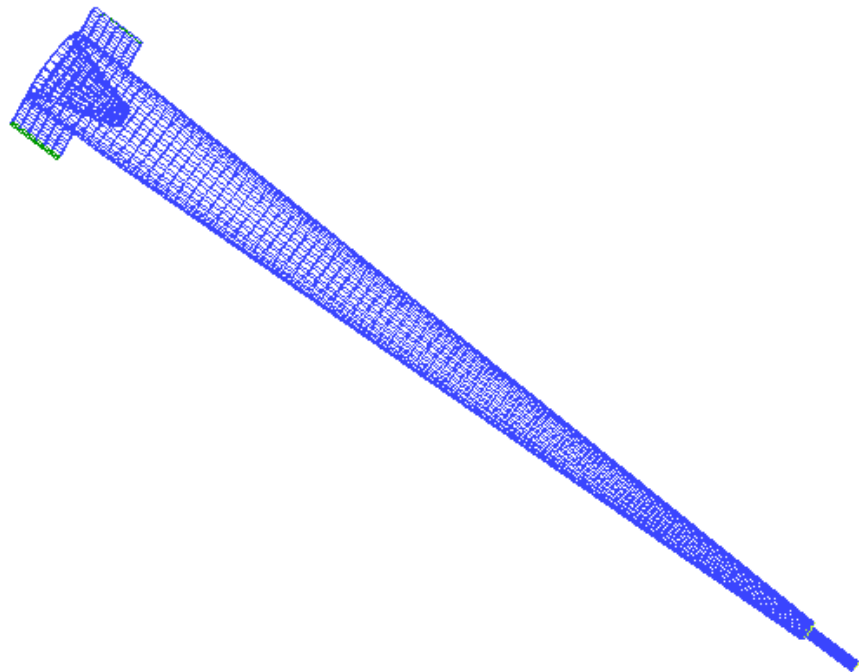


Figura 11 – Malha com tronco cônico de 75 mm.



### 3.3 Modelagem Matemática

Foi utilizada a abordagem Euleriana-Euleriana para descrever o escoamento bifásico gás-sólido (ar-chumbo), assumindo o modelo de partículas dispersas. A fase gás foi considerada fase contínua e o sólido como fase dispersa. A modelagem proposta é similar à que foi utilizada por Santos e Medronho (2007), Barbosa (2011) e Zhang *et al.* (2013).

Neste modelo se aplicam as equações diferenciais de conservação de massa e momento linear levando em conta as seguintes considerações:

- Escoamento incompressível no regime turbulento e permanente;
- Propriedades físico-químicas constantes;
- Transferência de massa, massa interfacial e fonte de massa desconsideradas;
- O efeito da gravidade foi considerado;
- O escoamento é considerado isotérmico;
- Foram consideradas apenas as forças de arraste e de pressão de sólidos, as de não-arraste (sustentação, massa virtual, forças de lubrificação nas paredes, dispersão turbulenta) são desconsideradas.

A Equação (1) representa a equação de conservação de massa.

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

onde  $f_\alpha, \rho_\alpha, \vec{U}_\alpha$  são a fração volumétrica, massa específica e vetor velocidade da fase  $\alpha$ , respectivamente.

A Equação (2) representa a equação de momento linear.

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p_\alpha + f_\alpha \nabla \tau_\alpha + \nabla \cdot \{f_\alpha \mu_{ef} [\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T]\} + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (2)$$

onde  $p_\alpha$  é a pressão na fase  $\alpha$ ,  $\vec{S}_{M\alpha}$  é o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume,  $\vec{M}_\alpha$  é a força total por unidade de volume, referente as forças interfaciais definida pela Equação 11. O termo  $\tau_\alpha$  refere-se a tensões viscosas, turbulentas e tensão da fase sólida (caso seja a fase dispersa composta por sólidos).

Na Equação (2)  $\mu_{ef}$  corresponde a viscosidade efetiva, definida na Equação (3):

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta é função da intensidade turbulenta do escoamento e é desconhecida. É necessário a utilização de modelos para prever o seu valor.

### 3.3.1 Modelo de Turbulência para a Fase Contínua

Neste trabalho, o modelo escolhido para a fase contínua foi o  $\kappa - \varepsilon$  padrão. De acordo com Gabbi (2013), esse é um modelo de duas equações muito utilizado por pesquisadores devido sua precisão e estabilidade. Esse modelo assume que a viscosidade turbulenta é dada pela Equação (4).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

onde  $C_\mu$  é uma constante empírica com valor  $C_\mu = 0,09$ . As equações de transporte para as características de turbulência para determinação dos valores de energia cinética turbulenta  $\kappa$  e de taxa de dissipação de turbulência  $\varepsilon$ , dadas na Equação (5) e na Equação (6).

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \kappa) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

As constantes do modelo têm os seguintes valores:  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_{\varepsilon} = 1,3$  e  $\sigma_{\kappa} = 1,0$ . O termo  $P_{\kappa}$  representa a produção de energia cinética turbulenta, dada na Equação (7).

$$P_{\kappa} = \mu_t \nabla \vec{U} \left[ \nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \vec{U} (3\mu_t \nabla \vec{U} + \rho \kappa) + P_{\kappa b} \quad (7)$$

onde  $p_{kb}$  é o termo de produção de empuxo, modelado na Equação (8):

$$p_{kb} = \frac{\mu_T}{\rho \sigma_{\rho}} \vec{g} \cdot \nabla \rho \quad (8)$$

onde  $\vec{g}$  é o vetor aceleração da gravidade,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta e  $\sigma_{\rho}$  é o número de Prandtl turbulento, constante igual a 1.

### 3.3.2 Equações Constitutivas – Transferência de Momento

Na Equação (2) tem-se o termo  $\vec{M}_{\alpha}$  que pode ser definido como as forças interfaciais agindo na fase  $\alpha$ , devido a presença de outras fases.  $\vec{M}_{\alpha\beta}$  é a transferência de momento interfacial entre as fases  $\alpha$  e  $\beta$ , como é definido na Equação (9).

$$\vec{M}_{\alpha} = \sum_{\beta/\alpha} \vec{M}_{\alpha\beta} = \vec{M}_{\alpha\beta}^D + \vec{M}_{\alpha\beta}^L + \vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \vec{M}_S \quad (9)$$

onde  $\vec{M}_{\alpha\beta}^D$  corresponde às forças de arraste interfacial,  $\vec{M}_{\alpha\beta}^L$  corresponde às forças de sustentação,  $\vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB}$  corresponde às forças de lubrificação nas paredes,  $\vec{M}_{\alpha\beta}^{VM}$  corresponde à massa virtual,  $\vec{M}_{\alpha\beta}^{TD}$  corresponde à dispersão turbulenta e  $\vec{M}_S$  corresponde às forças devido à pressão dos sólidos.

Neste modelo em questão apenas as forças de arraste e as forças devido à pressão dos sólidos são consideradas, logo se deteve a discutir apenas estes tópicos.

- Forças de arraste interfacial

Força de arraste interfacial por unidade de volume que esteja sobre um corpo em movimento em relação ao fluido circundante é responsável pela maior parte da transferência da quantidade do momento interfacial. Na Equação (10) tem-se  $\vec{M}_{\alpha\beta}^D$  em função das velocidades relativas da fase contínua  $\vec{U}_\alpha$  e dispersa  $\vec{U}_\beta$ .

$$\vec{M}_{\alpha\beta}^D = C_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta) \quad (10)$$

onde  $C_{\alpha\beta}^{(d)}$  é o coeficiente de arraste interfacial e é expresso na Equação (11).

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_\alpha |\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta| \quad (11)$$

O termo  $A_{\alpha\beta}$  representa a área superficial por unidade de volume,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto e  $|\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta|$  é a velocidade de deslizamento entre as fases, na direção da fase contínua. O coeficiente de arrasto é função do número de Reynolds, da forma da partícula e da rugosidade.

Quando um corpo se movimenta no interior de um fluido as forças de atrito entre eles tendem a reduzir a velocidade do corpo. Isso depende da relação entre a velocidade do fluido e do corpo, quando se tem velocidades relativas baixas, os efeitos de inércia são desprezíveis em escoamentos com baixos números de Reynolds (Re) (regime de resistência de viscosidade). Na região viscosa, o

coeficiente de arrasto para uma partícula esférica em um escoamento, pode ser expresso pela Equação (12), a correlação de Schiller-Naumann.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15Re^{0,687}) \quad (12)$$

No regime turbulento, o coeficiente de arrasto é constante e tem o valor:  $C_D = 0,44$ .

- Tensor devido à pressão dos sólidos (Solids Stress Tensor)

Na fase particulada, são levados em consideração os efeitos de colisão entre as partículas na equação de conservação do momento linear. Na Equação (2), um dos termos tratados foi o tensor de pressão dos sólidos ( $\tau_s$ ) que é expresso na Equação (13).

$$\tau_s = -P_s \delta + \mu_s \left\{ \left[ \nabla \vec{U}_s + (\nabla \vec{U}_s)^T \right] - \frac{2}{3} (\nabla \vec{U}_s) \delta \right\} + \xi_s \nabla \vec{U}_s \delta \quad (13)$$

Onde  $\delta$  é a função delta de Kronecker,  $P_s$  é a pressão da fase sólida,  $\mu_s$  é a viscosidade de cisalhamento da fase sólida e  $\xi_s$  é a viscosidade do meio sólido (*bulk*).

### 3.3.3 Teoria Cinética dos Escoamentos Granulares

Quando se trata de uma abordagem Euleriana-Euleriana, assume-se que existem dois fluidos. Neste caso, tem-se um fluido real (o ar) e um hipotético que representa as partículas. Segundo Mineto (2009), assumir que a fase dispersa (particulado) é um fluido constitui uma aproximação bastante grosseira. Além disso, implica-se também a procura de um valor para a viscosidade da fase

particulada. Para contornar essas questões, tem sido usada a teoria cinética dos escoamentos granulares.

De acordo com Jansson (2014), a questão mais importante quando se trata de escoamento granular é a fração volumétrica. Para baixas frações volumétricas das partículas, o comportamento entre as partículas é semelhante aos gases, para moderadas poderia se comparar ao comportamento de líquidos e para altas seria como comparar a sólidos.

Segundo Andersson *et al.* (2012), o escoamento granular é dividido em duas famílias: *Rapid Granular* e *Slow Granular*. O segundo caso ocorre em um ambiente denso, com muitas partículas e colisões frequentes e fricção. Já no primeiro caso (*Rapid Granular*), a distância entre as partículas é maior e elas têm um movimento mais livre e tem-se menos colisões. A teoria cinética dos escoamentos granulares pertence a primeira família: *Rapid Granular*.

Nesse modelo, a pressão de sólido é composta por um termo cinético e um termo devido as colisões entre partículas (Barbosa, 2011), como observa-se na Equação (14).

$$P_s = f_s \rho_s \theta_s [1 + 2(1 + e)g_0] f_s \quad (14)$$

onde “*e*” é o coeficiente de restituição devido à colisão das partículas,  $g_0$  é a função da distribuição radial,  $\theta_s$  é a temperatura granular,  $f_s$  é a fração volumétrica da fase sólida,  $\rho_s$  é a massa específica do sólido.

Mineto (2009) define temperatura granular como a temperatura do sólido semelhante a temperatura do gás apresentada na termodinâmica. Para Andersson *et al.* (2012) a temperatura granular é definida como energia associada ao movimento aleatório das partículas. Barbosa (2011) e Wang *et al.* (2015) definem como uma variação de energia cinética das partículas devido ao choque entre as mesmas.

O coeficiente de restituição corresponde à energia cinética dissipada em sucessivos impactos (Dias e Barroso, 2006). Tem-se uma esfera que é solta a uma

certa altura, colide com uma superfície perfeitamente plana e alcança a mesma altura inicial. Tem-se então uma colisão perfeitamente elástica e o coeficiente terá valor igual a 1. Caso a esfera, ao colidir com a superfície, fique em repouso, houve uma colisão perfeitamente inelástica e o valor do coeficiente é 0.

A função de distribuição radial ( $g_0$ ), de acordo com Barbosa (2011), trata a distância adimensional entre as partículas, é um fator de correção que modifica a probabilidade de haverem colisões e está definida na Equação (15).

$$g_0 = \frac{s + d_p}{s} \quad (15)$$

onde  $s$  é a distância entre as partículas e  $d_p$  é o diâmetro da partícula. Nota-se que se  $s$  tende a infinito (ambiente esparso),  $g_0$  tende a um. E quando  $s$  tende a zero (ambiente denso),  $g_0$  tende a infinito.

O modelo utilizado para determinação da função de distribuição radial foi o Lun e Savage, Equação (16).

$$g_0(f_s) = \left[ 1 - \left( \frac{f_s}{f_{s,max}} \right) \right]^{-2.5 f_{s,max}} \quad (16)$$

onde  $f_s$  é a fração volumétrica da fase sólida e  $f_{s,max}$  é a fração volumétrica da fase sólido máxima no escoamento particulado.

A temperatura granular ( $\theta_s$ ) pode ser determinada por expressões algébricas, como foi feito nessa modelagem. A modelagem de zero equação implementada no Ansys CFX versão 15 é o mais simples modelo algébrico de Ding e Gidaspow (Equação (17)).

$$\theta_s = \frac{1}{15(1 - e)} d_s^2 S^2 \quad (17)$$



onde  $d_s$  é o diâmetro da partícula e  $S$  é o tensor da taxa de deformação é definido na Equação (18).

$$S^2 = \frac{1}{2} [\nabla U + (U)^T]^2 \quad (18)$$

A determinação da viscosidade está associada às partículas dependendo do tipo de deformação, viscosidade cisalhante e viscosidade do meio sólido (*viscosity bulk*). A viscosidade cisalhante é utilizada quando a taxa de deformação for cisalhante, gerando uma tensão cisalhante proporcional. Os efeitos de colisão ( $\mu_{s,col}$ ), cinética ( $\mu_{s,kin}$ ) e de fricção ( $\mu_{s,fr}$ ) são somados para resultar na viscosidade de cisalhamento ( $\mu_s$ ) como demonstrado na Equação (19).

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (19)$$

Como visto anteriormente, os efeitos de fricção são mais aparentes em ambientes densos, no caso de ambientes com partículas mais livres (maior distância entre elas), esse efeito pode ser desprezado como na Equação (20).

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} \quad (20)$$

Tem-se nas Equações (21) e (22) os modelos para os termos de efeito de colisão e cinético, respectivamente.

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} f_s^2 \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (21)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{5\sqrt{\pi}}{48} \frac{\rho_s d_p}{(1 + e)g_0} \left[ 1 + \frac{4}{5} (1 + e)g_0 f_s \right]^2 \sqrt{\theta_s} \quad (22)$$

A viscosidade do meio sólido (*bulk viscosity*) ( $\xi_s$ ) demonstra a resistência das partículas a compressão e expansão. É expressa na Equação (23).

$$\xi_s = \frac{4}{3} f_s^2 \rho_s d_p g_0 (1 - e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (23)$$

#### 3.3.4 Condições de Contorno

Foram adotadas as condições de contorno a seguir:

- Nas saídas foram adotadas as condições de pressão estática igual a 1 atm;
- Nas paredes internas do separador ciclônico foram adotadas as condições de não deslizamento, ou seja, componentes de velocidades nas direções x, y e z nulas;
- Na seção de entrada foi adotada uma velocidade constante,  $u_i$ , e a fração volumétrica do gás,  $f_g$  (Ver Tabela 2).

As propriedades dos fluidos utilizados foram:

- A densidade do gás foi considerada 1,185 Kg/m<sup>3</sup> e a viscosidade foi de 1,831x10<sup>-5</sup> Pa. s;
- A densidade do chumbo (Pb) adotada foi de 11340 Kg/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 1 são descritos os parâmetros empregados nas simulações utilizando o software *Ansys CFX 15*.

Tabela 1 – Parâmetros empregados nas simulações.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Abordagem	Euleriana-Euleriana
Escoamento	Bifásico (ar e partículas de chumbo)
Temperatura	25°C (Escoamento isotérmico)
Fase Contínua	Gás (Ar à 25°C)
Modelo de Turbulência	$k - \varepsilon$ padrão
Fase Dispersa	Partículas de Chumbo
Modelo Fase Dispersa	Teoria cinética dos escoamentos granulares
Modelo de pressão de sólido	Teoria cinética dos escoamentos granulares (Equação 14)
Função de distribuição radial	Lun Savage (Equação 16)
Modelo de Temperatura Granular	Modelo algébrico (zero equação) de Ding e Gidaspow (Equação 17)
Viscosidade do meio sólido ( <i>bulk viscosity</i> )	Teoria cinética dos escoamentos granulares (Equação 23)
Viscosidade de cisalhamento ( <i>solid shear viscosity</i> )	Teoria cinética dos escoamentos granulares (Equação 20, 21 e 22)
Força de arraste ( <i>drag force</i> )	Schiller- Naumann

Fonte: Ansys Help Viewer.

Para quantificar a eficiência da separação, foram utilizadas as relações mostradas nas Equações (25) e (26).

$$E_{SGásNaSaídaGás}(\%) = 100. \left| \frac{\text{massa de Gás nas entradas}}{\text{massa de Gás na saída de Gás}} \right| \quad (25)$$

$$E_{SPbNaSaídaPb}(\%) = 100. \left| \frac{\text{massa de Pb nas entradas}}{\text{massa de Pb na saída de Pb}} \right| \quad (26)$$

### 3.3.5 Casos Estudados

Os casos estudados são mostrados na Tabela 2.

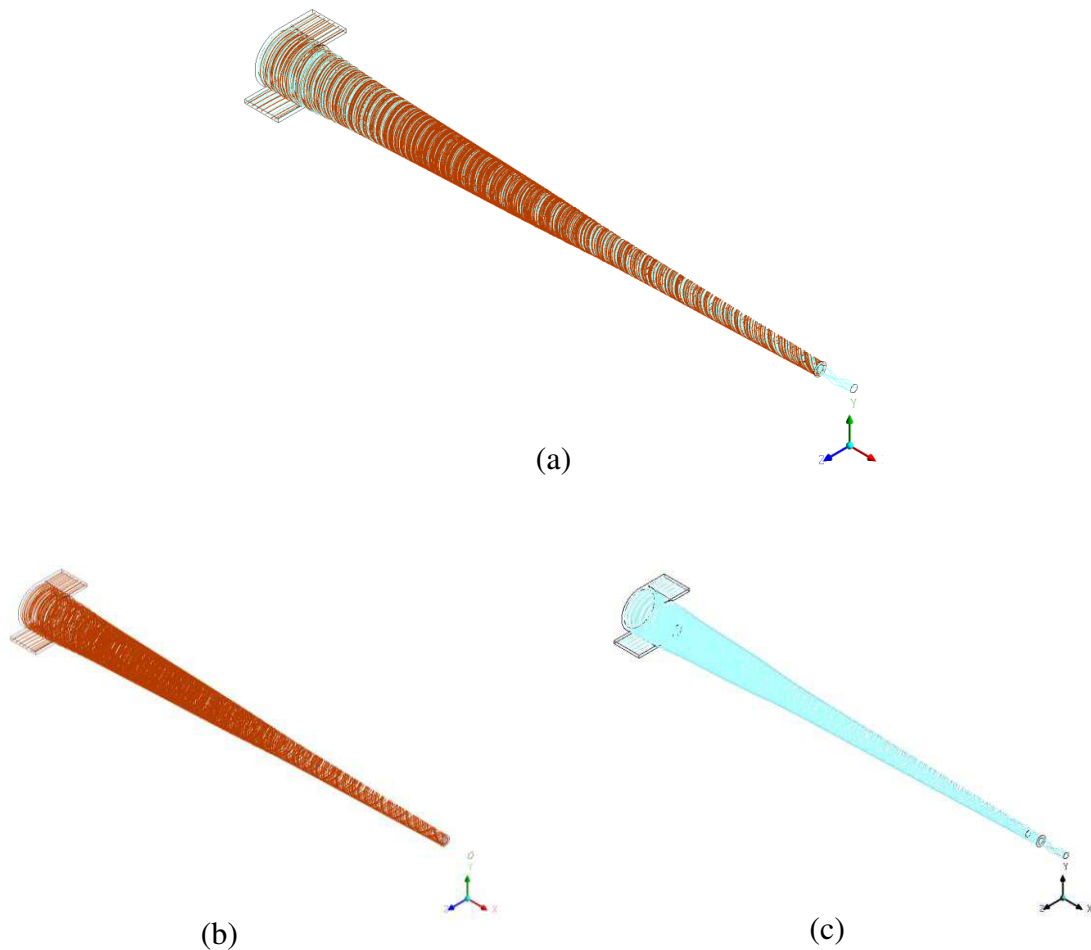
**Tabela 2** – Relação dos casos estudados.

<b>Casos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Velocidade de Entrada (m/s)</b>	<b>Fração volumétrica do Gás</b>	<b>Diâmetro da Partícula (µm)</b>
1	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	5	0,9	0,5
2	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	8	0,9	0,5
3	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	10	0,9	0,5
4	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	12	0,9	0,5
5	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	15	0,9	0,5
6	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	5	0,7	0,5
7	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	5	0,5	0,5
8	Malha com saída original e tronco cônico de 75 mm	5	0,9	5
9	Malha com saída original e tronco cônico de 100 mm	5	0,9	0,5
10	Malha com saída original e tronco cônico de 50 mm	5	0,9	0,5
11	Malha com tronco cônico de 75 mm e com tubo interno de 25 mm	5	0,9	0,5
12	Malha com tronco cônico de 75 mm e com saída modificada para boca de sino com tubo interno de 25 mm	5	0,9	0,5
13	Malha com tronco cônico de 75 mm e com saída modificada para boca losango com tubo interno de 25 mm	5	0,9	0,5
14	Malha de um ciclone comum (saída superior)	5	0,9	0,5

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

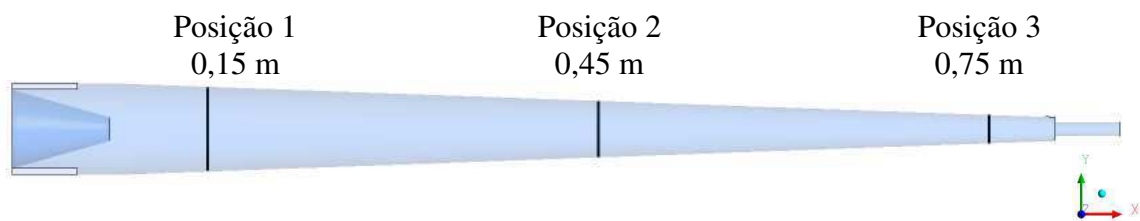
Na Figura 12 estão representadas as linhas de fluxo para a mistura gás/partículas de chumbo, para as partículas de chumbo e para a corrente de gás (ar à 25°C). É possível perceber que a mistura entra no separador ciclônico pelas duas entradas tangenciais e a partir desse momento o escoamento adquire um comportamento helicoidal tanto da corrente de gás, quanto das partículas de chumbo. Este comportamento é proporcionado pelas forças centrífugas no interior do separador ciclônico. Pode-se observar também que as partículas estão mais próximas as paredes e as linhas de gás se encontram um pouco mais próximas ao centro do equipamento. Além da diferença de densidade, esse comportamento pode ser explicado através das forças a que esse escoamento é submetido, como por exemplo, as forças inerciais (forças centrífugas), força peso e força de arraste.

Figura 12 – Linhas de fluxo de chumbo e de gás (a), apenas chumbo (b) e apenas gás (c).



Com o objetivo de representar os perfis de velocidade, pressão e concentração, encontram-se representadas na Figura 13 as posições longitudinais ao longo do separador ciclônico em que foram analisados os resultados dos casos avaliados. A título de exemplificação foi escolhido o separador com tronco cônico de 75 mm e sem alteração na seção de saída. A posição 1 se encontra a 0,15 m (Plano XY), a posição 2 a 0,45 m e a posição 3 a 0,75 m, as três na direção X.

Figura 13 - Posição em metros das linhas de perfil no separador ciclônico com alongamento interno de 50 mm e saída boca de sino.



#### 4.1 Avaliação das Malhas

Neste tópico é apresentado o estudo de dependência de malha numérica. Foram utilizadas sete geometrias e para cada uma delas, foi feito o ajuste de malha. Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas as geometrias avaliadas. Na Figura 14 ilustra as modificações na seção do tronco cônico e na Figura 15 as modificações do tubo de saída da fase mais leve.

Figura 14 - Geometrias de tronco cônico de (a) 50mm (b) 75mm e (c) 100 mm.

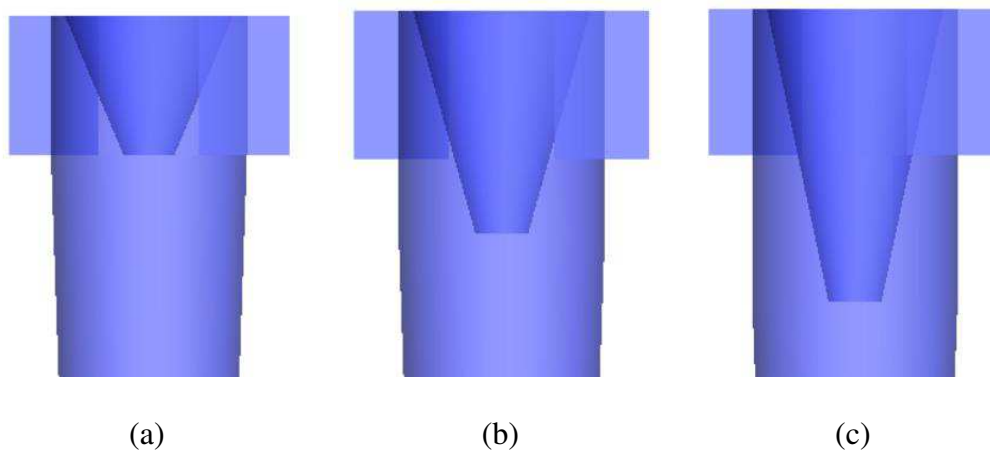
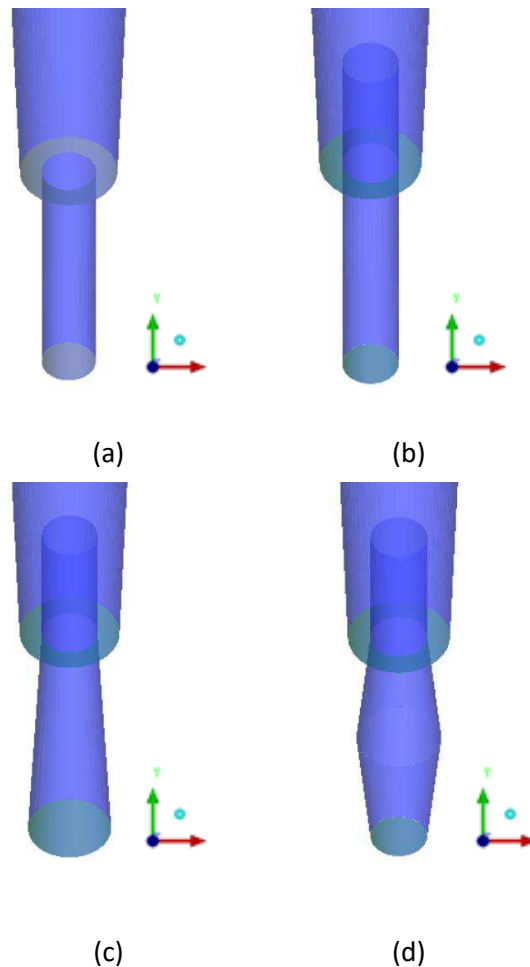


Figura 15 – Saídas modificadas: (a) saída comum (b) saída comum com adição de tubo interno de 25 mm, (c) saída boca de sino com tubo interno de 25 mm, (d) saída losango com tubo interno de 25 mm.



Nas Tabelas 3 a 9 são apresentadas as características das malhas (densidade de elementos) avaliadas para as sete geometrias. São analisadas as eficiências de separação das partículas de chumbo e de gás com auxílio das Equações 25 e 26. Nas Figuras 16 a 43 estão representadas as curvas de eficiência, queda de pressão e velocidade tangencial e axial como função da malha utilizada. Neste caso, a queda de pressão é definida como sendo a diferença de pressão das seções de entrada e saída de chumbo ( $\Delta P$ ).

Ao observar as Figuras 16, 20, 24, 28, 32, 36 e 40 nota-se, de uma maneira geral, que ao aumentar a densidade de elementos sobre a malha, há uma tendência da eficiência a se manter constante, o que indicaria uma não dependência da malha destes resultados. Por outro lado, ao se analisar  $\Delta P$  em função de número de elementos da malha (Figura

17, 21, 25, 29, 33, 37 e 41), notou-se que este parâmetro apresenta resultados que dependem não apenas da malha, mas também das mudanças geométricas avaliadas. Comportamento este esperado tendo em vista que se é tomado um valor médio de pressão na seção de entrada e de saída do separador ciclônico. Como base nessas informações foram representados os perfis de velocidade tangencial ( $u_{\theta}$ ) e axial ( $u_x$ ), respectivamente, na posição axial 03 igual a 0,75 m (Figura 13) para as diferentes geometrias e malhas avaliadas.

Os resultados apresentados nas Figuras 18 e 19; 22 e 23; 26 e 27; 30 e 31; 34 e 35; 38 e 39; e 42 e 43, indicam que os resultados dos perfis de velocidade para as malhas 2 e 3 se sobrepõe, indicando que estes resultados nesta posição são independentes da malha. No entanto, na Figura 31, indica uma pequena discrepância, ou seja, apresenta um erro médio de 0,76%.

- Geometria 01 - Tronco cônico de 75mm e saída comum

Tabela 3 – Características das malhas numéricas da geometria 01.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ ) (Pa)
1	16232	87,52	33,77	126109
2	127064	93,15	33,72	147854
3	162652	95,26	33,78	180214

Figura 16 - Ajuste de malha para a geometria 01: número de elementos versus eficiências.

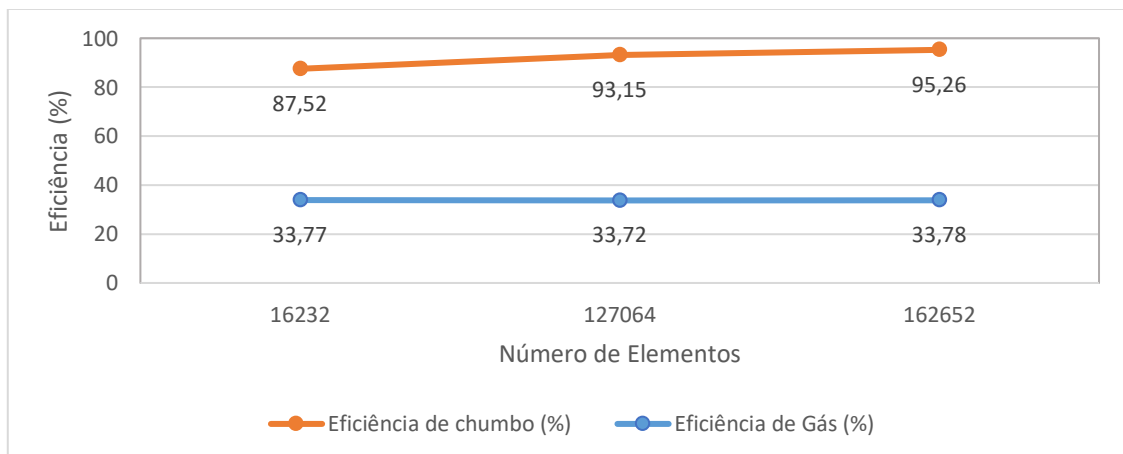




Figura 17 - Ajuste de malha para a geometria 01: número de elementos versus queda de pressão.

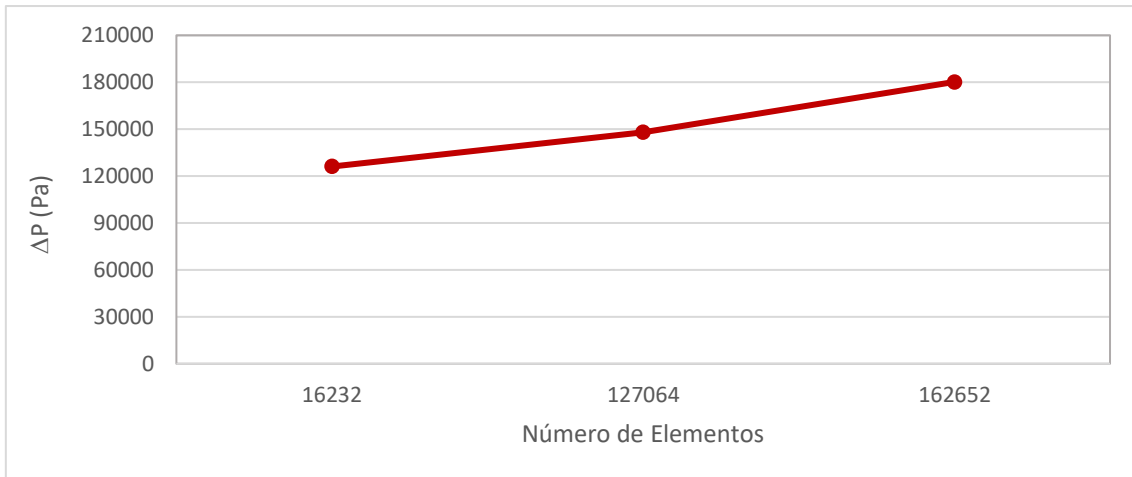


Figura 18 – Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

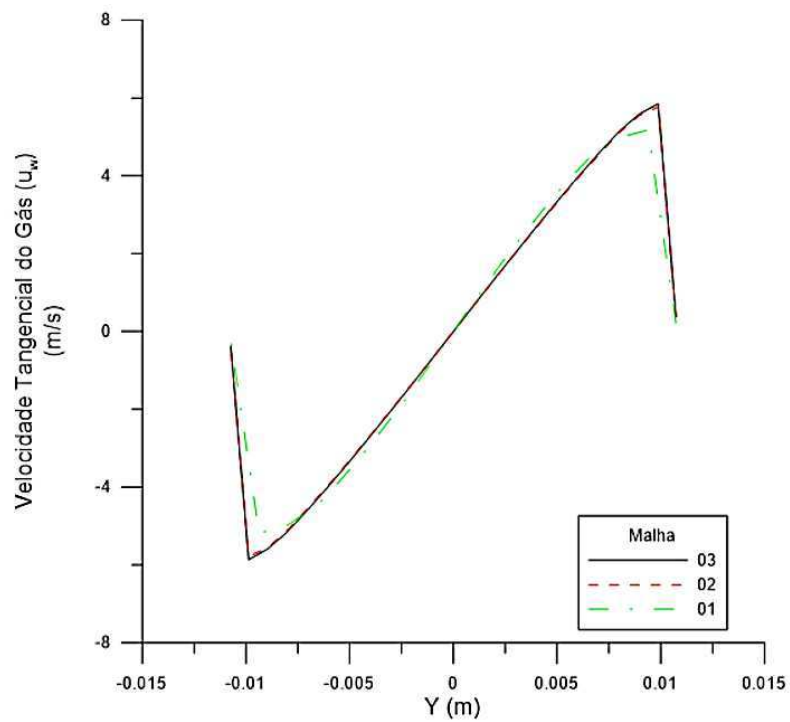
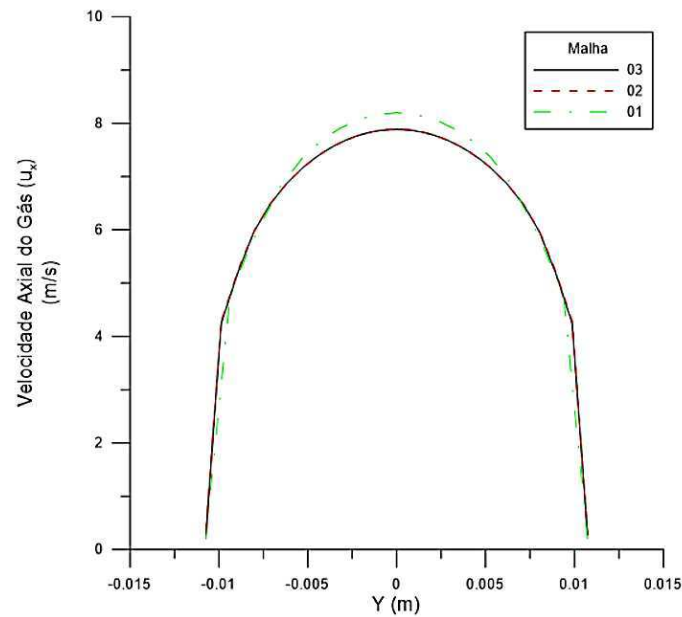


Figura 19 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.



- Geometria 02: Tronco Cônico 100 mm e saída comum.

Tabela 4 - Características das malhas numéricas da geometria 02.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ ) (Pa)
1	16016	82,08	32,32	97341
2	195862	74,35	30,48	80225
3	299772	73,79	30,29	76822

Figura 20 - Ajuste de malha para a geometria 02: número de elementos versus eficiências.

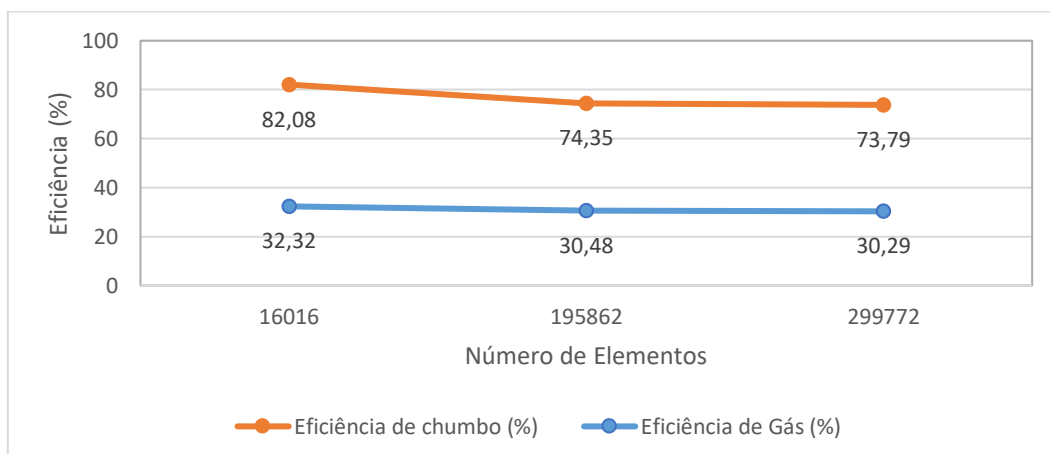


Figura 21 - Ajuste de malha para a geometria 02: número de elementos versus queda de pressão.

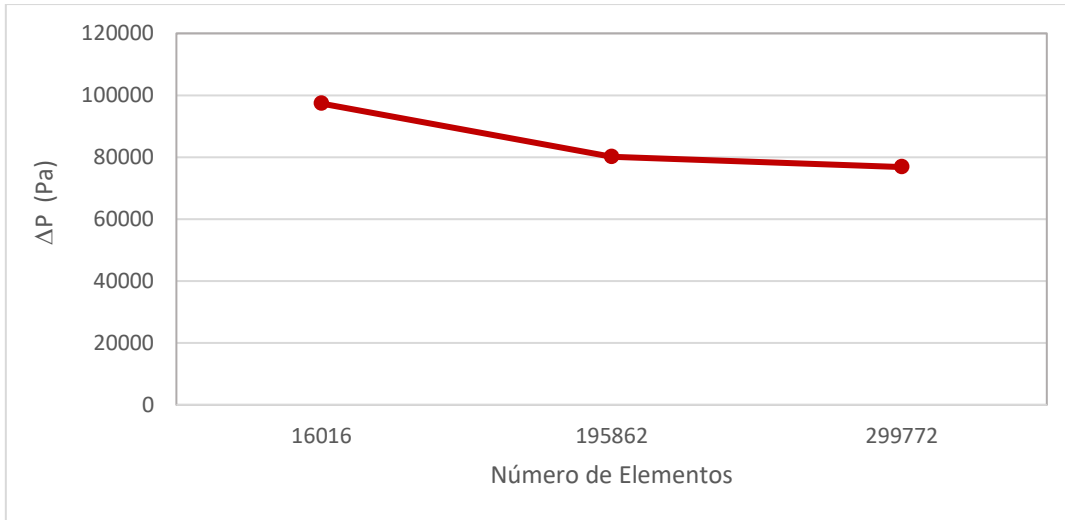


Figura 22 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial (y), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

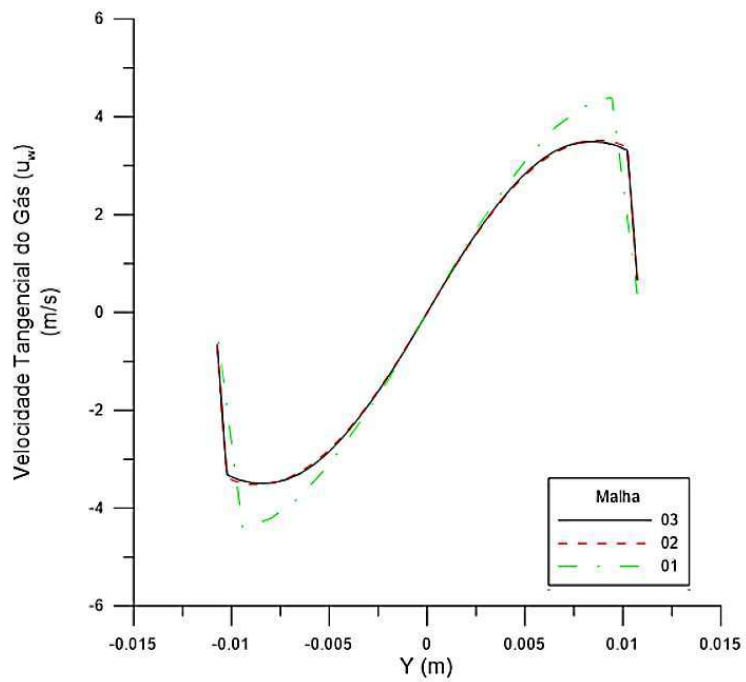
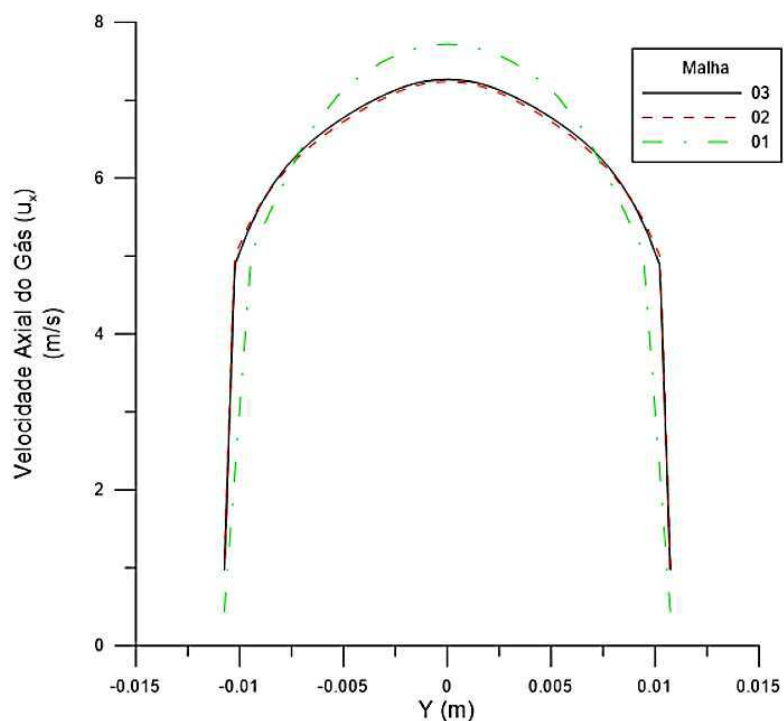


Figura 23 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.



- Geometria 03: Tronco cônico 50 mm e saída comum.

Tabela 5 - Características das malhas numéricas da geometria 03.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ )
1	16440	83,83	32,57	102460
2	239184	83,62	31,74	122216
3	378576	89,75	31,91	131108

Figura 24 - Ajuste de malha para a geometria 03: número de elementos versus eficiências.

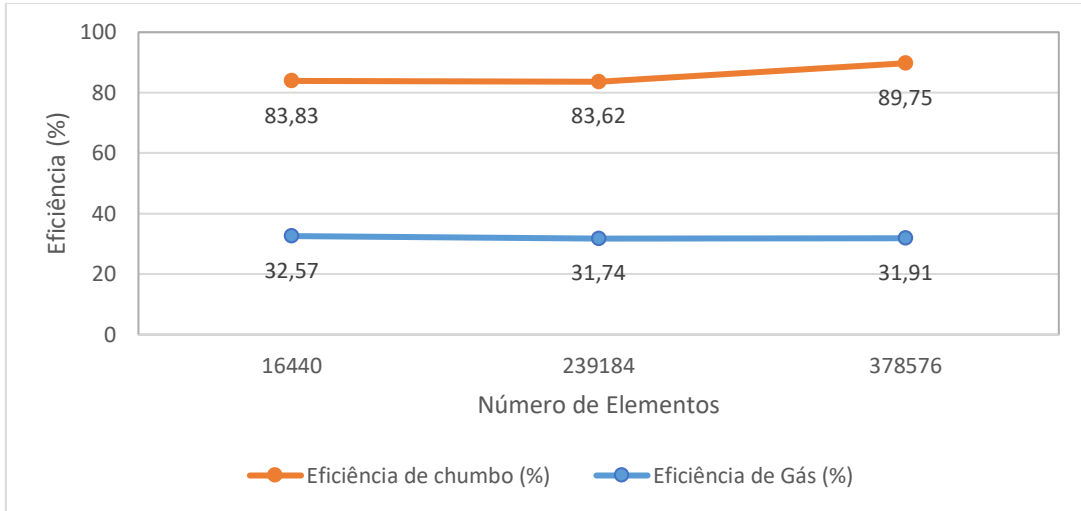


Figura 25 - Ajuste de malha para a geometria 03: número de elementos versus queda de pressão.

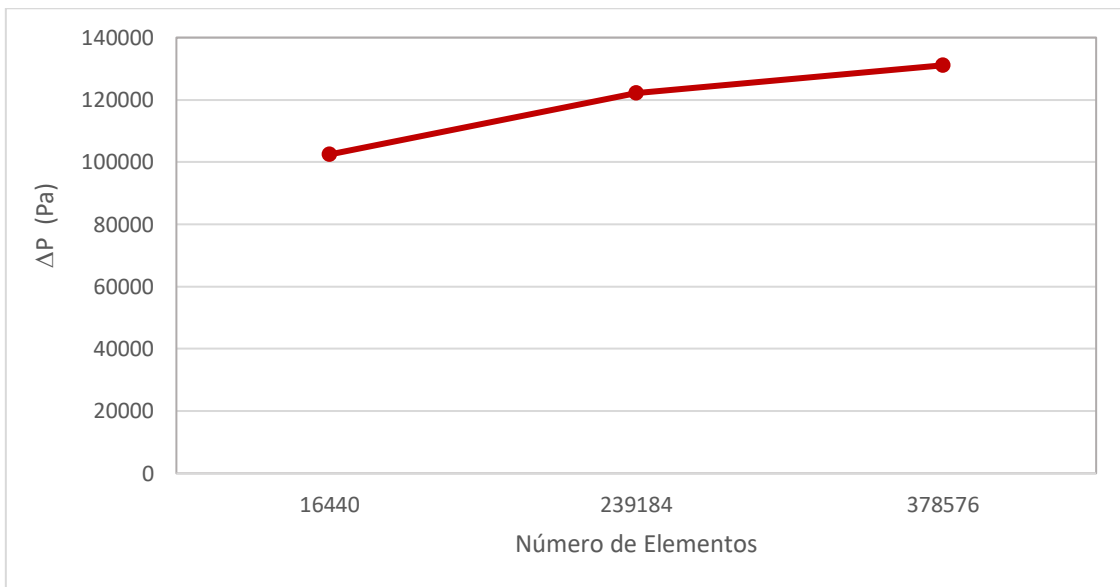


Figura 26 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

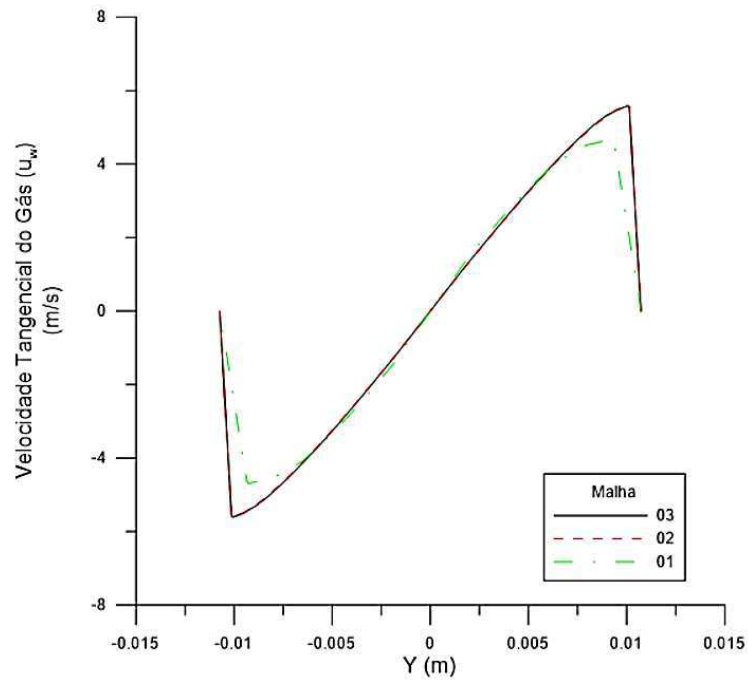
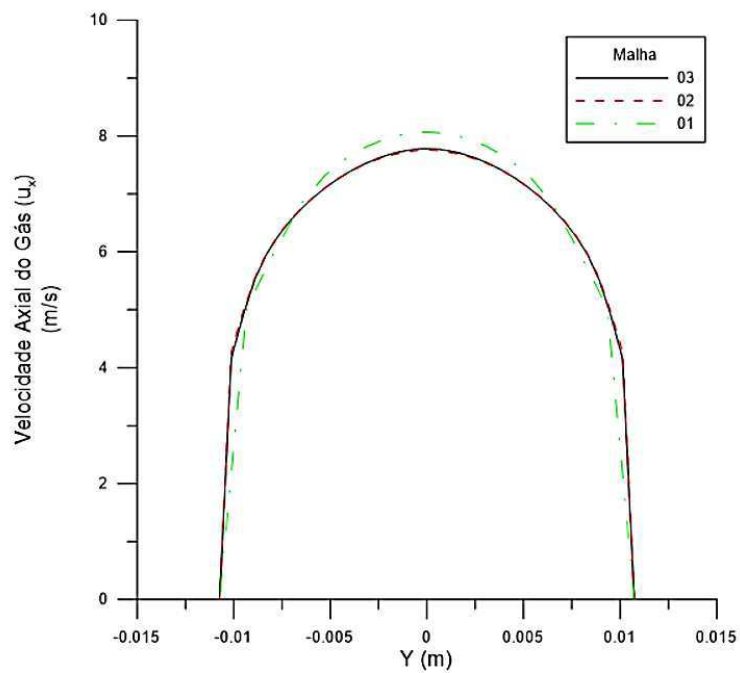


Figura 27 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.



- Geometria 04: Tronco cônico de 75 mm e saída com tubo interno de 25 mm.

Tabela 6 - Características das malhas numéricas da geometria 04.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ )
1	56576	100,00	32,22	460659
2	113144	95,05	32,49	159555
3	181888	95,36	32,45	166117

Figura 28 - Ajuste de malha para a geometria 04: número de elementos versus eficiências.

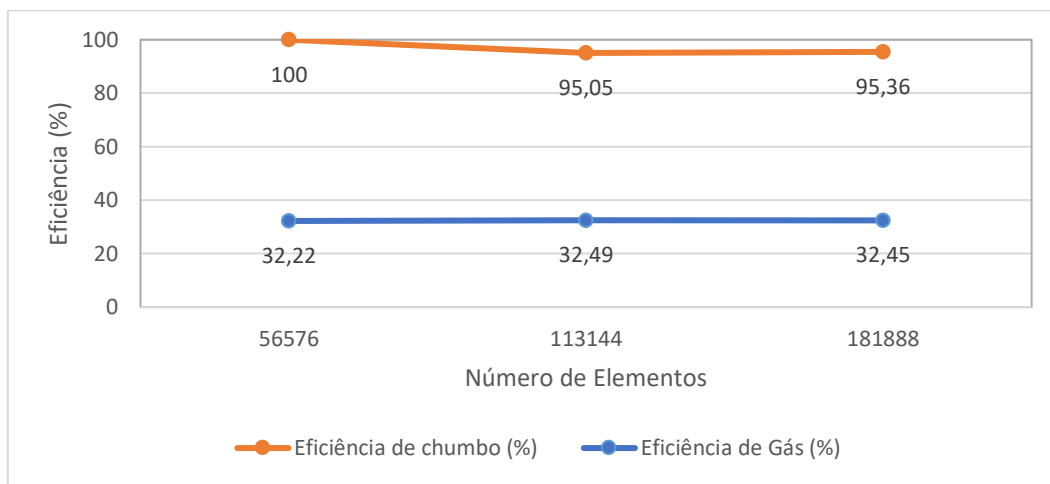


Figura 29 - Ajuste de malha para a geometria 04: número de elementos versus queda de pressão.

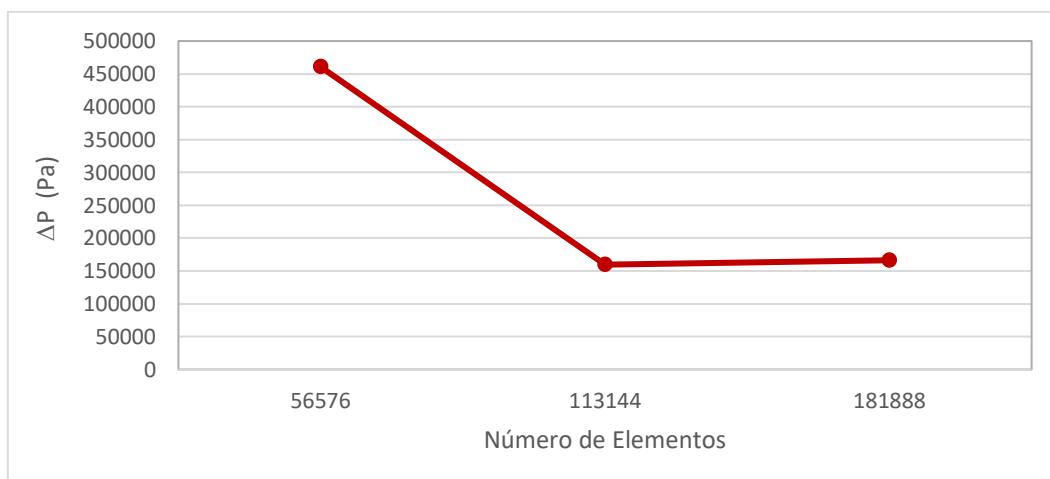


Figura 30 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

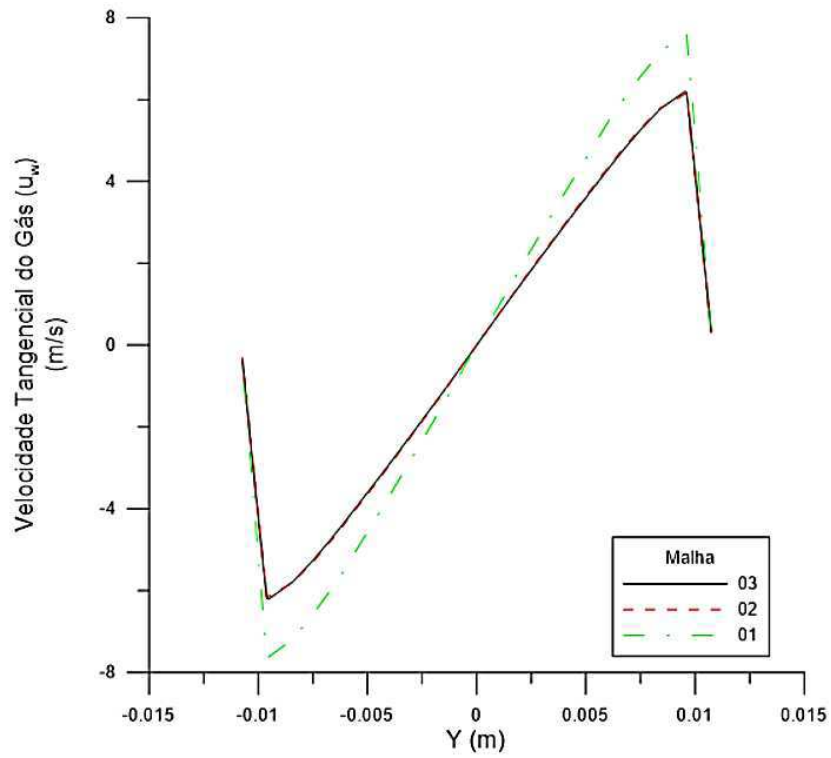
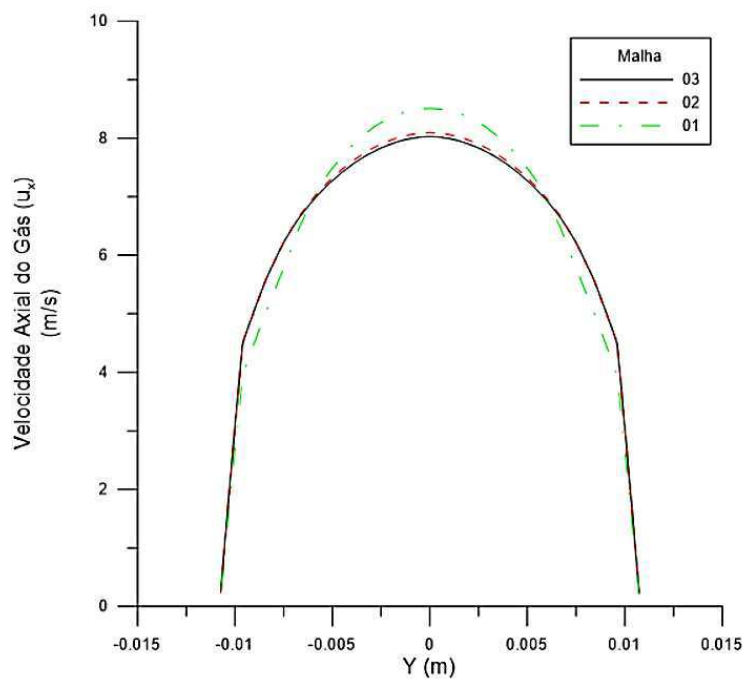


Figura 31 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.





- Geometria 05: Saída boca de sino e tubo interno 25 mm

Tabela 7 - Características das malhas numéricas da geometria 05.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ )
1	50164	77,25	45,70	110824
2	121752	79,64	45,87	139580
3	331956	73,95	47,32	186237

Figura 32 - Ajuste de malha para geometria 05: número de elementos versus eficiências.

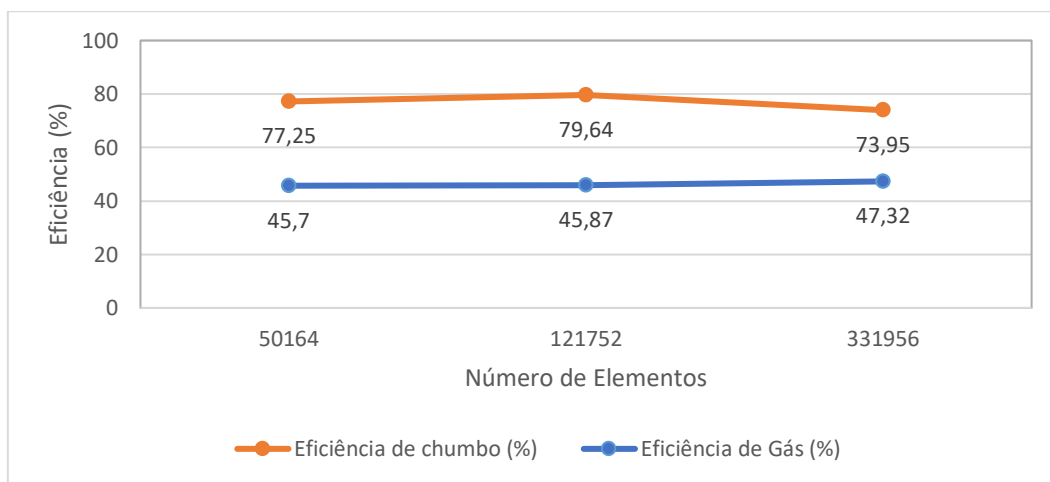


Figura 33 - Ajuste de malha para geometria 05: número de elementos versus queda de pressão.

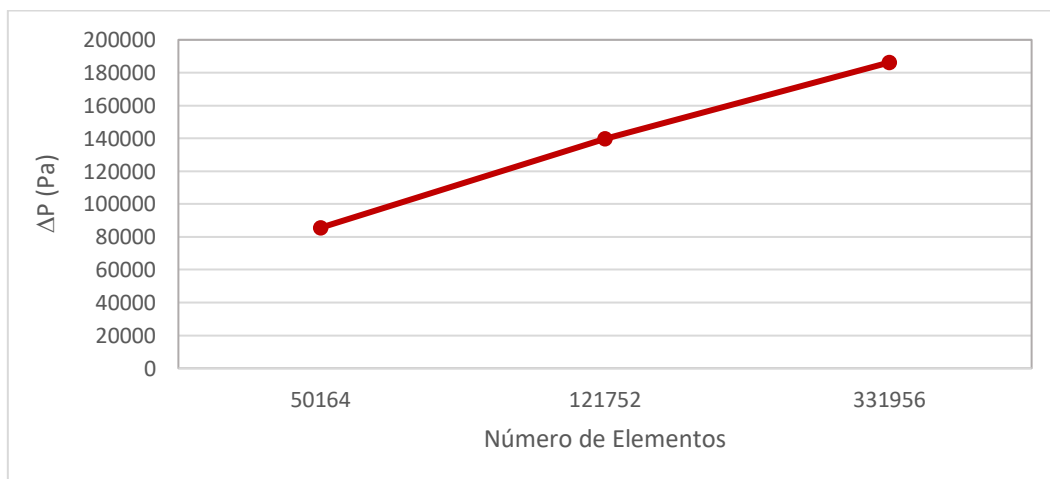


Figura 34 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

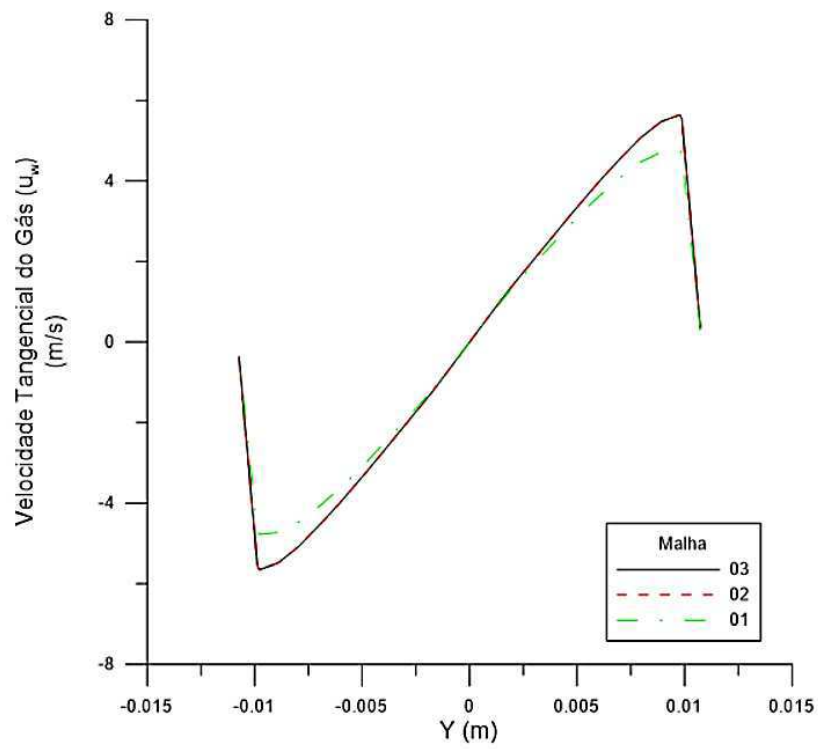
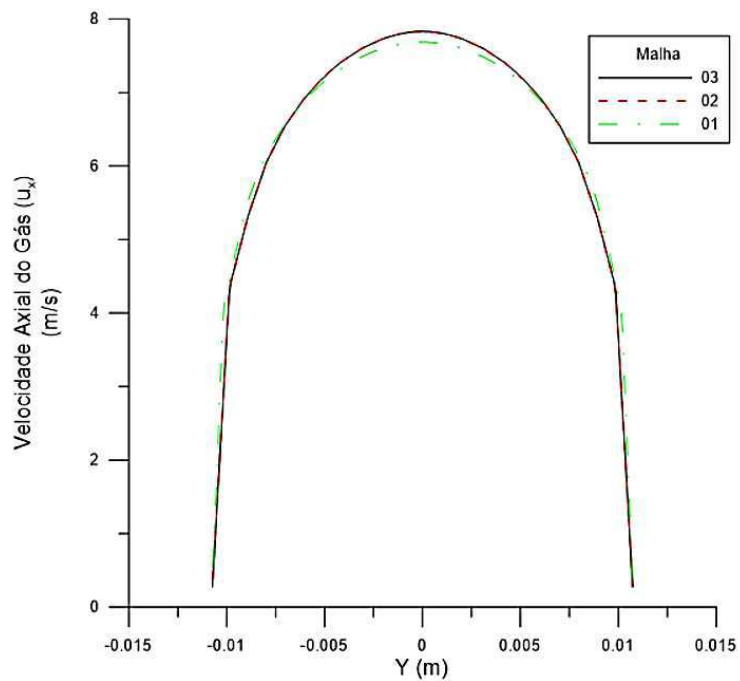


Figura 35 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.



- Geometria 06: Saída boca losango e tubo interno 25 mm

Tabela 8 - Características das malhas numéricas da geometria 06.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ )
1	54672	72,75	31,62	37410
2	328444	81,68	31,98	96204
3	382492	90,10	32,14	148016

Figura 36 - Ajuste de malha para geometria 06: número de elementos versus eficiências.

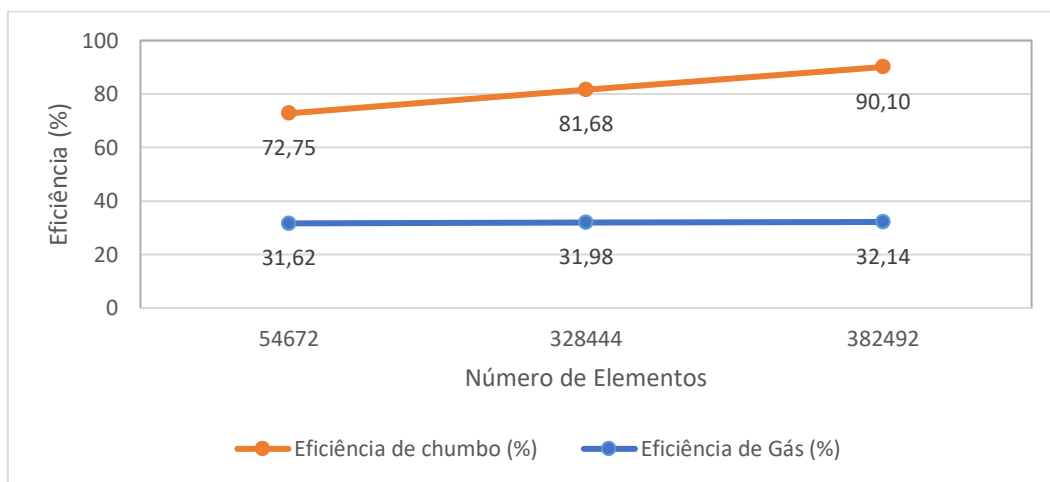


Figura 37 - Ajuste de malha para a geometria 06: número de elementos versus queda de pressão.

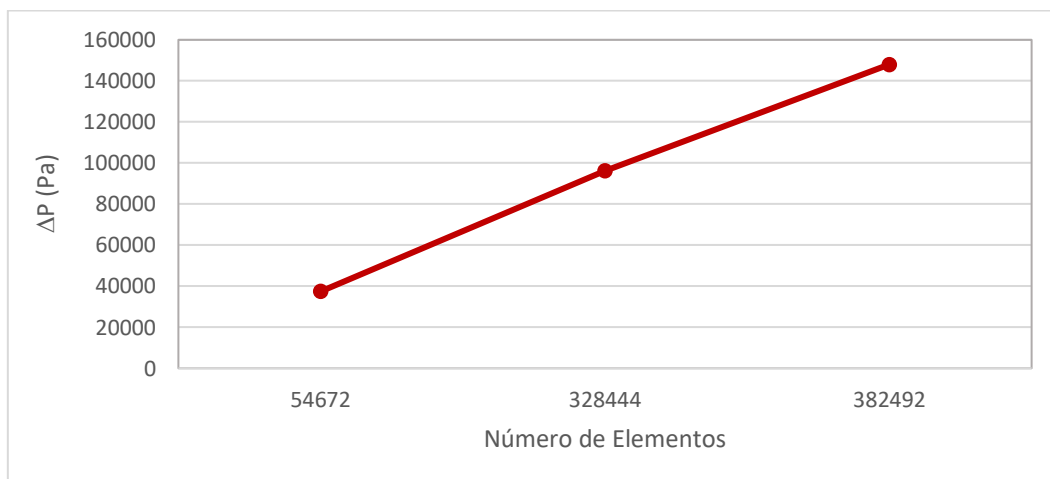


Figura 38 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

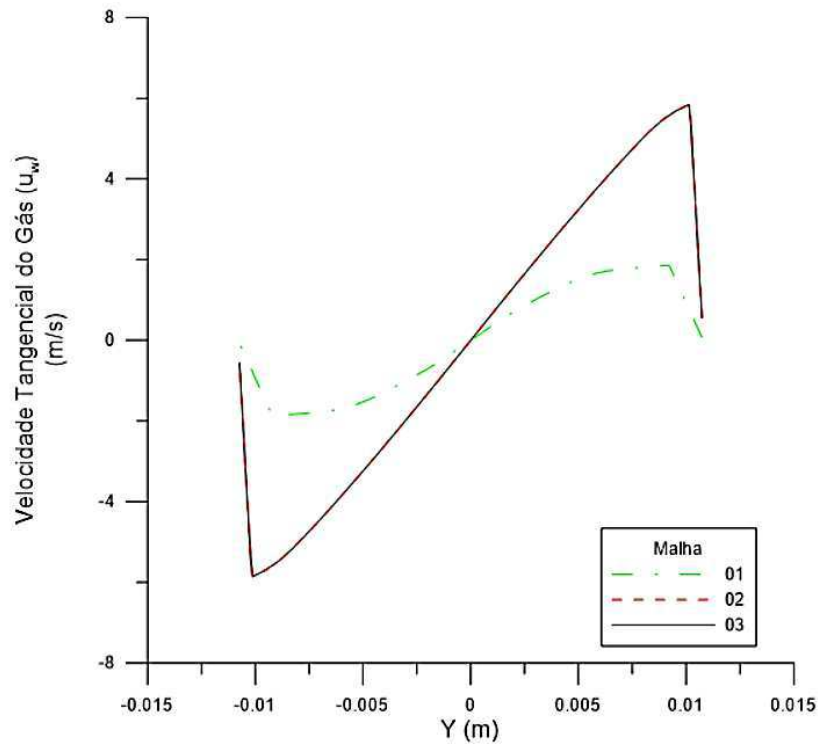
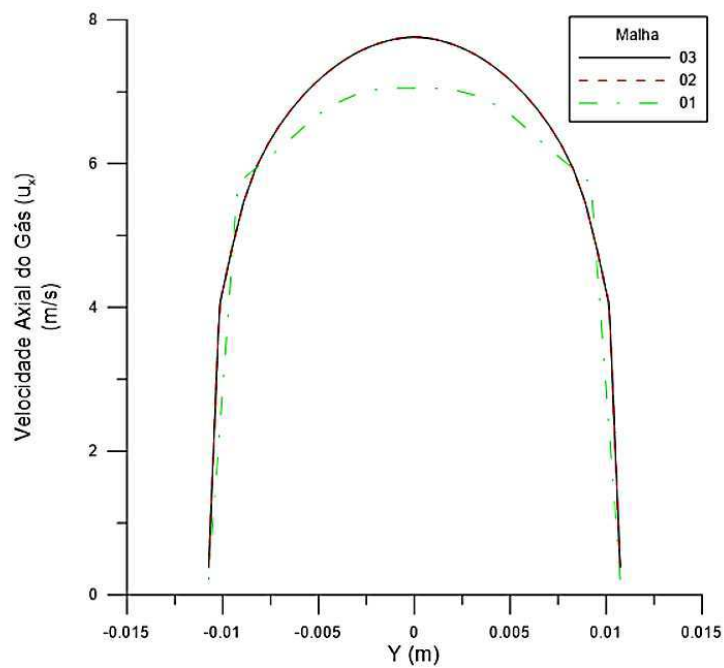


Figura 39 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.



- Geometria 07: Ciclone comum

Tabela 9 - Características das malhas numéricas da geometria 07.

Malha	Número de Elementos	Eficiência de chumbo (%)	Eficiência de Gás (%)	Queda de Pressão ( $\Delta P$ )
1	57105	65,70	35,29	18237
2	163488	67,96	38,23	75562
3	214461	61,92	38,28	76760

Figura 40 - Ajuste de malha para a geometria 07: número de elementos versus eficiências.

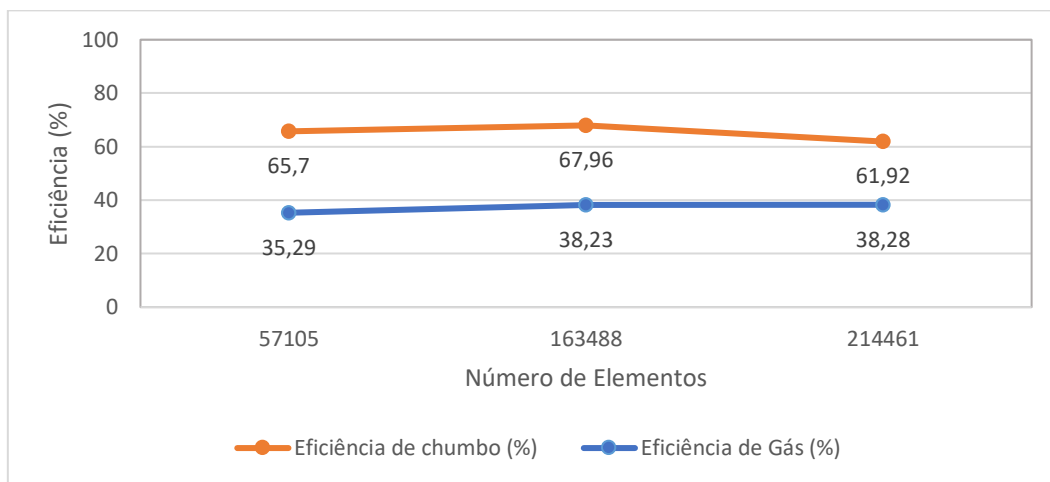


Figura 41 - Ajuste de malha para a geometria 07: número de elementos versus queda de pressão.

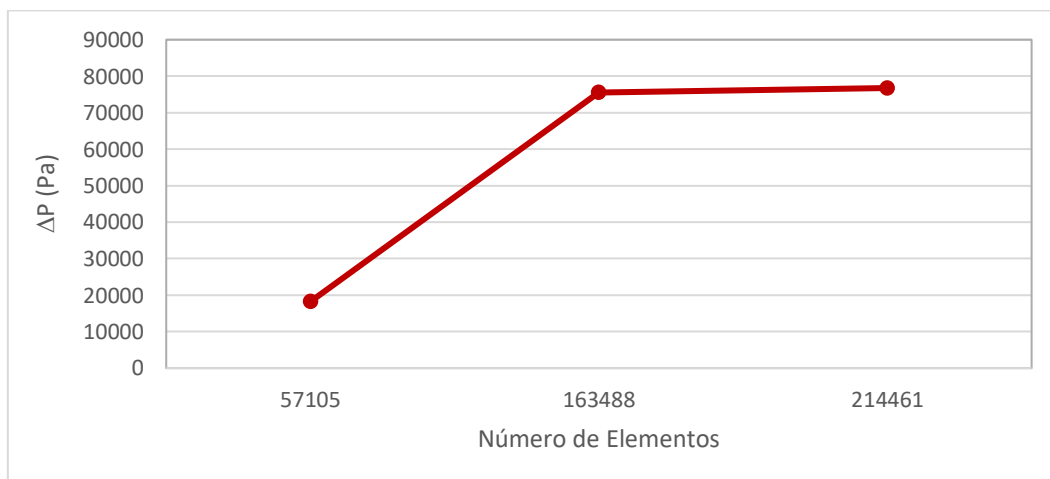


Figura 42 - Perfil da velocidade tangencial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.

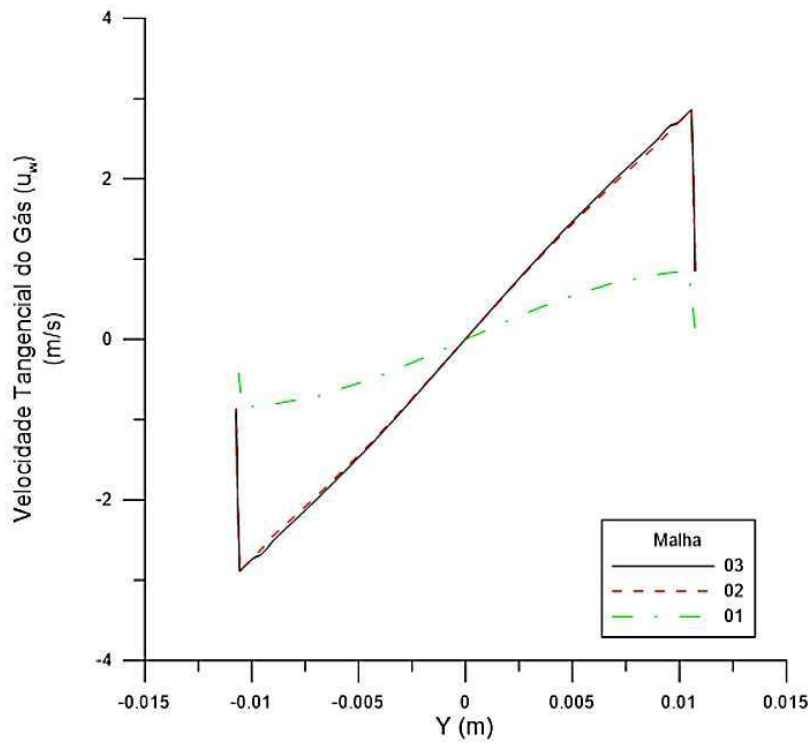
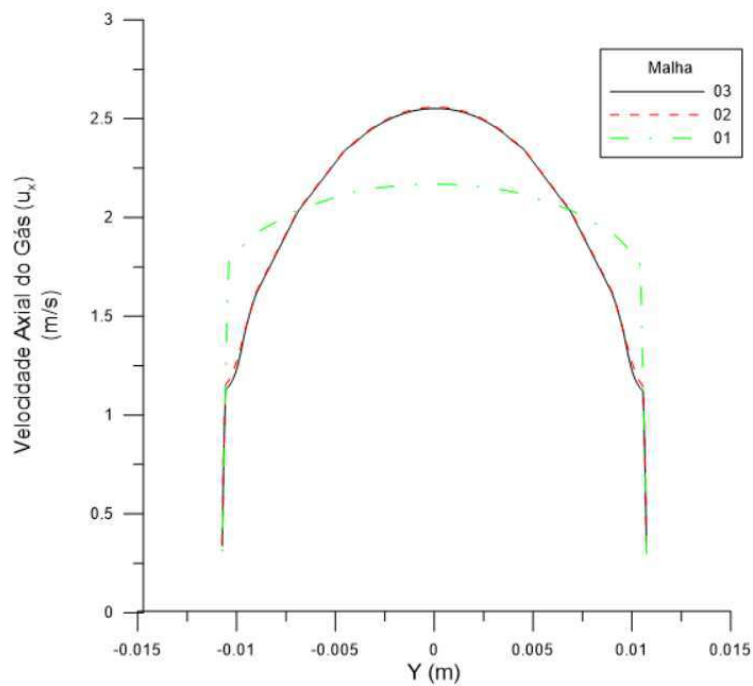


Figura 43 - Perfil da velocidade axial em função da posição radial ( $y$ ), em metros, variando o refinamento das malhas analisadas para a posição axial 03.



## 4.2 Análise do escoamento gás/chumbo no caso 01

Na Figura 44 está representado o perfil de pressão absoluta, em Pascal, em função da posição radial ( $y$ ) em metros. Pode-se observar que a pressão no centro do dispositivo é sempre menor do que nas paredes, independentemente da posição axial (0,15; 0,45; 0,75 m). Isso ocorre devido a atuação das forças centrífugas que impulsionam o gás e as partículas de chumbo entre as paredes aumentando, assim, a força por unidade de área, ou seja, a pressão nas proximidades da parede do separador ciclônico. Percebe-se também que há um estreitamento do perfil em relação a posição axial em consequência do formato cônico do equipamento (o raio diminui desde as entradas em direção as saídas). Outro ponto a ser ressaltado é a redução dos valores da pressão em relação a posição axial, esse efeito é decorrente da perda de carga, um assunto de grande importância para o cálculo da quantidade de energia de bombeamento na entrada do separador. Comportamento semelhante ao descrito foi igualmente observado por Ramirez (2009), Barbosa (2011) e Soares (2013), Luna (2014).

A distribuição da fração volumétrica do gás (a) e das partículas de chumbo (b) em função da posição radial, em metros, é representada na Figura 45. Nota-se que há um estreitamento e formação de um núcleo de gás no centro do separador desde as entradas em direção as saídas (variação da posição axial). Comportamento semelhante foi igualmente observado por Silva (2013). Enquanto as partículas de chumbo se mantêm nas proximidades das paredes.

Nas Figuras 46 e 47 tem-se a velocidade axial do gás e das partículas de chumbo, respectivamente. A velocidade axial é a responsável pelo transporte do fluido, no sentido axial do separador. Observa-se que a velocidade aumenta com a posição axial de 0,15 a 0,75 m em decorrência da redução do raio, pois a área diminui, mas a vazão permanece a mesma, logo a velocidade deve aumentar para que a mesma quantidade de fluido passe no mesmo tempo. Nas proximidades das paredes, a velocidade tende à zero, conforme condicionado inicialmente. Pode-se notar que as maiores velocidades se encontram no centro do separador, no caso do gás, e mais distantes do centro, no caso das partículas de chumbo.

As velocidades tangenciais do gás e das partículas de chumbo estão representadas nas Figuras 48 e 49, respectivamente. A velocidade tangencial é responsável pela

intensidade do campo centrífugo, necessário para a formação do comportamento giratório que faz a separação por densidade. Pode-se notar que a velocidade tangencial das partículas de chumbo é maior quando se aproxima das paredes, isso demonstra onde está o movimento helicoidal das partículas. O comportamento da velocidade tangencial encontrado nesse caso é semelhante ao encontrado por Wang *et al.* (2006), Barbosa (2011) e Silva (2013).

Nota-se que a velocidade tangencial reduz da entrada em direção às saídas do separador, diferente do que ocorre com a velocidade axial, isso mostra que o movimento helicoidal é reduzido, ou seja, na entrada o movimento helicoidal é maior que nas saídas. Isso ocorre devido a disputa entre o momento angular e o momento axial, denotando uma propensão do momento axial predominar sobre o momento tangencial, o que justifica a redução da intensidade turbilhonar. Comportamento semelhante é relatado na literatura por Silva (2013) e Zimmermann (2015).

Figura 44 – Perfil de pressão absoluta utilizando o separador ciclônico aplicado ao caso 01.

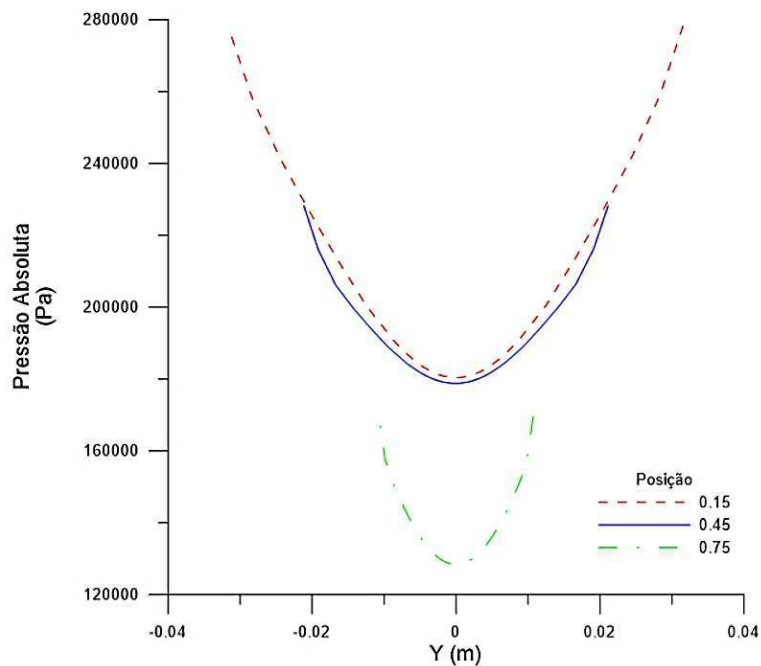




Figura 45 – Perfil de fração volumétrica (a) de gás e (b) das partículas de chumbo no separador ciclônico aplicado ao caso 01.

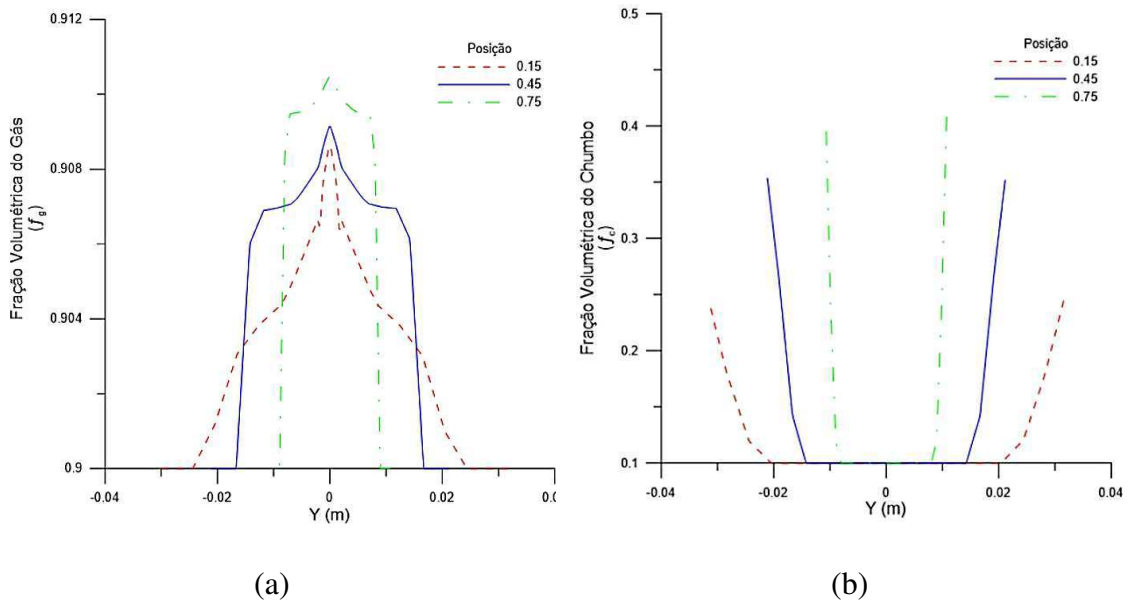


Figura 46 – Perfil de velocidade axial do gás no separador ciclônico aplicado ao caso 01.

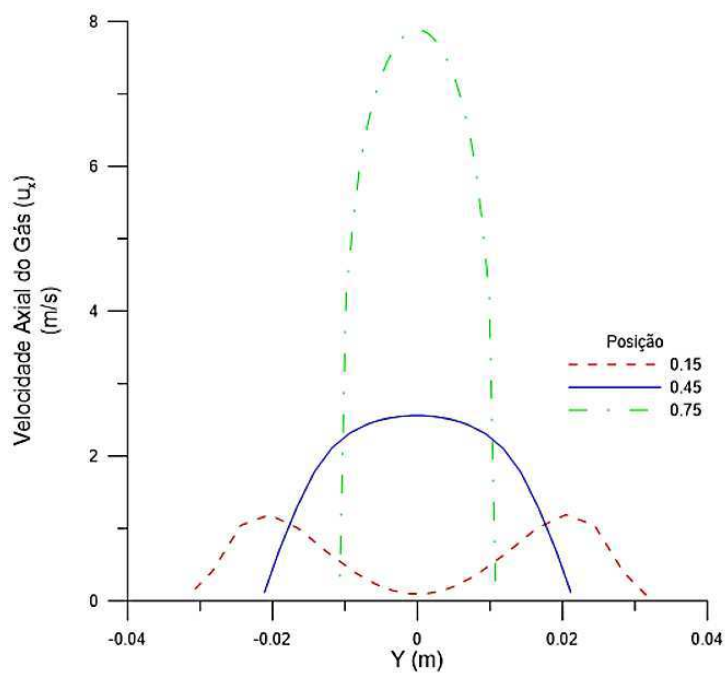


Figura 47 - Perfil de velocidade axial das partículas de chumbo no separador ciclônico aplicado ao caso 01.

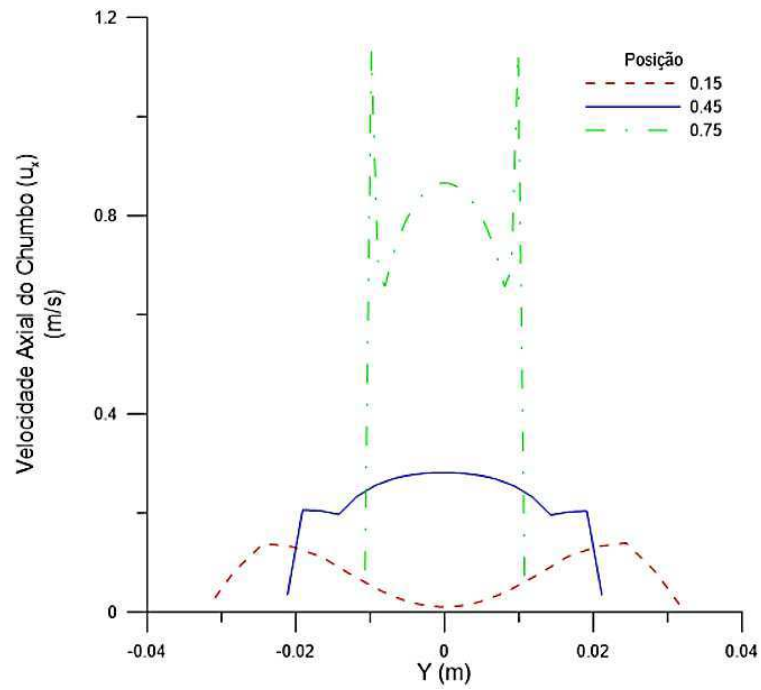


Figura 48 – Perfil de velocidade tangencial do gás no separador ciclônico aplicado ao caso 01.

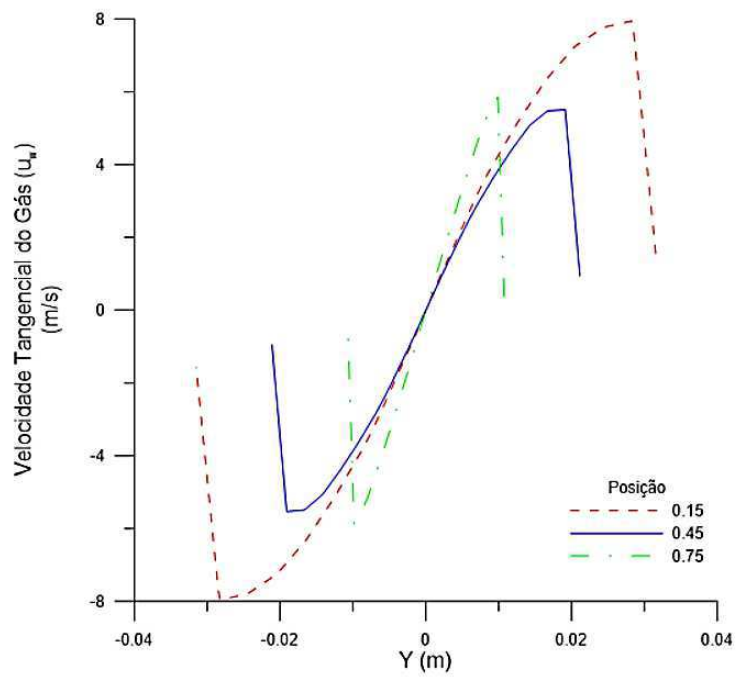
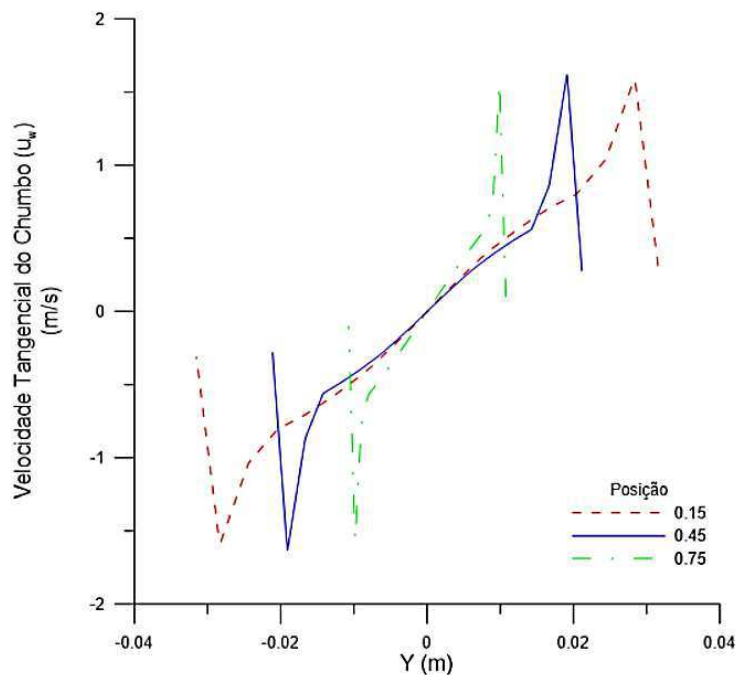


Figura 49 - Perfil de velocidade tangencial do chumbo no separador ciclônico aplicado ao caso 01.



#### 4.3 Variação da velocidade de entrada

Na Tabela 10 são apresentados os valores da eficiência de separação das partículas de chumbo em função das velocidades iniciais e do número de Reynolds. Observa-se que a melhor eficiência de separação (98,20%) corresponde ao caso 3 com velocidade de 10 m/s.

Para o cálculo do número de Reynolds foi utilizada a Equação (A-9) (maiores informações são apresentadas no Apêndice A) substituindo os valores da vazão mássica referente a cada uma das velocidades na seção de entrada adotadas como condição de contorno.

$$Re = \frac{4\dot{w}}{\mu\pi d_c} \quad (A-9)$$

Na Figura 50 observa-se o perfil de pressão, em Pascal, em função da posição radial ( $Y$ ), em metros, referente a posição axial 03 (0,75 m). Observa-se que a variação da velocidade de entrada tem grande influência no campo da pressão, nota-

se a proporcionalidade entre elas, quanto mais se aumenta a velocidade, mais cresce a pressão. Ressalta-se também que a diferença de pressão entre a parede e o centro do separador é maior com o aumento da velocidade.

Tabela 10 – Identificação dos casos estudados com variação na velocidade de entrada.

Caso	Velocidade Inicial (m/s)	Eficiência Chumbo (%)	Número de Reynolds
1	5	95,26	2648
2	8	95,61	4237
3	10	98,20	5297
4	12	96,97	6356
5	15	97,68	7945

Na Figura 51 tem-se o perfil da fração volumétrica do (a) gás e das (b) partículas de chumbo em função da posição radial (Y), em metros. Observa-se que a partir da velocidade inicial de 8 m/s o núcleo de gás se modifica e tem um estreitamento na ponta e isso reflete na tendência da saída do núcleo de gás formado na região de central do separador e de sair através da saída tubular (Figura 7). Pode-se notar que a velocidade de entrada não apresenta grandes alterações na fração volumétrica, isso é interessante porque pode-se optar pelo uso de baixas velocidades, ou seja, economia no que diz respeito ao bombeamento da mistura.

Na Figura 52 estão representados os perfis das velocidades axiais do gás e na Figura 53, as velocidades axiais das partículas de chumbo. Ambas variam na posição radial (Y), em metros e estão representando a posição axial 03 (0,75 m). Verifica-se que o aumento da velocidade inicial aumenta a velocidade axial consideravelmente, e que isso ocorre de maneira bem mais sensível para o gás.

Nas Figuras 54 e 55 são representados os perfis de velocidade tangencial do gás e das partículas de chumbo, respectivamente, em função da posição radial. O aumento da velocidade inicial também aumenta a velocidade tangencial, porém de uma maneira bem menos evidente do que a axial. Este fato é explicado devido as perdas de quantidade de movimento reduzindo as grandezas das velocidades tangenciais.

Figura 50 – Perfil de pressão em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).

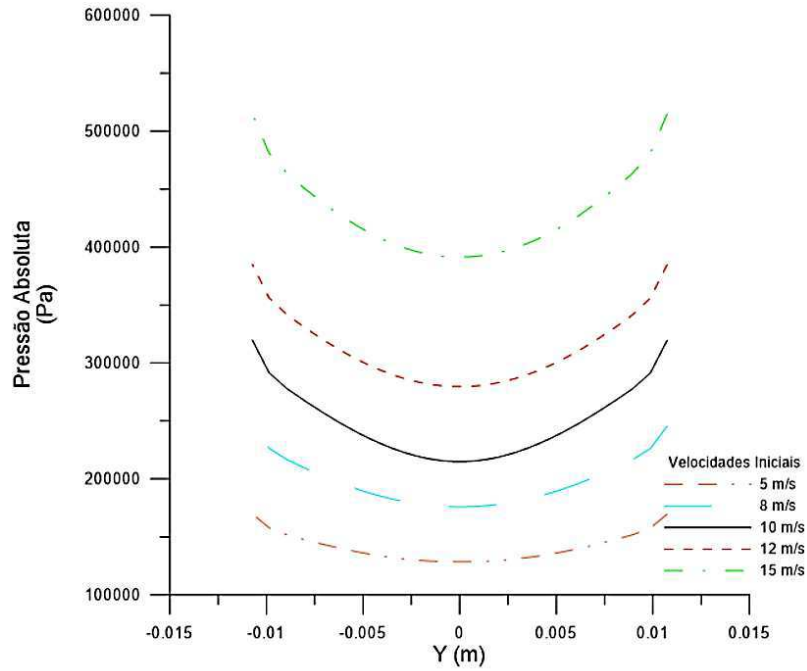


Figura 51 – Perfil da fração volumétrica (a) do gás e (b) das partículas de chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).

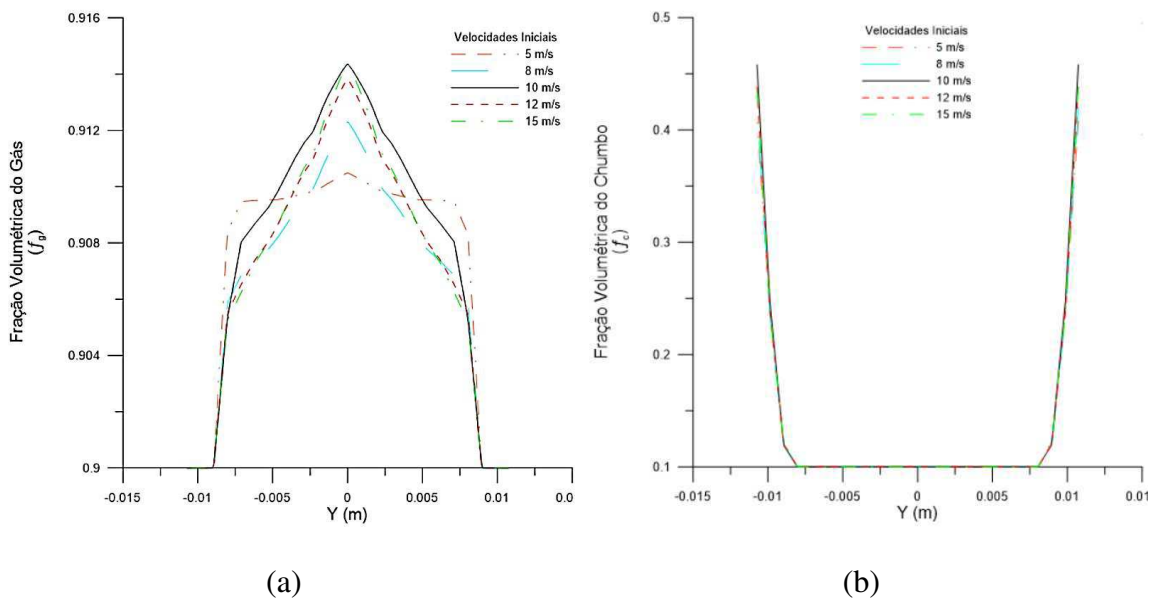


Figura 52 – Perfil de velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).

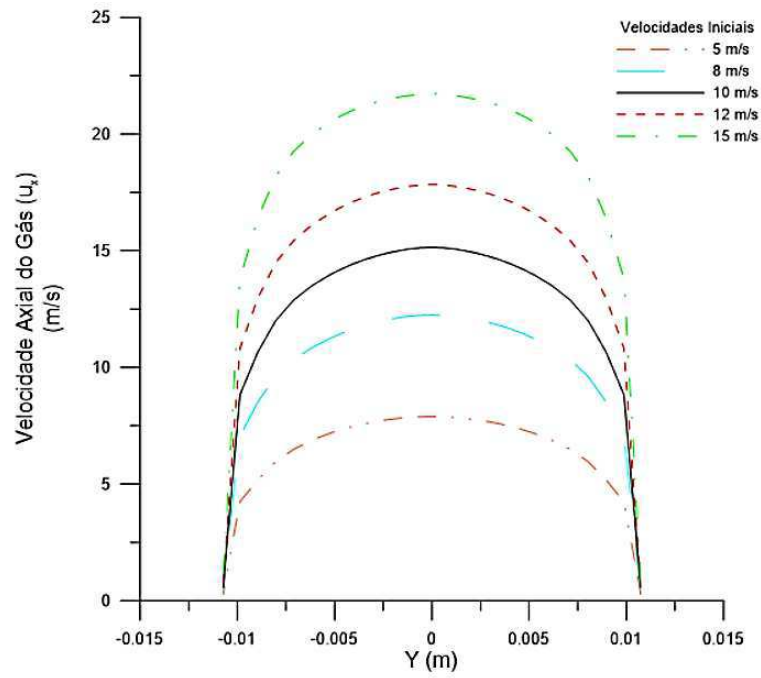


Figura 53 - Perfil de velocidade axial do chumbo, em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).

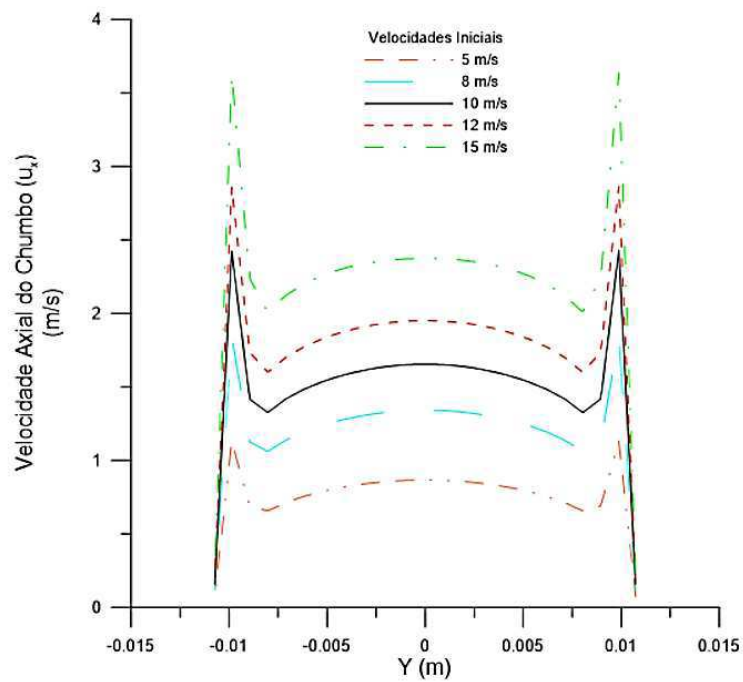


Figura 54 - Perfil de velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito das velocidades de entrada na posição axial 03 (0,75m).

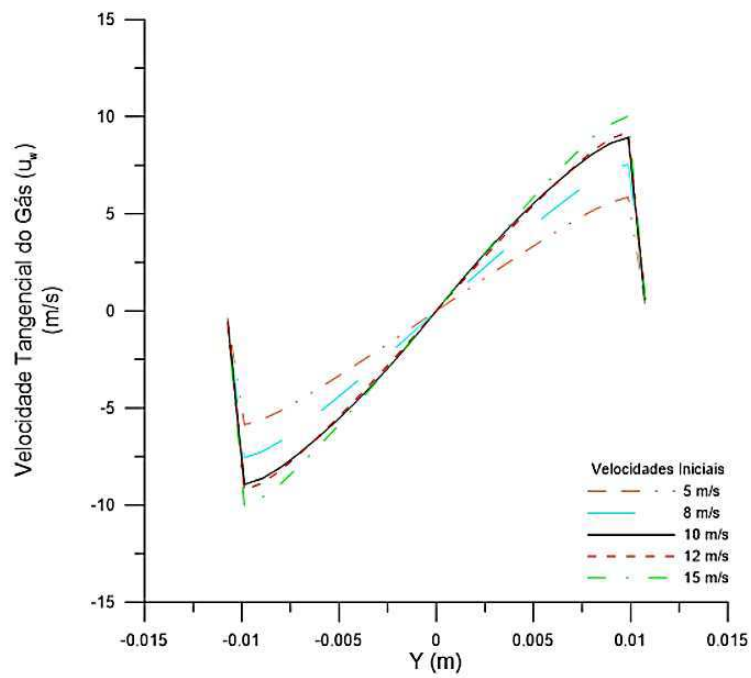
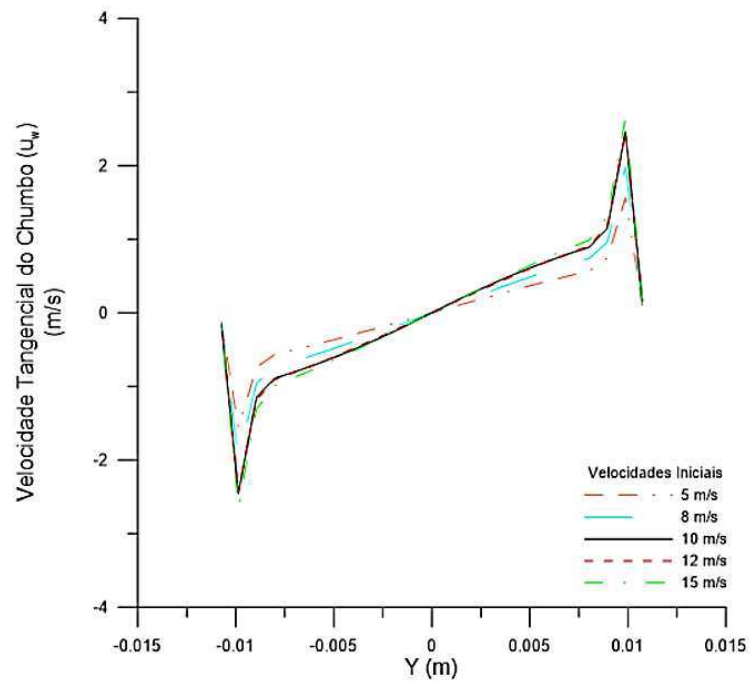


Figura 55 - Perfil de velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial para avaliação das diferentes velocidades de entrada na posição axial 03.



#### 4.4 Variação da fração volumétrica

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da eficiência de separação em função da concentração de partículas de chumbo na seção de entrada ( $f_c$ ). Observa-se que a melhor eficiência de separação de chumbo (95,26%) é para o caso 1 com a menor fração volumétrica das partículas de chumbo. Comportamento semelhante é reportado por Svarovisky, (*apud* Gonçalves 2016) que relata que uma alimentação diluída é preferida quando se busca alta recuperação de sólidos. Esse fato pode, por exemplo, ser explicado pela menor quantidade de partículas em seu interior o que proporciona menos choques entre as partículas e partículas-paredes do separador.

Tabela 11 - Identificação dos casos estudados com variação na fração volumétrica.

Caso	Fração Volumétrica de Chumbo ( $f_c$ )	Eficiência Chumbo (%)
1	0,1	95,26
6	0,3	75,17
7	0,5	68,18

Na Figura 56 tem-se o perfil de pressão, em Pascal, variando em relação a posição radial (Y), em metros. Observa-se que com o aumento da fração volumétrica das partículas de chumbo, a diferença de pressão entre as paredes e o centro do separador aumenta consideravelmente, em consequência do aumento da concentração das partículas em proximidades da parede no separador ciclônico (Figura 57).

Nas Figuras 58 e 59 são mostradas as velocidades axiais de gás e das partículas de chumbo, respectivamente, em função da posição radial (Y), em metros. Percebe-se que quanto maior é o aumento da fração volumétrica das partículas de chumbo, maior é o valor da velocidade axial das partículas de chumbo alcançado na posição 03 (0,75 m). Por outro lado, é notável a relação inversa com a velocidade do gás. Esses resultados indicam a influência da concentração de partículas na dinâmica de escoamento no interior do separador ciclônico. Comportamento semelhante foi observado por Barbosa (2011). Desempenho análogo pode ser observado nos perfis de velocidades tangenciais do gás e das partículas de chumbo ilustrados, respectivamente, nas Figuras 60 e 61.



Figura 56 - Perfil de pressão, em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).

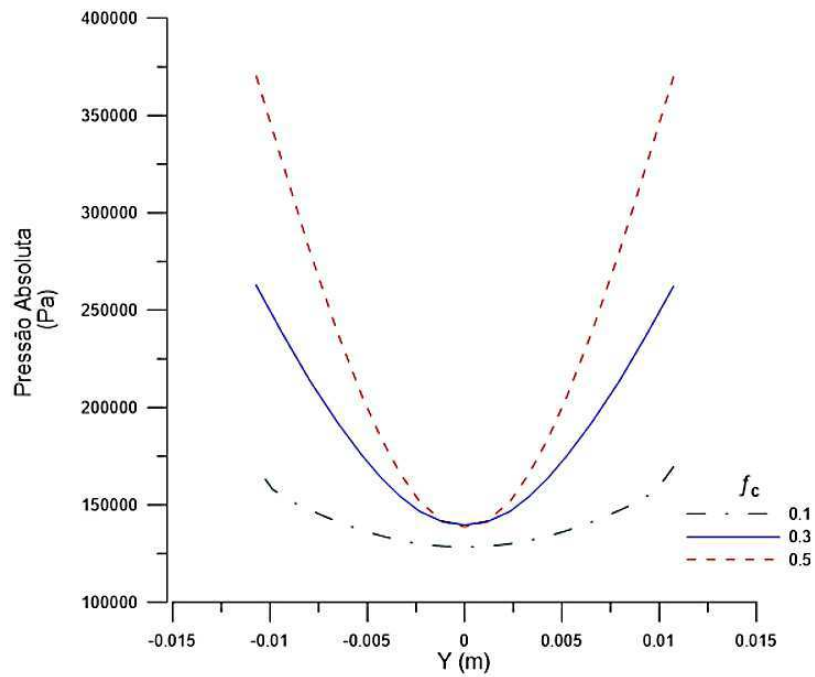


Figura 57 - Perfil da fração volumétrica do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).

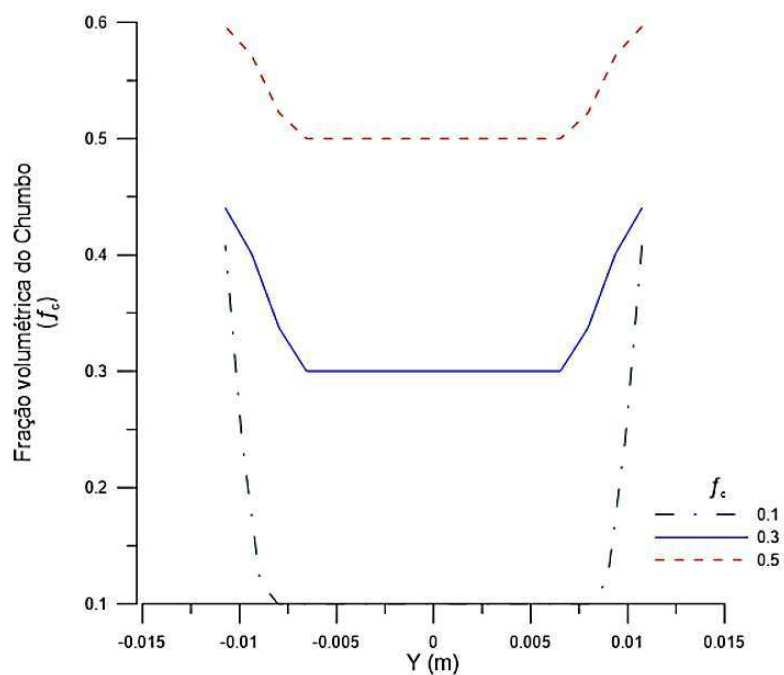


Figura 58 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).

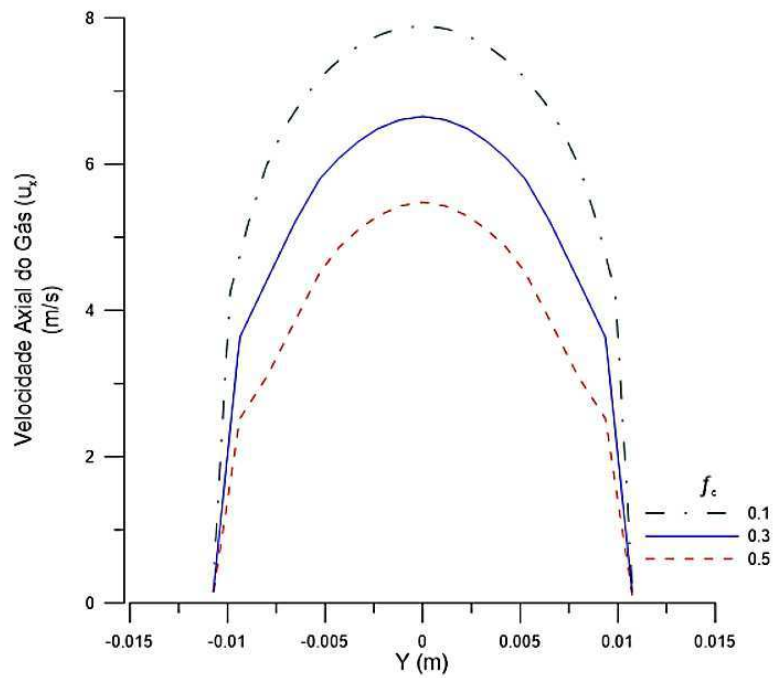


Figura 59 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).

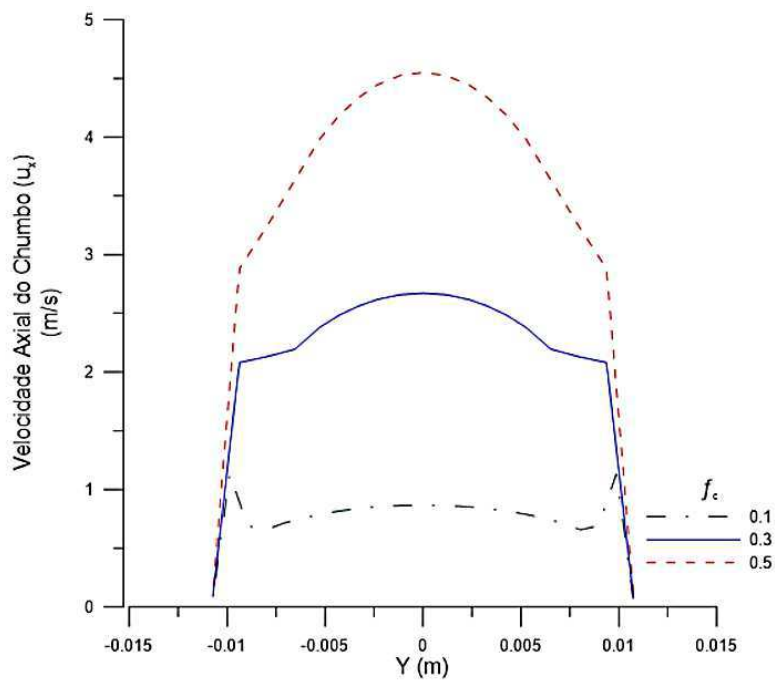


Figura 60 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).

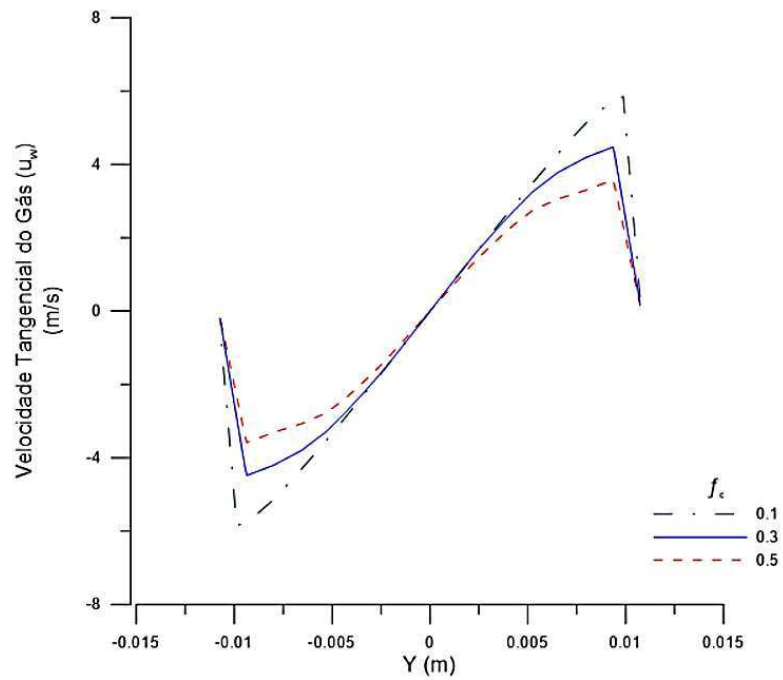
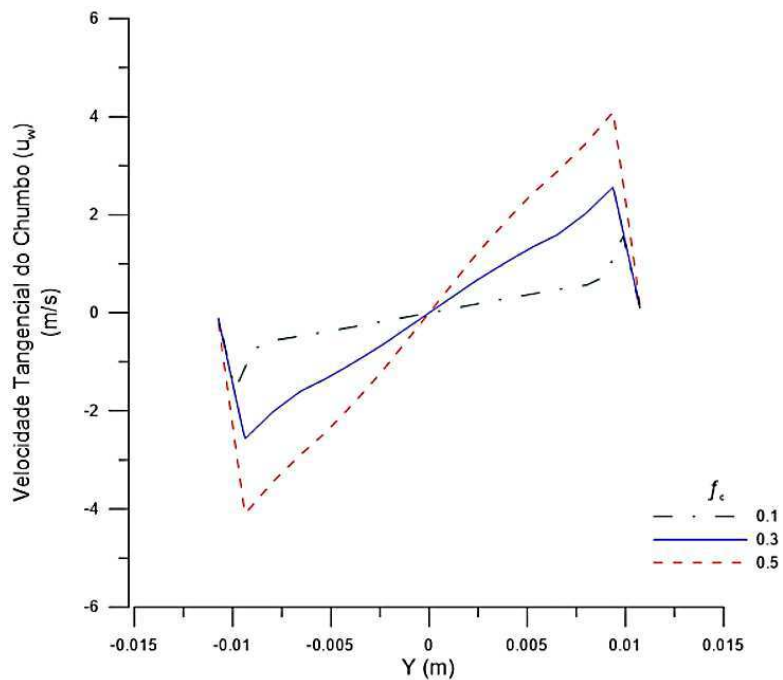


Figura 61 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes valores de fração volumétrica na posição axial 03 (0,75 m).



#### 4.5 Variação do diâmetro médio das partículas de chumbo

Na Tabela 12 são apresentados os casos 1 e 8, referentes a mudança de diâmetro da partícula,  $d_p$ . Observa-se que a melhor eficiência de separação de partículas de chumbo (99,97%) é obtida para partículas de diâmetro maior, em virtude do aumento de massa da partícula e conseqüentemente seu peso, área e volume, fazendo com que as forças centrífugas e peso atuem sobre ela com maior intensidade, o que favorece a sua separação no separador ciclônico. Comportamento semelhante é reportado na literatura (Farias *et al.*, 2009).

Tabela 12 – Eficiência de separação das partículas de chumbo e diâmetro médio das partículas.

Caso	Diâmetro Médio das Partículas $d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Eficiência Chumbo (%)
1	0,5	95,26
8	5	99,97

Na Figura 62 tem-se a pressão absoluta, em Pascal, em função da posição radial (Y), em metros. Pode-se observar que o comportamento do gradiente de pressão a partir das paredes em direção ao centro do separador são diferentes para os dois diâmetros das partículas avaliadas. Para a partícula de 5  $\mu\text{m}$  torna-se praticamente constante, visto que a força peso sobre elas é mais importante do que para as partículas de 0,5  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 63 é apresentado o perfil da fração volumétrica do gás (a) e das (b) partículas de chumbo em função da posição radial (Y), em metros. Com o diâmetro médio de 5  $\mu\text{m}$  pode-se observar que o núcleo de gás começa a se formar mais próximo ao centro, e as partículas de chumbo se concentram nas proximidades das paredes. Comportamento semelhante foi observado por Balestrin *et al.* (2014). Quanto as partículas de diâmetro médio de 0,5  $\mu\text{m}$ , quando comparadas as de 5  $\mu\text{m}$  nota-se que o núcleo de gás apresenta uma distribuição praticamente constante aproximadamente de 0,9%.

Na Figura 64 e 65 são representados os perfis das velocidades axiais de gás e de partículas de chumbo, respectivamente, em função da posição radial (Y), em metros. Percebe-se que as partículas com diâmetro médio de 0,5  $\mu\text{m}$  conseguem alcançar velocidades axiais maiores. O mesmo efeito pode ser observado, ainda mais notável, nas Figuras 66 e 67 que apresentam as velocidades tangenciais do gás e das partículas de chumbo, respectivamente. Isso ocorre porque partículas com diâmetro maior são mais pesadas e tendem a serem conduzidas em direção a saída mais rapidamente. No entanto, as partículas mais leves são arrastadas pelas forças centrífugas e arraste, as mantendo em um movimento helicoidal até saírem do separador ciclônico.

Figura 62 - Perfil de pressão em função da posição radial para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).

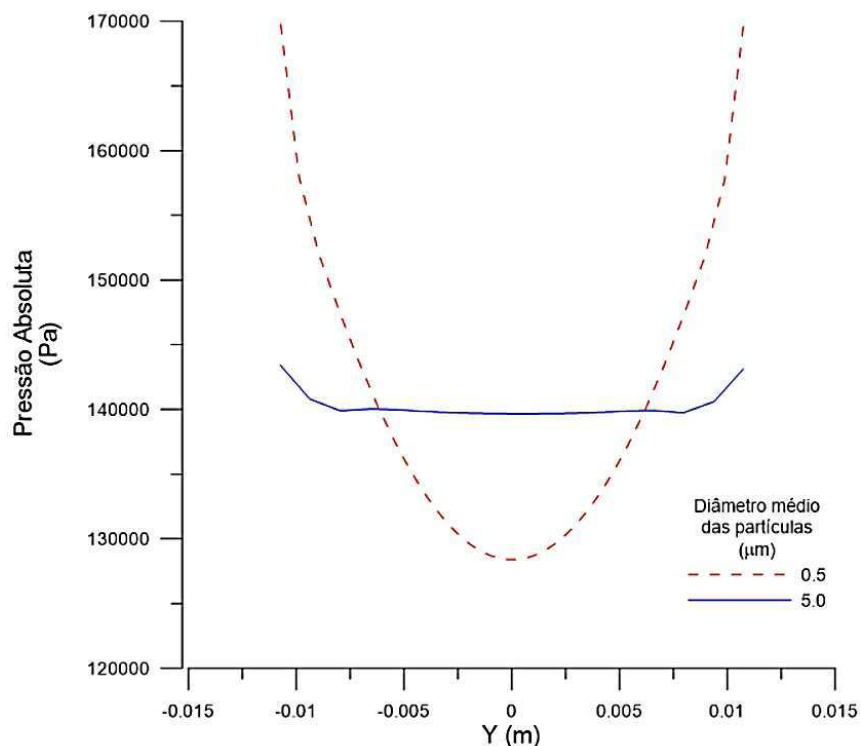


Figura 63 - Perfil da fração volumétrica do gás (a) e partículas de chumbo (b) em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).

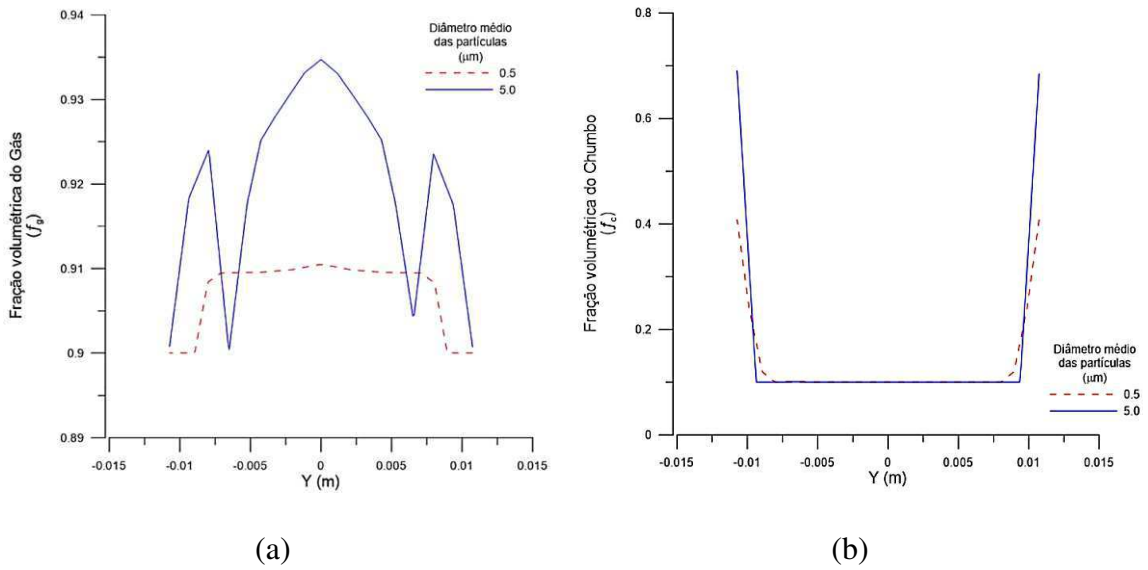


Figura 64 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).

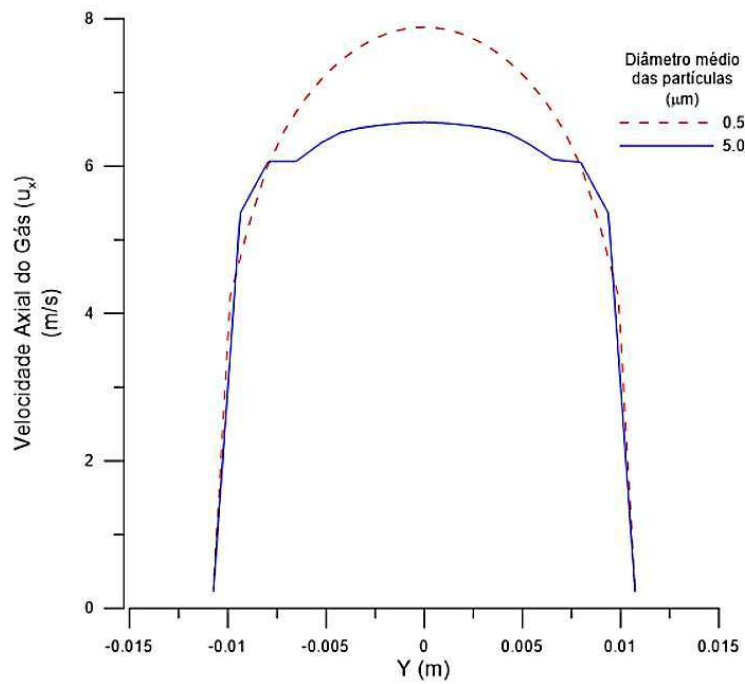


Figura 65 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).

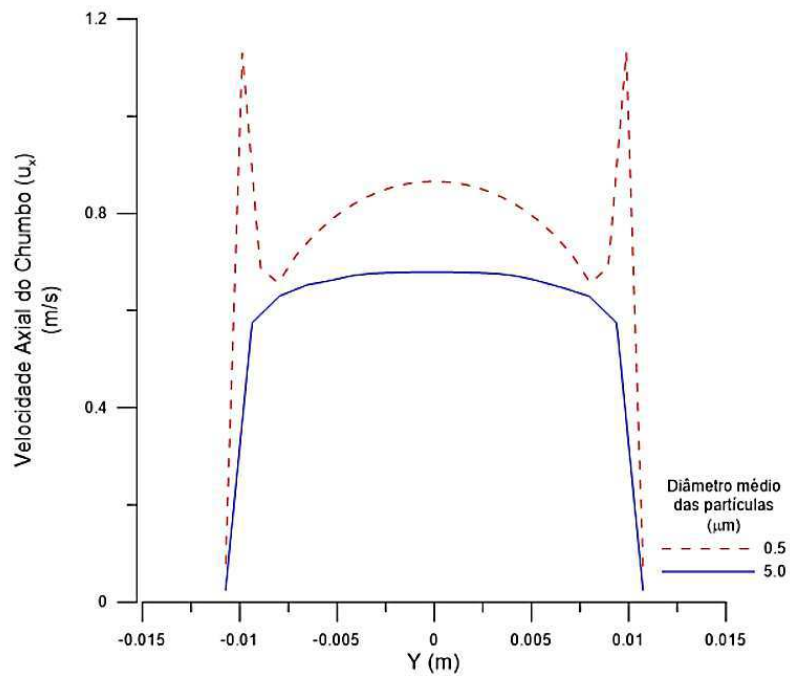


Figura 66 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).

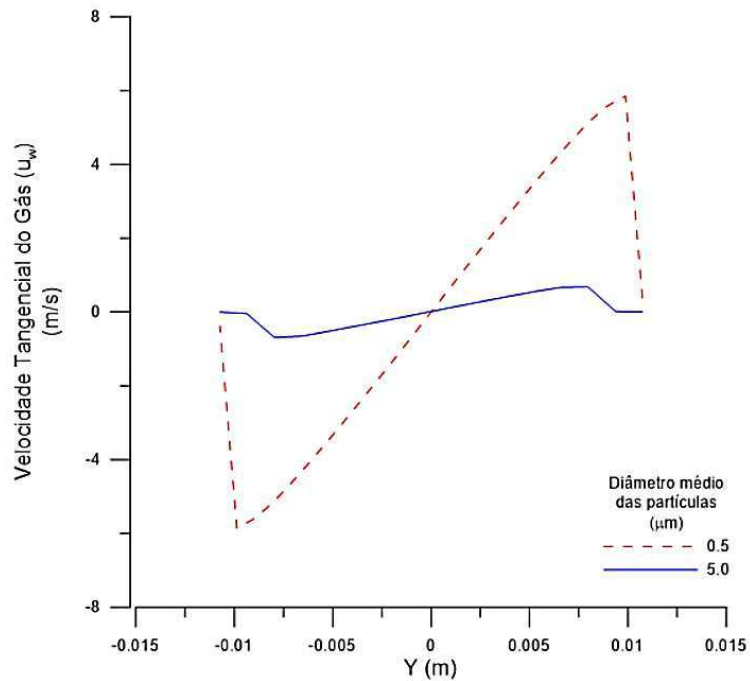
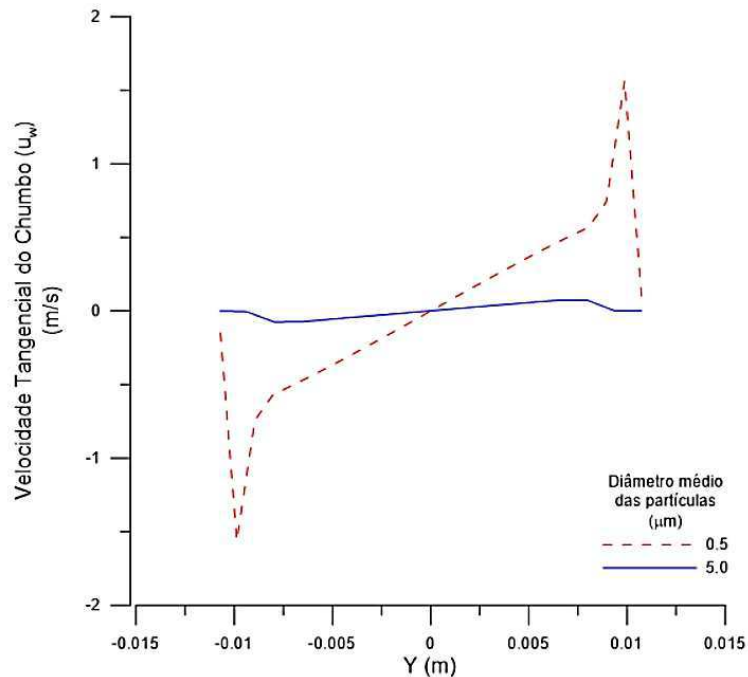


Figura 67 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes diâmetros das partículas na posição axial 03 (0,75 m).



#### 4.6 Comparação entre as geometrias de diferentes troncos cônicos

Na Tabela 13 são apresentados os valores da eficiência de separação das partículas de chumbo para o separador ciclônico com três tamanhos de tronco cônico. Observa-se que a melhor eficiência de chumbo (95,26%) foi obtido ao usar o tronco cônico de 75 mm, caso 1. O que pode explicar esta observação é a redução das zonas de recirculação e de mistura nas vizinhanças do tronco cônico, comportamento semelhante foi observado por Zimmermann (2014) ao estudar a separação gás-líquido.

Tabela 13 - Identificação dos casos estudados com variação na altura do tronco cônico.

Caso	Tronco Cônico (mm)	Eficiência Chumbo (%)
1	75	95,26
9	100	73,79
10	50	89,75



Na Figura 68 são representados os campos de pressão para os três tamanhos de tronco cônicos avaliados, com 50, 75 e 100 mm sobre o plano XY. Observa-se de maneira geral, que o gradiente de pressão aumenta do centro em direção as paredes cilíndricas e cônicas, sendo mais proeminente para o tronco cônico de 75 mm. O comportamento observado nos campos de pressão do separador ciclônico é bastante similar aos ciclones tradicionais (Martignoni (2007), Carvalho (2008), Barbosa (2011), Alves (2012), Juengcharoensukying (2017)).

O comportamento do gradiente de pressão na presença do tronco cônico de 75 mm assegura a formação de um núcleo de gás na região central, como se observa na Figura 69, onde estão representados os campos de fração volumétrica de gás sobre o plano longitudinal XY. Na Figura 70 estão representados os perfis da fração volumétrica do (a) gás e das (b) partículas de chumbo na posição 03 (0,75 m). Pode-se notar que no tronco cônico de 100 mm as partículas estão mais espalhadas e quase não há formação de núcleo de gás, enquanto no tronco cônico de 50 mm há uma tendência de concentração dos gases na região central.

Na Figura 71 são apresentados os campos de velocidade axial do gás e na Figura 73 das partículas de chumbo, para os três tamanhos de tronco cônico. Na Figura 72 e 74 são representados os perfis de velocidade axial do gás e do chumbo, respectivamente, em função da posição radial (Y), em metros. Nota-se que a variação da altura do tronco cônico não apresenta grandes alterações nas velocidades axiais, porém as maiores velocidades são alcançadas pelo tronco cônico de 75 mm e as menores pelo de 100 mm.

Na Figura 75 são apresentados os campos de velocidade tangencial do gás e na Figura 77 do chumbo, para os três tamanhos de tronco cônico. Na Figura 76 e 78 são representados os perfis de velocidade tangencial do gás e do chumbo, respectivamente, em função da posição radial (Y), em metros. Observa-se que as velocidades tangenciais sofrem maior influência sobre a mudança na altura do tronco cônico. Nota-se que o separador com tronco cônico de 75 mm é o que apresenta as maiores velocidades tangenciais.

Figura 68 – Campos de pressão nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm.

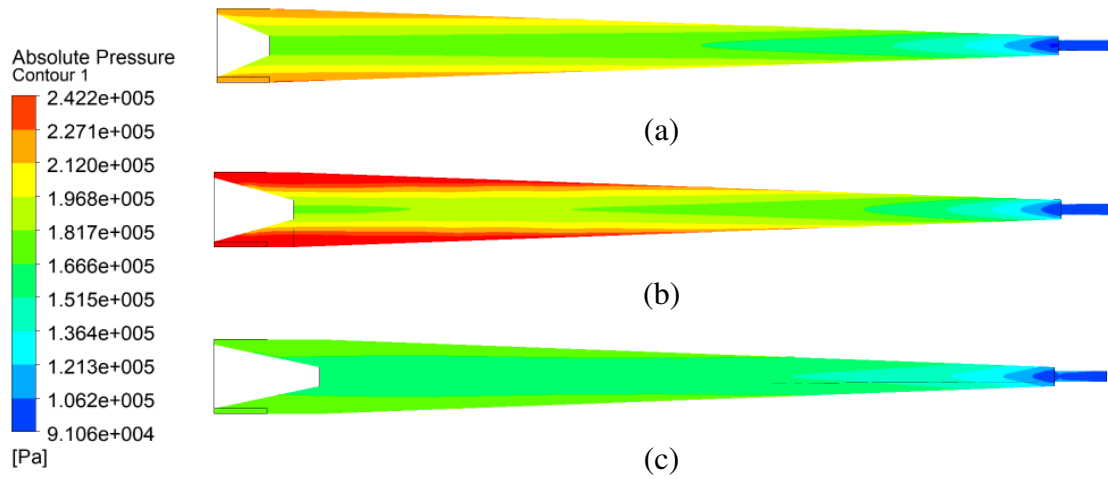


Figura 69 – Campos da fração volumétrica de gás nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm.

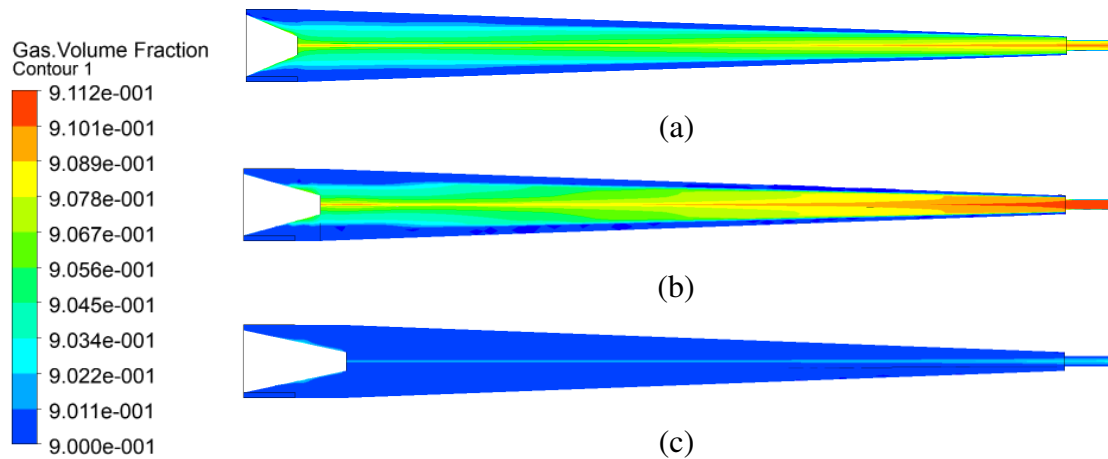


Figura 70 - Perfil da fração volumétrica (a) do gás e (b) das partículas de chumbo em função da posição radial (Y), em metros, para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m).

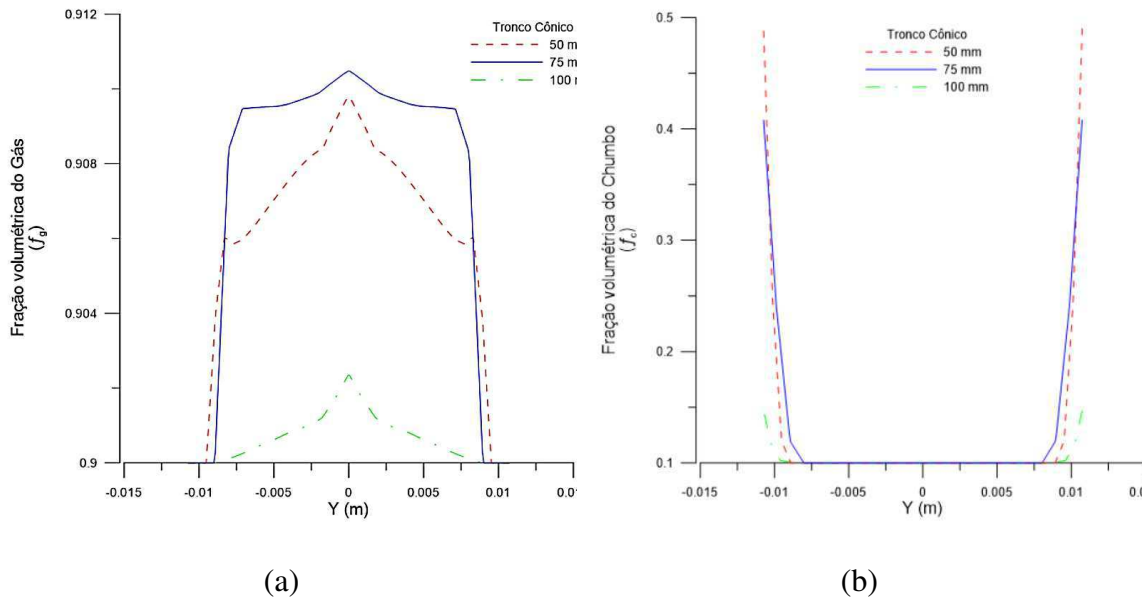


Figura 71 - Campos de velocidade axial do gás nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm.

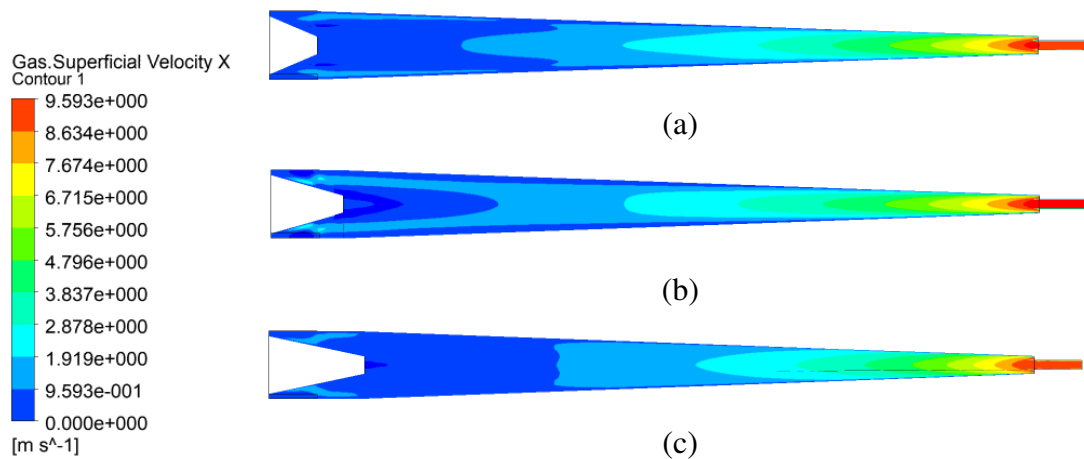


Figura 72 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m).

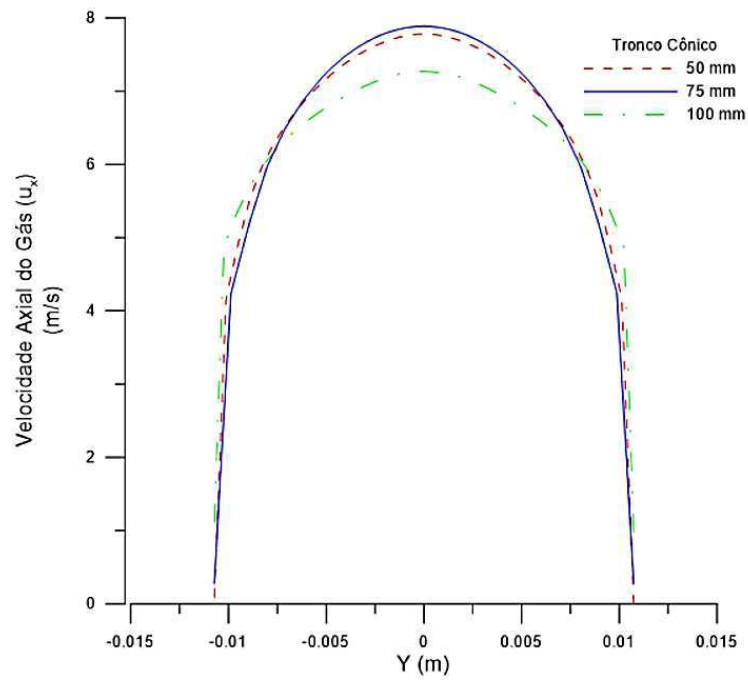


Figura 73 - Campos de velocidade axial do chumbo nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm.

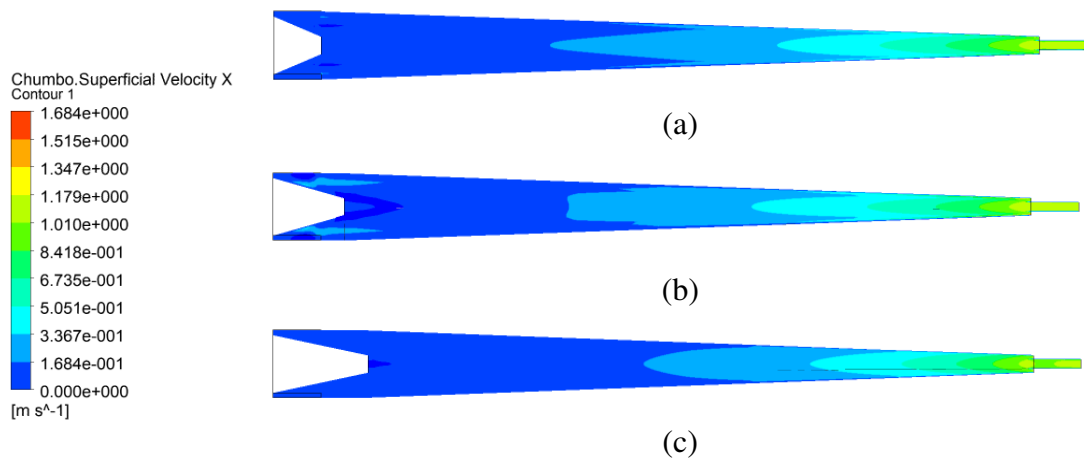


Figura 74 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m).

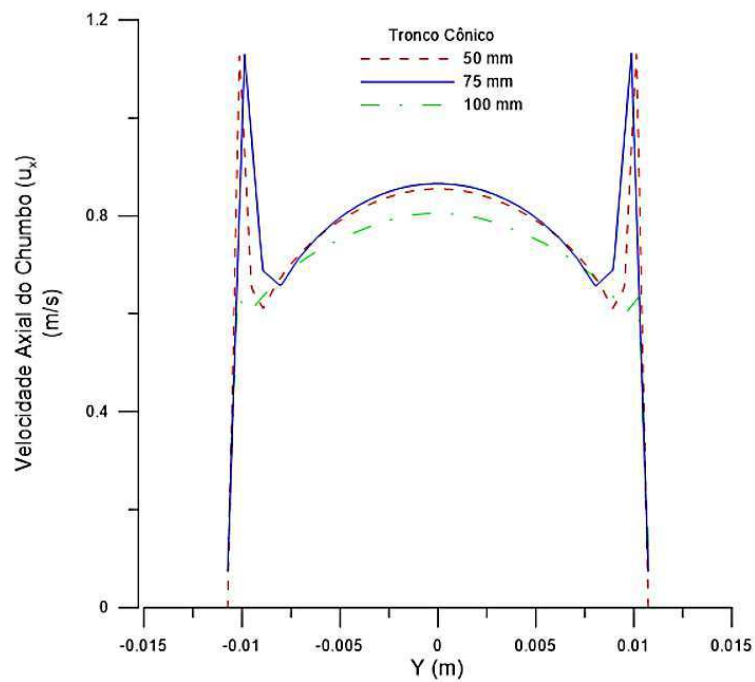


Figura 75 - Campos de velocidade tangencial do gás nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm.

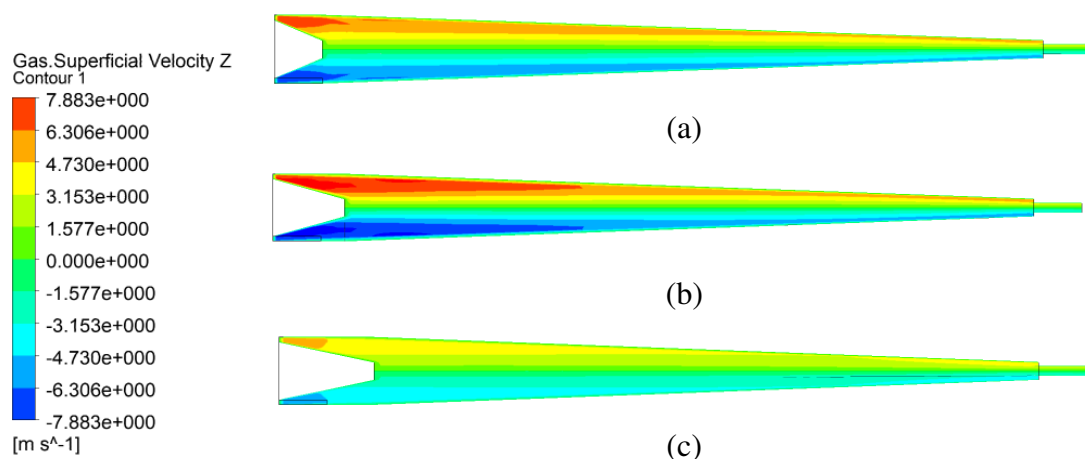


Figura 76 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m).

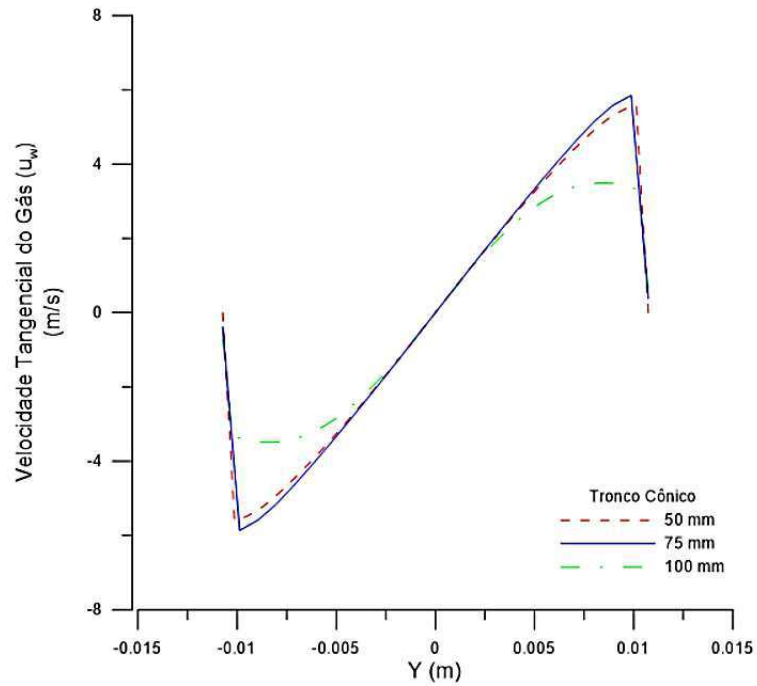


Figura 77 - Campos de velocidade tangencial do chumbo nas malhas de tronco cônico de (a) 50 mm, (b) 75 mm e (c) 100 mm.

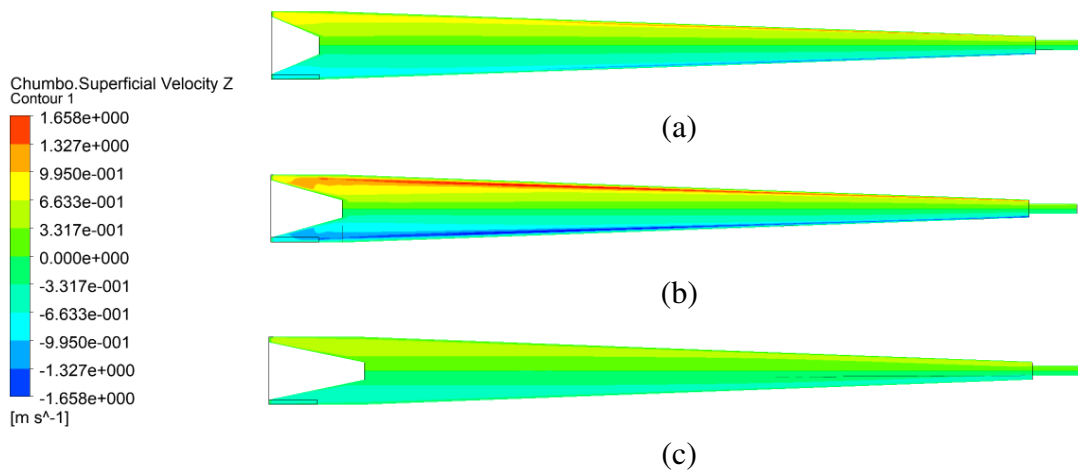
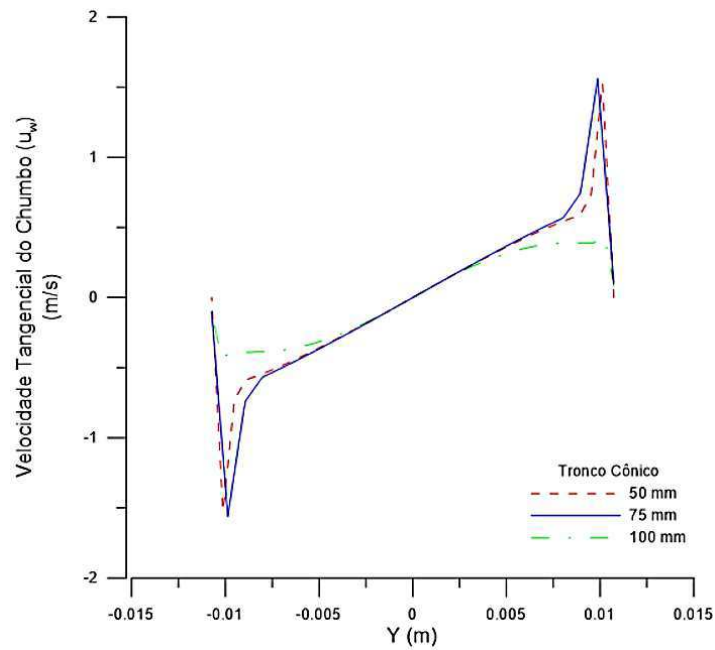


Figura 78 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para avaliação do efeito dos diferentes troncos cônicos na posição axial 03 (0,75 m).



#### 4.7 Comparação entre as geometrias de diferentes saídas

Na Tabela 14 são apresentados os valores das eficiências de separação das partículas de chumbo para as diferentes formas geométricas das saídas do separador (Figura 15). Observa-se que a melhor eficiência de chumbo (95,36%) se refere ao caso 11 com a adição do tubo interno de 25 mm.

Tabela 14 - Identificação dos casos estudados com variação nas saídas da geometria.

Caso	Tipo de Saída	Eficiência Chumbo (%)
1	Saída comum	95,26
11	Saída comum com adição do tubo interno de 25 mm	95,36
12	Saída modificada para boca de sino com tubo interno de 25 mm	73,95
13	Saída modificada para boca losango com tubo interno de 25 mm	90,10

Na Figura 79 são representados os campos de pressão para os quatro tipos de saída avaliados sobre o plano longitudinal XY. Observa-se que as maiores pressões são encontradas nas proximidades das paredes cilíndrica e cônica, e mais proeminentes para a geometria com saída comum com e sem tubo interno (Figura 79 (a) e (b), respectivamente). Por outro lado, ao usar a saída boca losango (Figura 79 (d)) apresenta menores pressões sobre as paredes, mas assegura uma eficiência de separação de chumbo na ordem de 90%. Esse fato pode indicar que a parede desse separador sofre menores tensões.

Na Figura 80 tem-se os campos de fração volumétrica das partículas de chumbo para os quatro tipos de saída avaliados sobre o plano longitudinal XY. Observa-se que próximo as entradas, a concentração de chumbo próxima as paredes é maior no separador com saída boca de sino, porém quando se aproximam das saídas, isso já não ocorre, a concentração nesse separador reduz e pode-se observar pela eficiência de partículas de chumbo que essa geometria tem o pior resultado da eficiência de chumbo. É provável que a modificação da saída do tipo boca de sino promova uma sucção e arraste tanto gás como partículas de chumbo para a saída tubular. Isso também explicaria o valor da eficiência de gás apresentado na Tabela 16.

Na Figura 81 são apresentados os campos de velocidade axial do gás e na Figura 82 das partículas de chumbo, ambas para os quatro tipos de saída avaliados sobre o plano longitudinal XY. Nota-se que as distribuições das velocidades axiais na saída tubular são mais proeminentes no separador com boca de sino, proporcionando maiores gradientes de velocidade, observados na Figura 81 (c) e 82 (c), o que proporciona um maior empilhamento das frações volumétricas nessa saída e isso justifica a queda da eficiência de separação das partículas de chumbo e aumento da de gás.

Na Figura 83 são apresentados os campos de velocidade tangencial do gás e na Figura 84 das partículas de chumbo, ambas para os quatro tipos de saída avaliados sobre o plano longitudinal XY. Os campos de velocidade tangencial das partículas de chumbo se mostram mais influenciados pela variação das saídas. Observa-se um movimento helicoidal das partículas de chumbo mais intenso nas proximidades das entradas no separador com saída boca de sino.



Figura 79 – Campos de pressão nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.

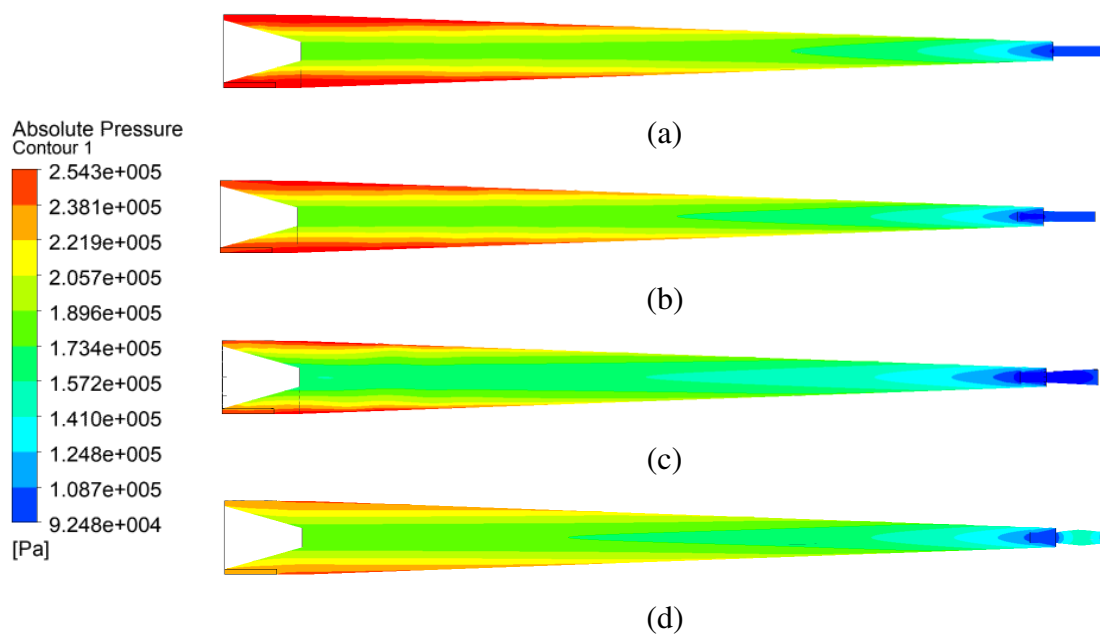


Figura 80 - Campos da fração volumétrica das partículas de chumbo nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.

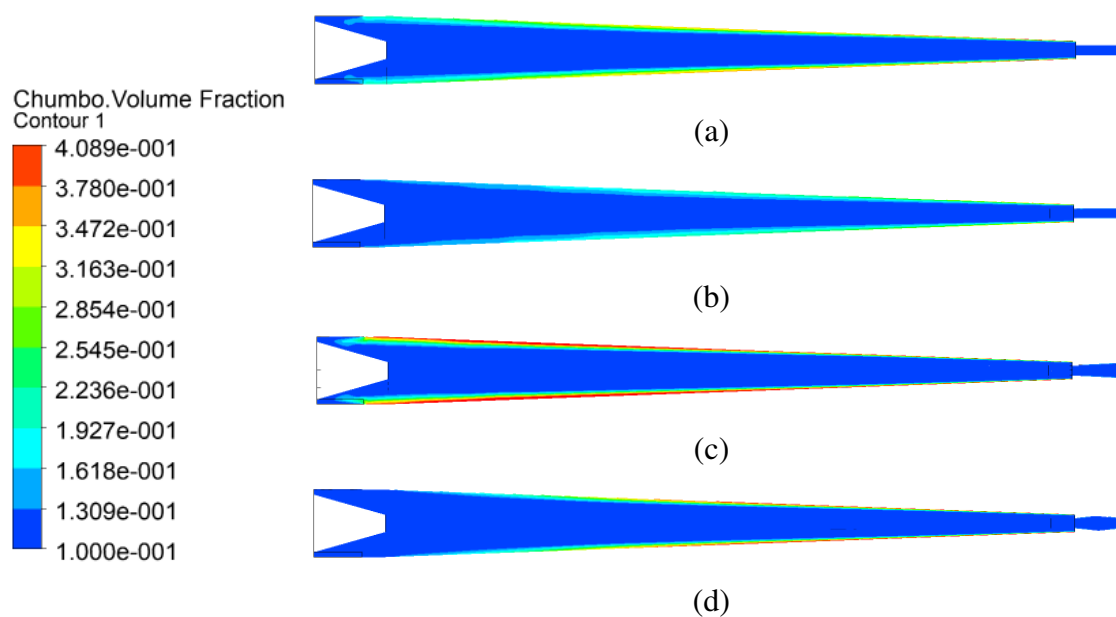


Figura 81 - Campos da velocidade axial do gás nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.

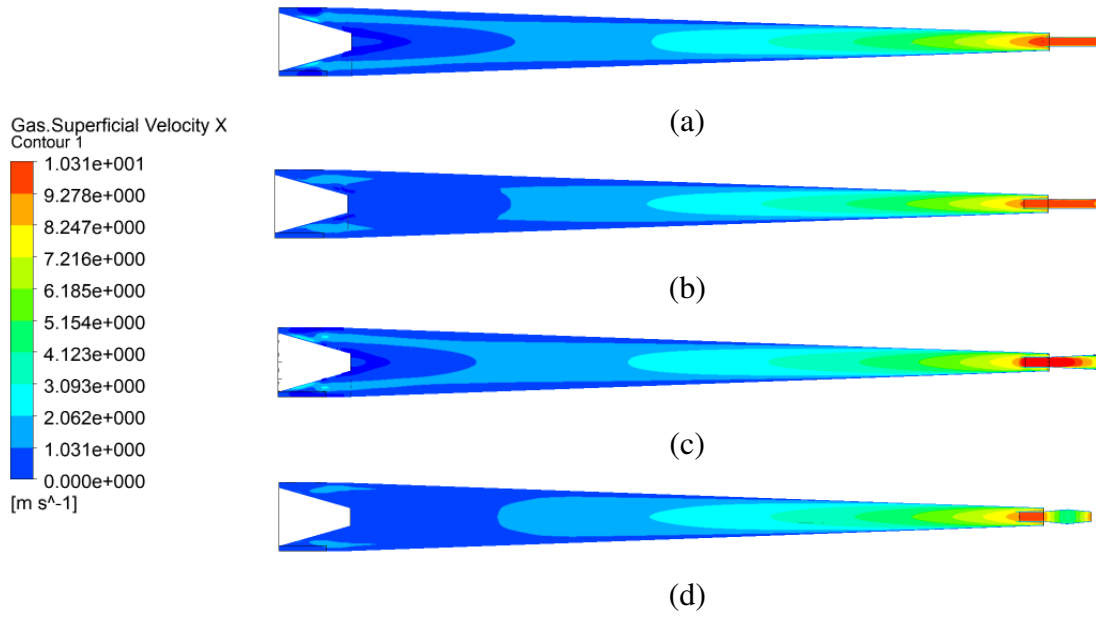


Figura 82 - Campos da velocidade axial do chumbo nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.

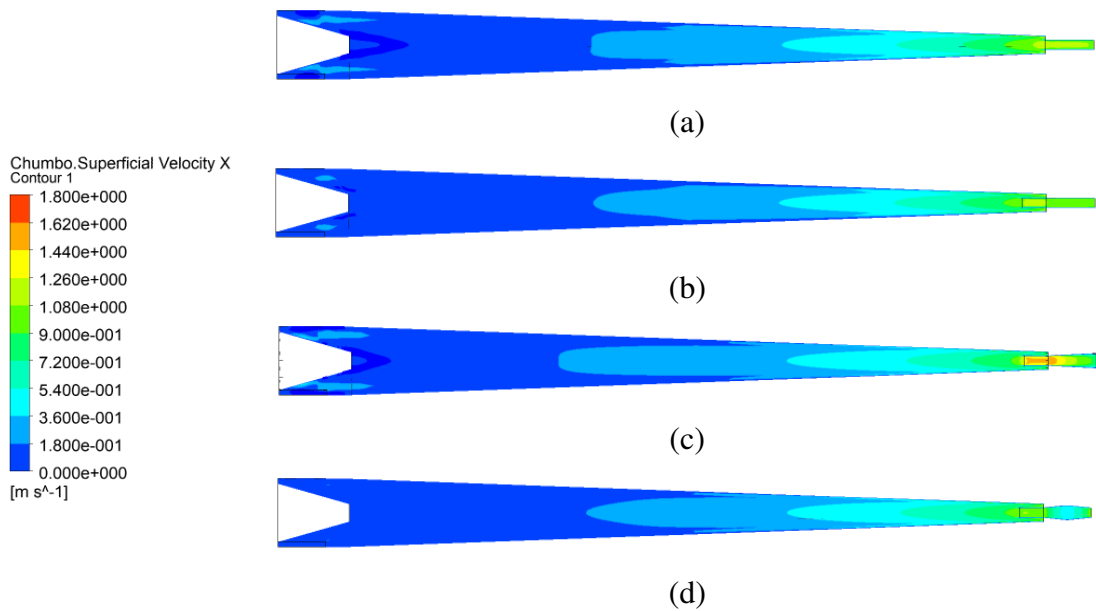


Figura 83 - Campos da velocidade tangencial do gás nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.

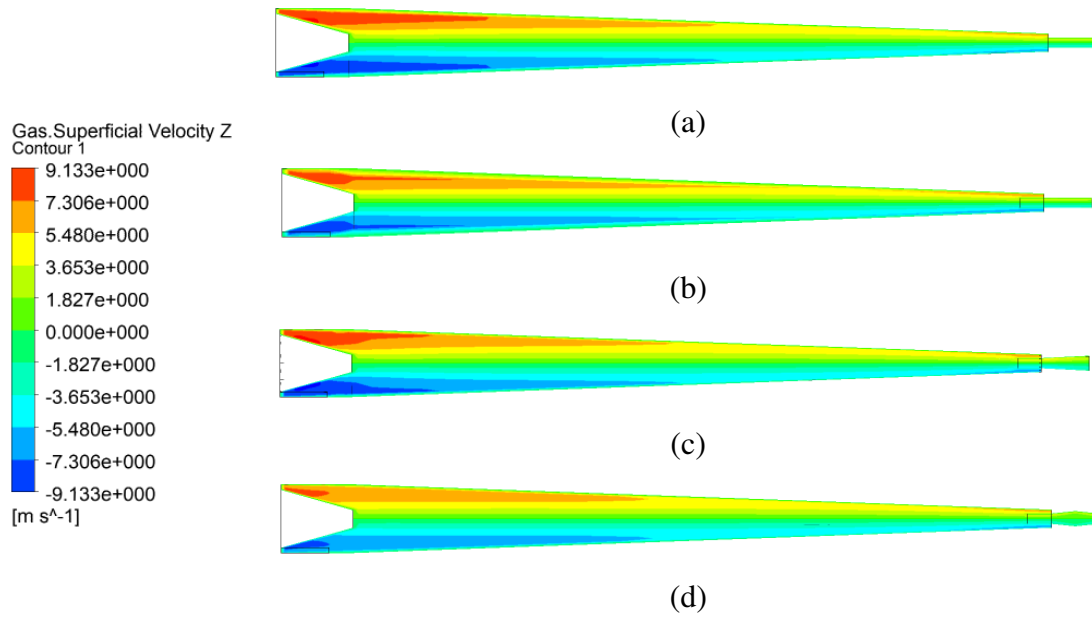
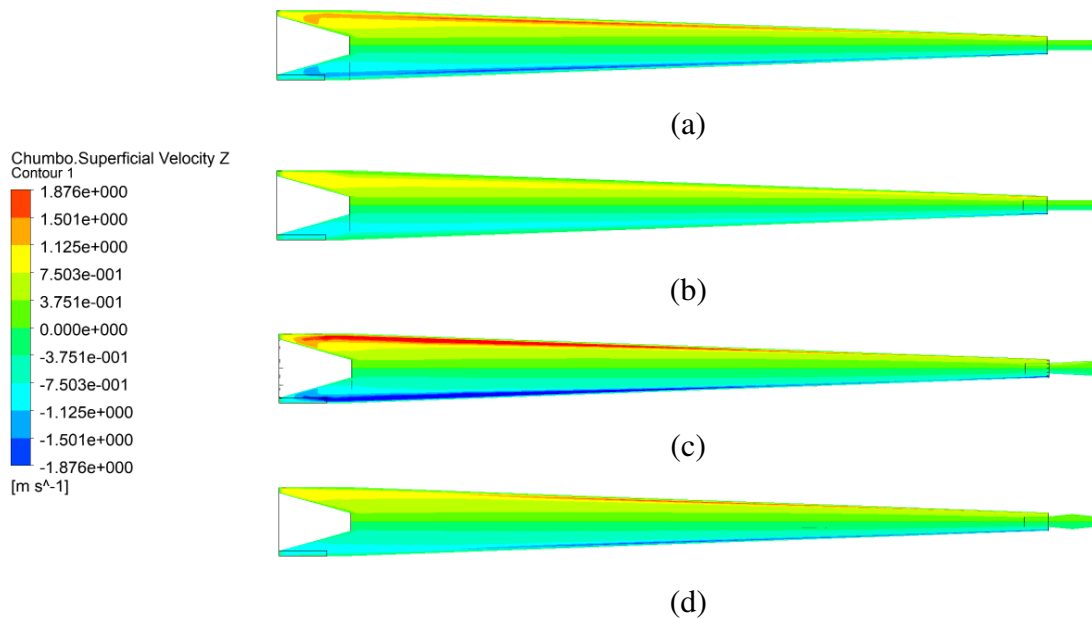


Figura 84 - Campos da velocidade tangencial do chumbo nas malhas de (a) saída comum, (b) saída comum com tubo interno, (c) saída boca de sino com tubo interno e (d) saída losango com tubo interno.



#### 4.8 Comparação com o ciclone padrão

Na Tabela 15 são apresentadas as eficiências de separação das partículas de chumbo para o separador ciclônico e o ciclone padrão (Figura 8). Observa-se que a melhor eficiência de chumbo (95,26%) é observada no caso 1.

Tabela 15 - Identificação dos casos estudados com variação na geometria: separador ciclônico versus ciclone comum com as mesmas dimensões.

Caso	Descrição	Eficiência Chumbo (%)
1	Separador Ciclônico	95,26
14	Ciclone Padrão	61,92

Na Figura 85 observa-se os campos de pressão para o separador ciclônico (tronco cônico de 75 mm e saída comum) e para o ciclone padrão com as mesmas dimensões do separador. Na Figura 86 são mostrados os perfis de pressão absoluta (Pa) em função da posição radial (Y), em metros. Observa-se uma grande diferença no valor das pressões entre as duas geometrias. As maiores pressões são encontradas no separador ciclônico, assim como a diferença de pressão entre as paredes e o centro nessa geometria também é maior. Na Figura 87 é apresentado um corte no plano ZY, no ciclone padrão apresentado na Figura 8, representando o campo da pressão absoluta (Pa). Pode-se notar novamente a diferença de pressão entre as paredes e o centro do separador. A Figura 88 (Barbosa, 2011) ilustra como o comportamento dos campos de pressão é similar apesar de serem de escoamentos e geometrias diferentes.

Na Figura 89 tem-se os campos de fração volumétrica de gás para o separador ciclônico (tronco cônico de 75 mm e saída comum) e para o ciclone comum com as mesmas dimensões do separador, sobre o plano XY. Na Figura 90 são mostrados os perfis da fração volumétrica de gás (a) e das partículas de chumbo (b) em função da posição radial em metros na posição axial 03 (0,75 m). O núcleo gasoso do ciclone padrão é mais largo que o do separador ciclônico, mostrando uma menor tendência do gás a se manter na saída tubular.

Na Figura 91 são apresentados os campos de velocidade axial do gás e na Figura 93 das partículas de chumbo, ambas para o separador ciclônico (tronco cônico de 75 mm e saída comum) e para o ciclone padrão. Na Figura 92 e 94 são representados os perfis de

velocidade axial do gás e das partículas de chumbo, respectivamente, ambas em função da posição radial (Y), em metros. As velocidades axiais alcançadas pelo separador ciclônico são bem superiores das encontradas no ciclone padrão.

Na Figura 95 são apresentados os campos de velocidade tangencial do gás e na Figura 98 das partículas de chumbo, ambas para o separador ciclônico (tronco cônico de 75 mm e saída comum) e para o ciclone padrão. Na Figura 97 e 99 são representados os perfis de velocidade tangencial do gás e das partículas de chumbo, respectivamente, ambas em função da posição radial (Y), em metros. Observa-se que na proximidade das entradas, o ciclone padrão tem velocidades tangenciais superiores à do separador ciclônico. No entanto, próximo das saídas, o separador ciclônico apresenta velocidades tangenciais de gás maiores que a do ciclone padrão. Isso demonstra que o separador ciclônico consegue manter o movimento helicoidal de maneira mais efetiva do que o ciclone padrão.

Na Figura 96 (Barbosa, 2011), pode-se observar o comportamento semelhante da velocidade tangencial do ciclone padrão avaliado neste trabalho.

Figura 85 – Campos de Pressão das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão.

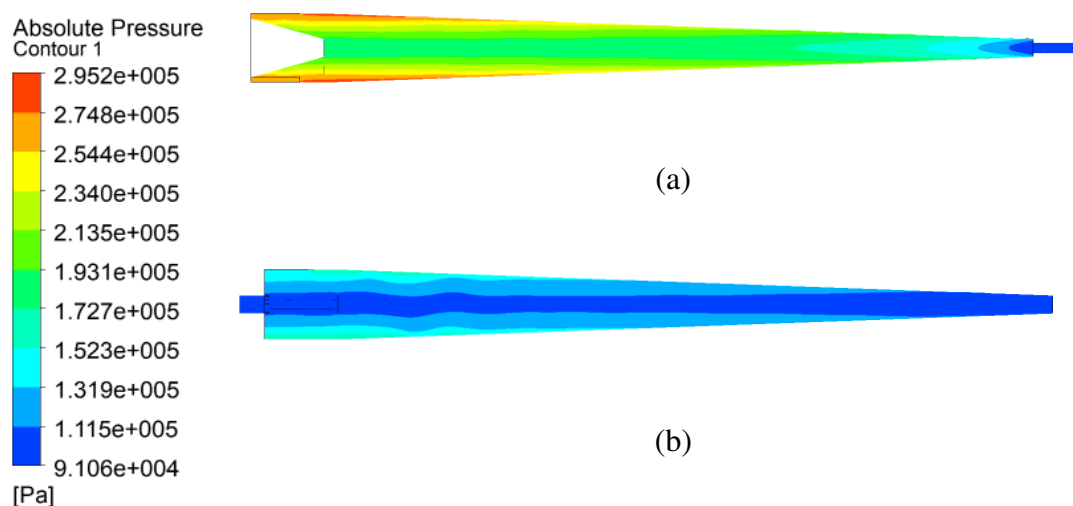


Figura 86 - Perfil de pressão em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m).

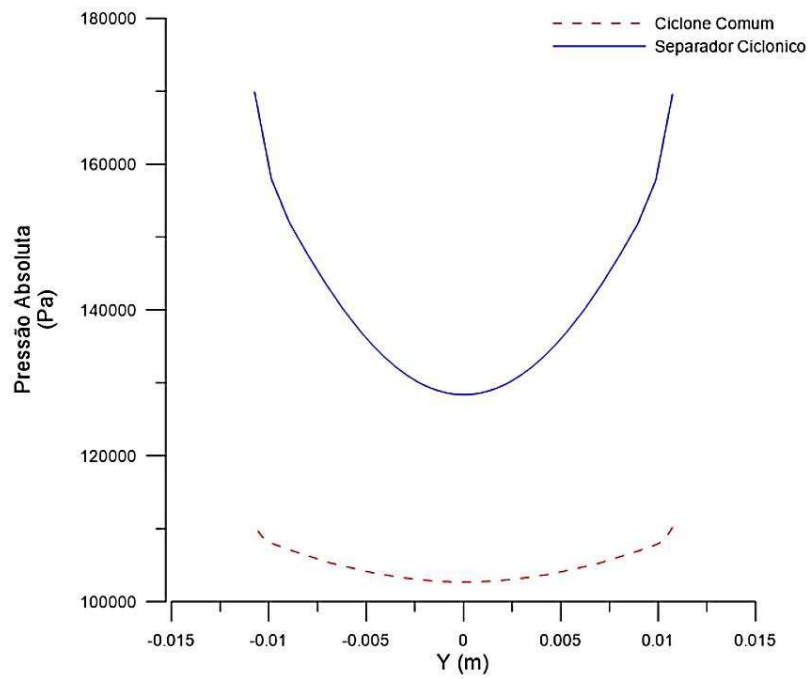


Figura 87 – Campo de pressão da malha de ciclone comum no plano ZY.

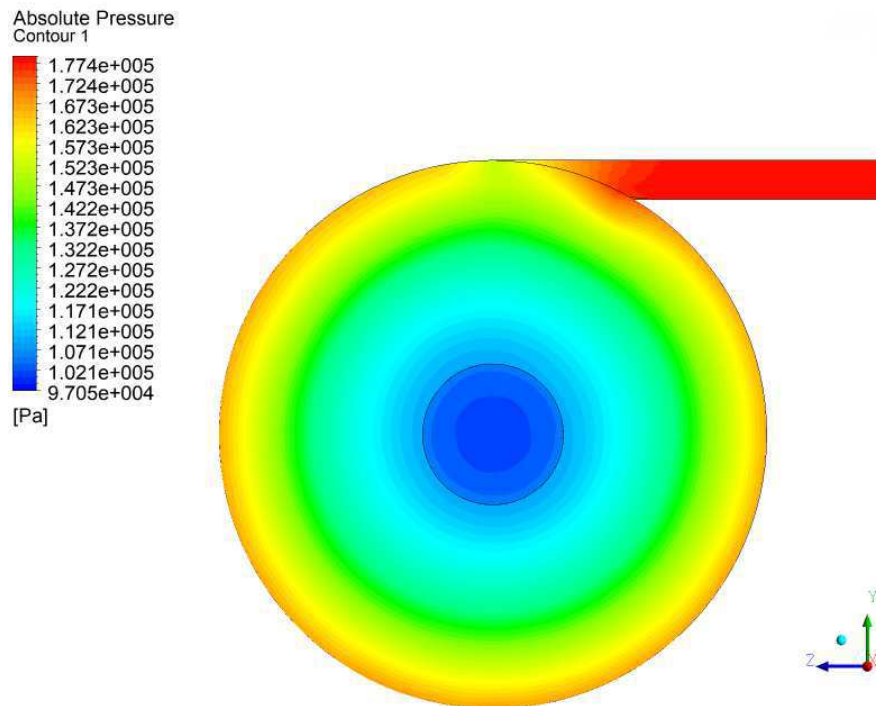


Figura 88 – Representação do campo de pressão nas ampliações na região próxima as entradas de alimentação do hidrociclone para diferentes vazões de alimentação (Barbosa, 2011).

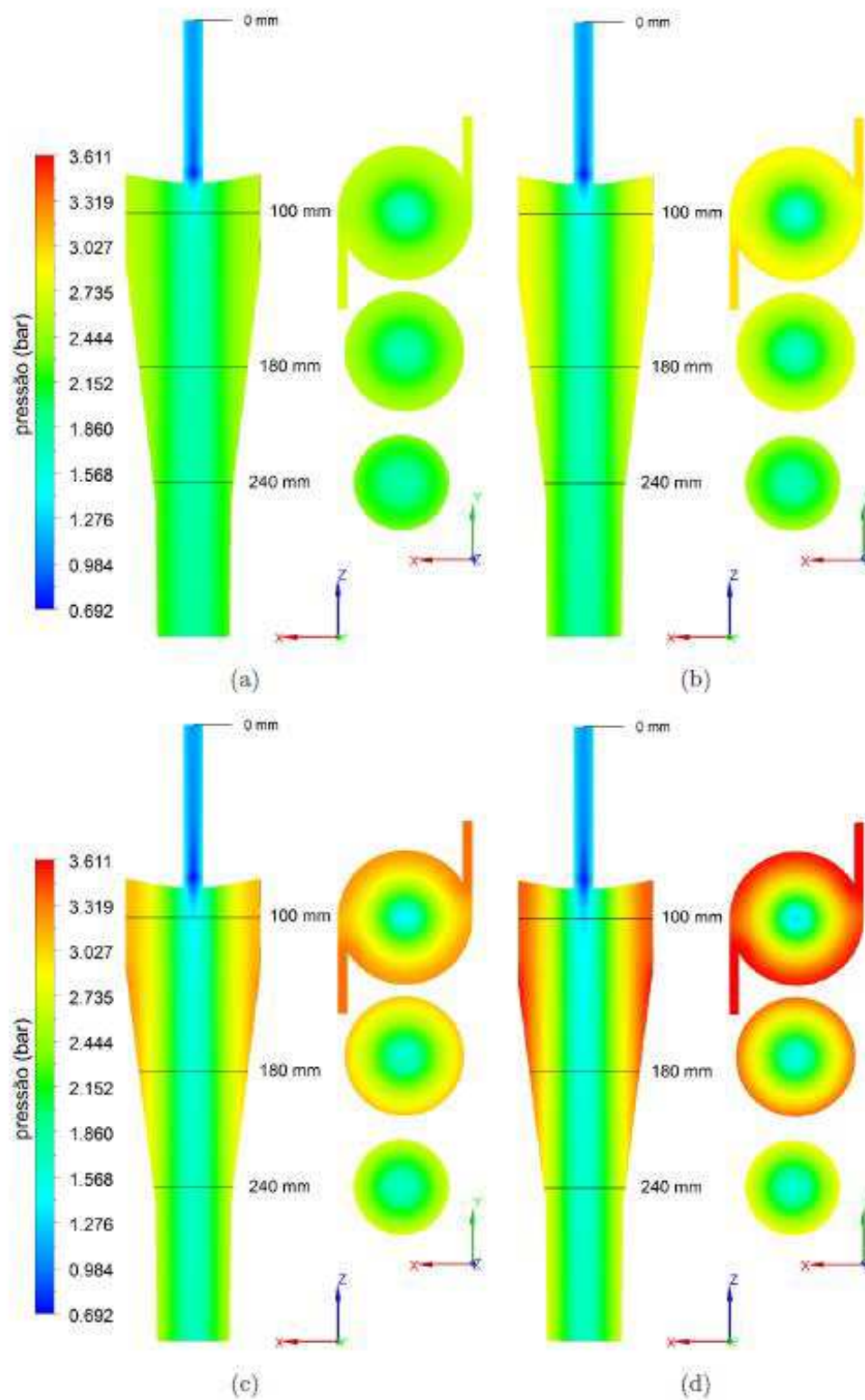


Figura 89 - Campos da fração volumétrica do gás das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão.

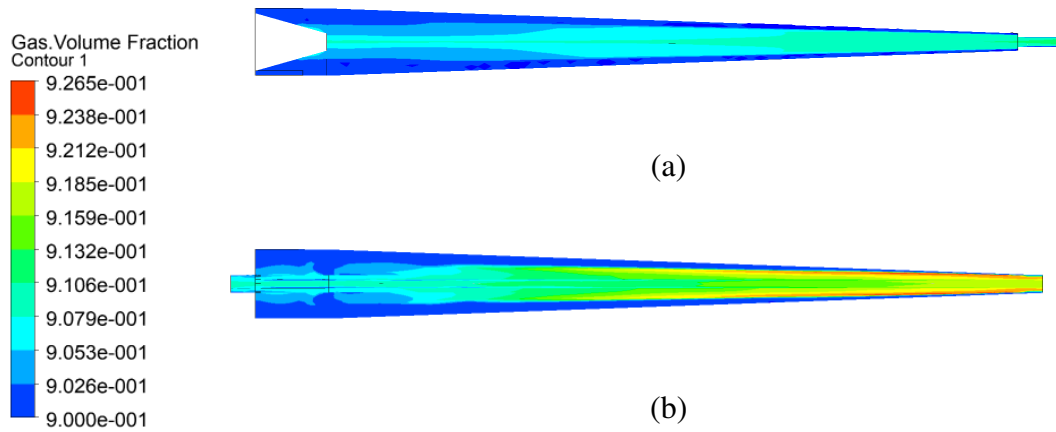


Figura 90 - Perfil da fração volumétrica (a) do gás e (b) das partículas de chumbo em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m).

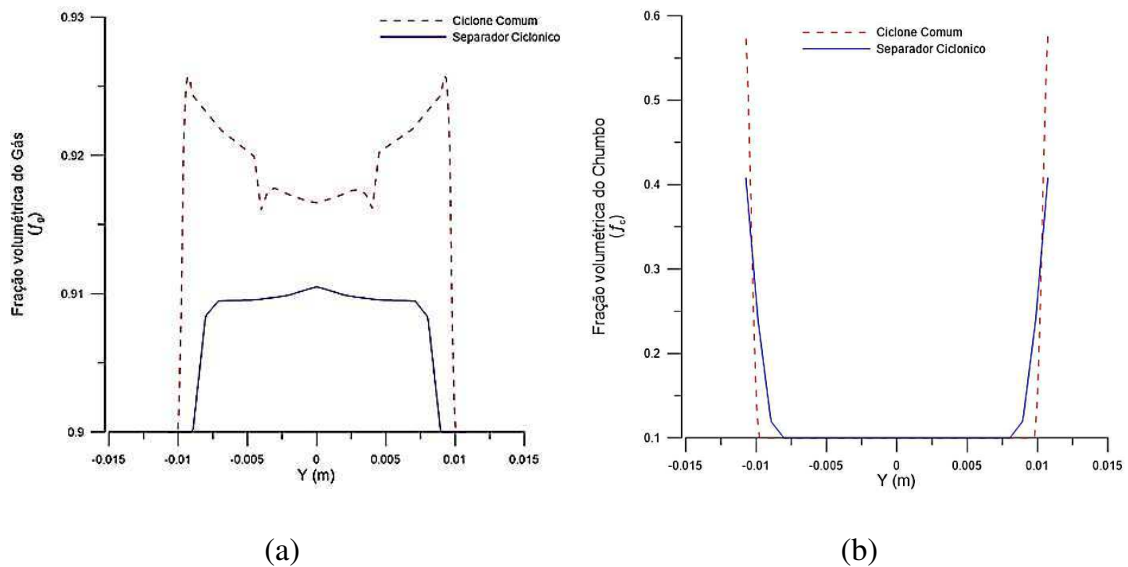




Figura 91 - Campos da velocidade axial do gás das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão.

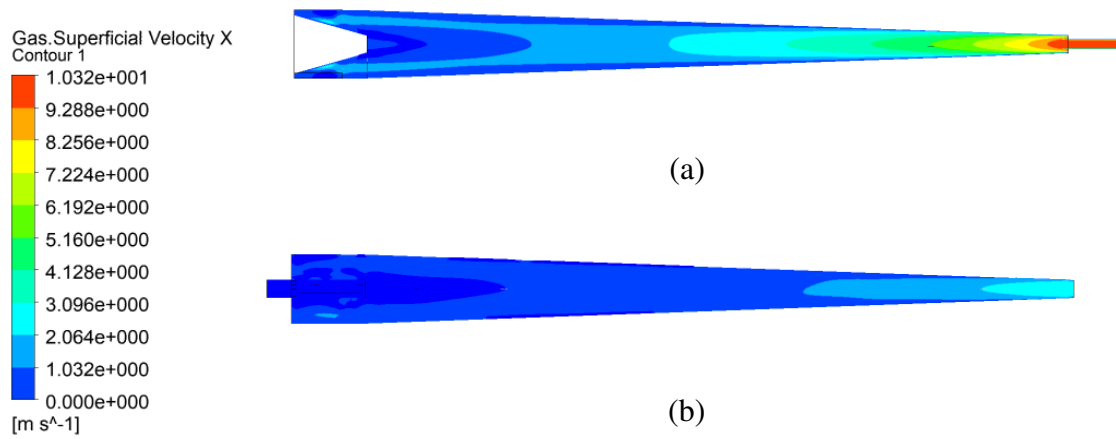


Figura 92 - Perfil da velocidade axial do gás em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m).

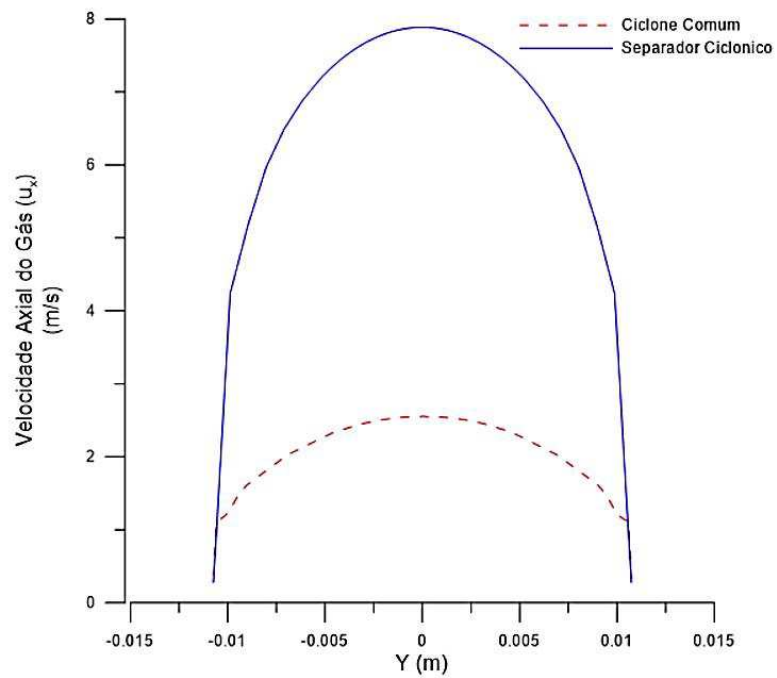


Figura 93 - Campos da velocidade axial do chumbo das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão.

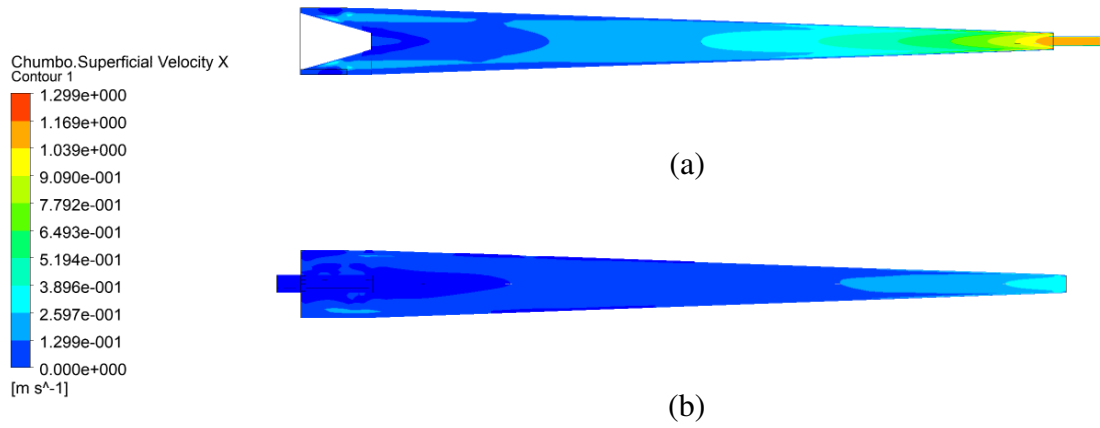


Figura 94 - Perfil da velocidade axial do chumbo em função da posição radial (Y para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m).

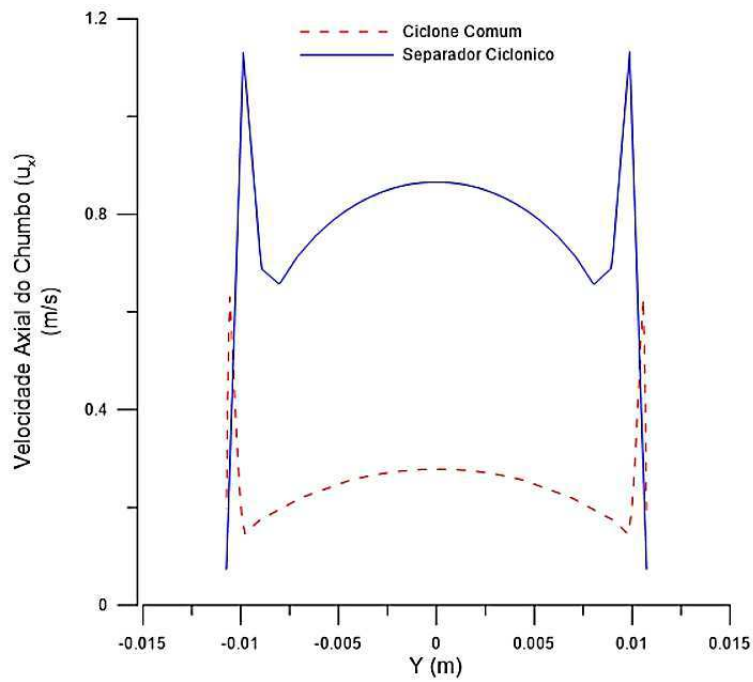


Figura 95 - Campos da velocidade tangencial do gás das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão.

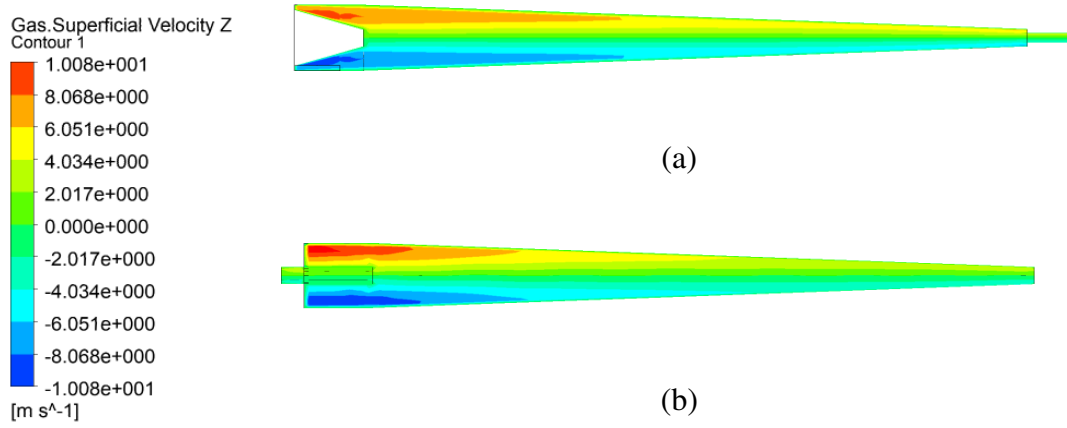


Figura 96 – Representação da componente velocidade tangencial para o ciclone com uma entrada tangencial e sem *vortex finder* (Barbosa, 2011).

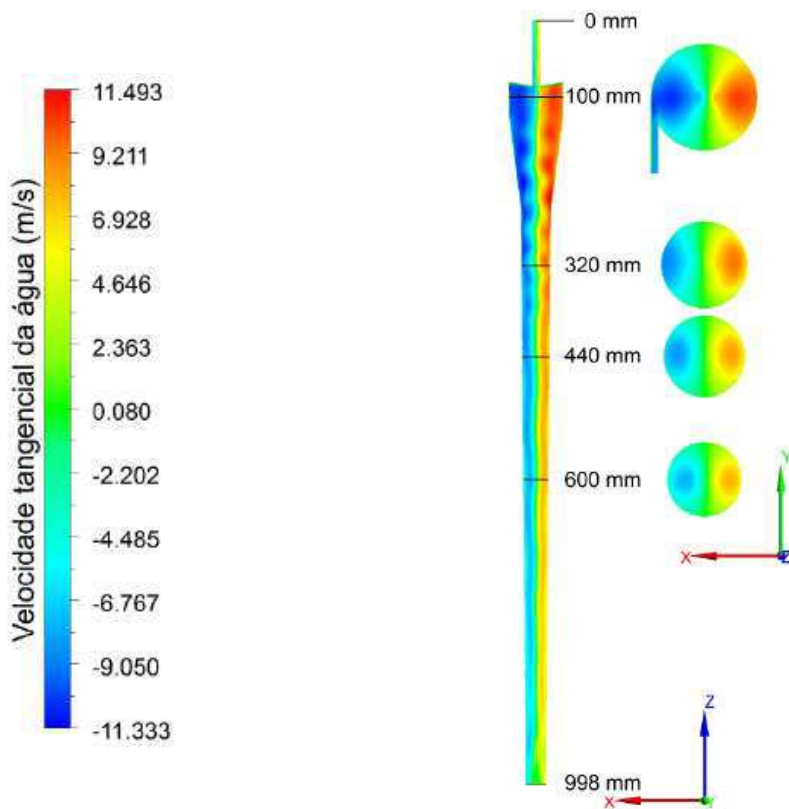


Figura 97 - Perfil da velocidade tangencial do gás em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m).

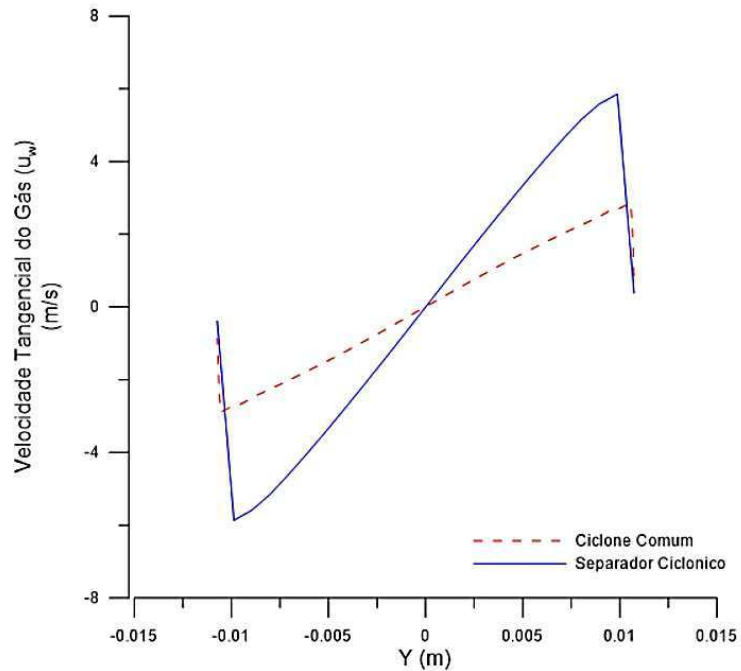


Figura 98 - Campos da velocidade tangencial do chumbo das malhas (a) tronco cônico de 75 mm e saída comum (separador ciclônico) e (b) ciclone padrão.

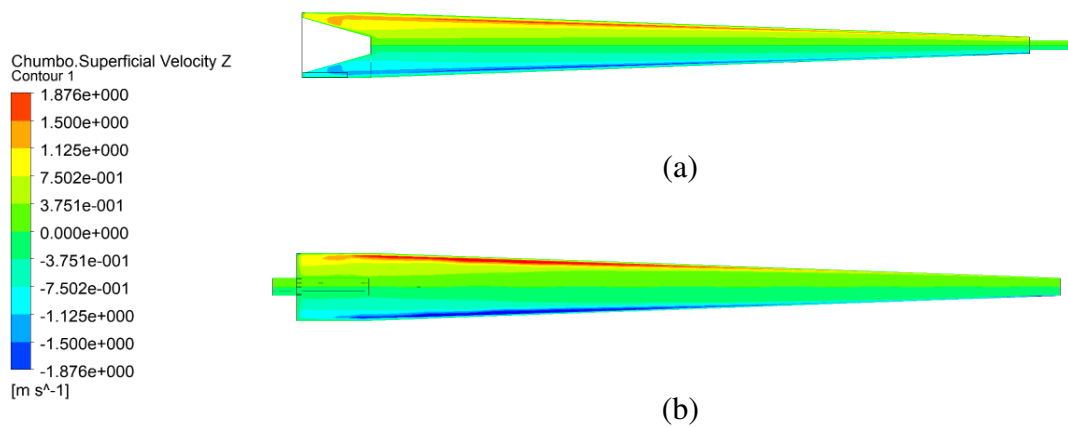
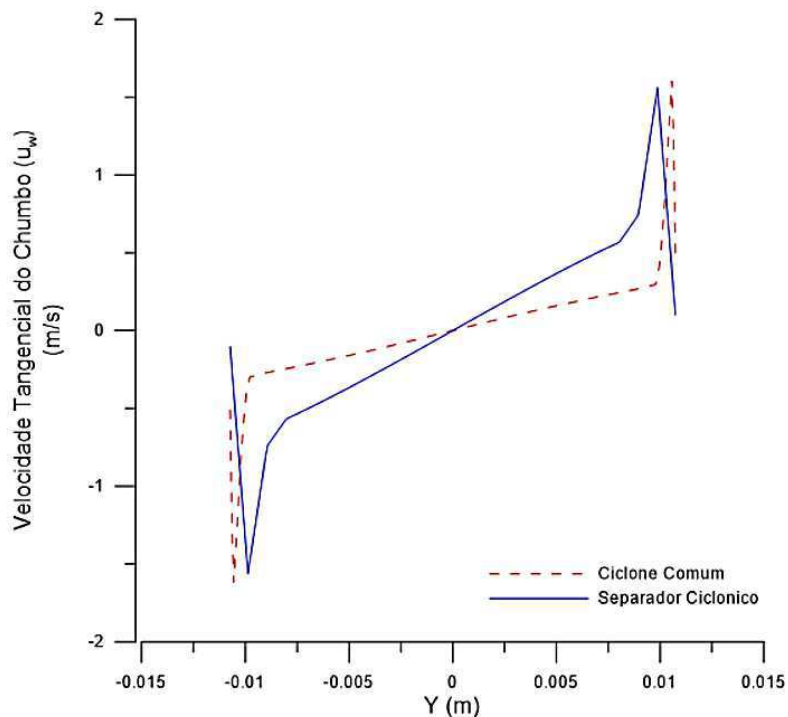


Figura 99 - Perfil da velocidade tangencial do chumbo em função da posição radial (Y) para analisar as diferentes geometrias do separador ciclônico e do ciclone comum na posição axial 03 (0,75 m).



#### 4.9 Eficiências de separação

Na Tabela 16 são apresentadas as eficiências de separação do gás e do óleo. Na eficiência do gás calcula-se quanto do gás presente na entrada está presente na saída de gás. Da mesma forma a eficiência de chumbo indica quanto de chumbo presente na corrente gasosa nas entradas está realmente saindo na saída de chumbo. Entende-se então que quanto mais alto o valor da eficiência, mais puro o outro componente está saindo.

Verifica-se que a melhor eficiência de separação de partículas de chumbo refere-se ao caso 8 (99,97) e a maior eficiência de gás foi ao caso 12 (47,32%). A eficiência de gás mais elevada no caso 12. A Figura 100 mostra de forma gráfica a comparação entre as eficiências.

Nota-se que na saída angular tem-se entre 61,92 a 99,97% de partículas de chumbo e 68,09 a 52,68% de gás, em relação a quantidade nas correntes de entrada. Na saída tubular tem-se entre 38,08 a 0,03% de chumbo e 31,91 a 47,32% de gás. Na maioria

dos casos, tem-se uma corrente, na saída angular, mais concentrada em partículas de chumbo do que nas entradas e na saída tubular uma corrente mais diluída em partículas de chumbo. Isso se mostra um resultado bastante promissor, pois, como discutido no tópico da variação das frações volumétricas, uma alimentação diluída é preferida quando se busca alta recuperação de sólidos. A partir disso, pode-se colocar separadores ciclônicos em série, com ligação na saída tubular e obter uma maior recuperação de sólidos como resultado.

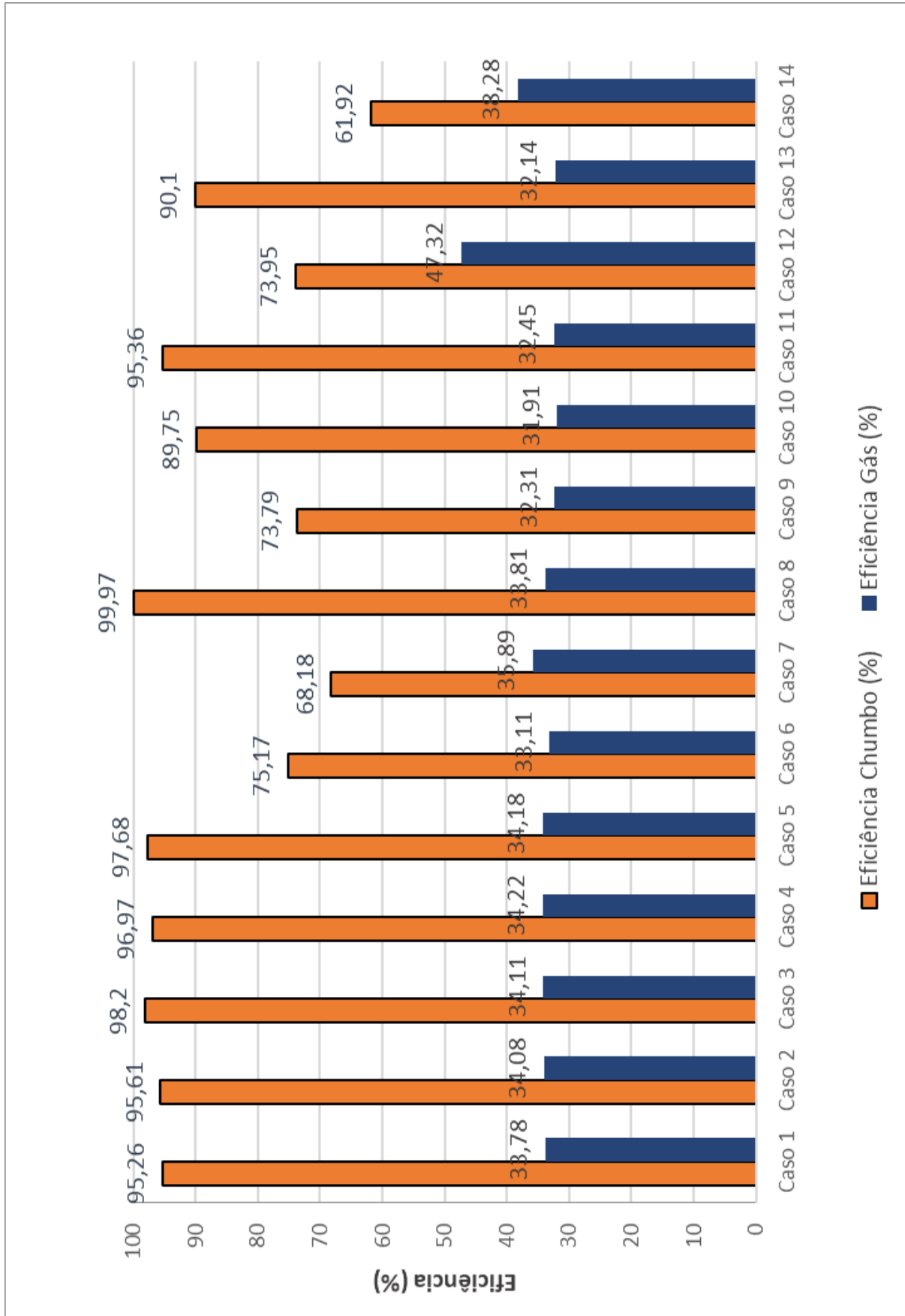
Tabela 16 - Eficiência de Chumbo e de Gás, em porcentagem, para cada caso avaliado.

Casos	Ec* (%)	Eg** (%)
1	95,26	33,78
2	95,61	34,08
3	98,20	34,11
4	96,97	34,22
5	97,68	34,18
6	75,17	33,11
7	68,18	35,89
8	99,97	33,81
9	73,79	32,31
10	89,75	31,91
11	95,36	32,45
12	73,95	47,32
13	90,10	32,14
14	61,92	38,28

\*Ec – Eficiência de chumbo

\*\*Eg – Eficiência de gás

Figura 100 – Eficiência de Chumbo e de Gás, em porcentagem, para cada caso avaliado.



## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- A modelagem matemática desenvolvida para o estudo do escoamento chumbo/gás no interior do separador ciclônico foi capaz de representar os fenômenos físicos envolvidos neste escoamento. Isto pode ser atestado através de comparações de perfis e comportamentos feitas com alguns modelos validados;
- O comportamento do gás e das partículas de chumbo no interior do separador se mostraram favoráveis a separação, pois foi possível perceber que as partículas se encontravam mais próximas as paredes e o gás um pouco mais próximo ao centro do equipamento;
- Foi observado que o aumento da velocidade inicial só favoreceu a separação até certo ponto, a maior eficiência de chumbo encontrada (98,2%) foi para a velocidade de 10 m/s, ao aumentar ainda mais a velocidade inicial, não foram encontrados valores maiores de eficiência;
- Notou-se que a concentração das partículas na entrada do separador tem grande relevância na eficiência da separação, quanto mais diluída a corrente de entrada for, maior é a recuperação das partículas sólidas;
- A variação do tamanho do diâmetro mostrou-se conforme esperado, quanto maior o diâmetro da partícula utilizada, maior é a recuperação das partículas sólidas;
- Ao variar o tamanho do tronco cônico, pode-se perceber que o tronco cônico de 75 mm alcançou as melhores eficiências de separação e as maiores velocidades;
- Avaliando as modificações feitas nas saídas do separador, pode-se perceber que a adição do tubo interno se mostrou ineficaz para o aumento da eficiência de separação. Isso provavelmente se deve ao fato de que o núcleo de gás não foi perfeitamente formado dentro do separador. A saída de boca de sino teve a maior eficiência de gás, porém apresentou uma grande queda na eficiência de chumbo;



- Ao se comparar o separador ciclônico ao ciclone comum foi percebido que o separador ciclônico apresentou um valor de recuperação de sólidos bastante superior. Além disso, foi percebido que o separador ciclônico manteve o movimento helicoidal de maneira mais efetiva até as saídas, diferente do ciclone padrão;
- Na maioria dos casos, tem-se uma corrente, na saída anular, mais concentrada em partículas de chumbo do que nas entradas e na saída tubular uma corrente mais diluída;
- Para a corrente diluída, pode-se utilizar ciclones em série para se alcançar os limites exigidos pela legislação para a liberação do gás no ambiente e para recuperação das partículas de chumbo;
- A corrente concentrada em partículas de chumbo deve ser encaminhada para o filtro de mangas, como previsto desde o início do trabalho.

## **6. TRABALHOS FUTUROS**

Como possíveis trabalhos futuros pode-se apontar:

- Validar do modelo apresentado neste trabalho na forma experimental com a construção física das geometrias apresentadas;
- Estudar utilizando tais geometrias não mais como separadores, mas sim como reatores ou secadores, por exemplo. O interesse foi despertado devido ao tempo de residência das partículas dentro do equipamento, apesar de assumir escoamento estacionário neste caso, pode-se estimar o tempo de residência das partículas a partir do número de voltas dentro do equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. V. B. Hidrociclone para a separação de óleo residual de água em refinarias. Dissertação de Mestrado. Escola de Química. UFRJ. 2012.

ANDERSSON, B.; ANDERSSON, R. HÅKANSSON, L.; MORTENSEN, M.; SUDIYO, R.; WACHEM, B. V. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge University Press. 2012.

ANSYS, Inc. Ansys Help Viewer. Version 15.0., 2013. Documento eletrônico disponibilizado com o software Ansys 15.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9547 de 1997: Material particulado em suspensão no ar ambiente – Determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume. Rio de Janeiro. 1997.

ATKINS, P.; JONES, L. Princípios de Química - Questionando a vida moderna e o meio ambiente. Quinta Edição. Bookman. 2012.

BALESTRIN, E.; BASTOS, J.C.S.C.; DECKER, R.K.; MEIER, H.F.; NORILER, D. An alternative for the collection of small particles in cyclones: experimental analysis and CFD modeling. *Separation and Purification Technology*. Volume 184, Pages 54-65. 2017.

BALESTRIN, E.; DECKER, R.K.; LUCIANO, R.D.; MEIER, H. F.; WIGGERS, V.R. Análise dos efeitos geométricos de entrada e saída em ciclones por simulação numérica e experimentos físicos. XX COBEQ. Florianópolis. 2014.

BARBOSA, E. S. Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistema multifásico: Aplicação à indústria do petróleo. Tese de Doutorado. UFCG. 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 003 de 28 de junho de 1990. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar. Publicada no D.O.U, de 22/08/90, Seção I, Págs. 15.937 a 15.939. 1990.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes

atmosféricos para fontes fixas. Publicada no DOU nº 1, de 2 de janeiro de 2007, Seção 1, página 131-137. 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Publicada no D.O.U. 26/12/2011, pág. 304-311. 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 07 – Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional. – PCMSO. Publicação de Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978. Última atualização pela Portaria MTE nº1.892, de 09 de dezembro de 2013. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR7.pdf>>. Acesso em: 30 de novembro de 2017.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 15 – Atividades e Operações Insalubres. Publicação da Portaria MTb nº 3.214, de 08 de junho de 1978. Última atualização pela Portaria MTE nº 1.297, de 13 de agosto de 2014. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR15/NR-15.pdf>>. Acesso em: 30 de novembro de 2017.

CARVALHO, A. T. Otimização de ciclone para a pré-separação de areia na produção de petróleo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

CARVALHO, F. M.; SILVANY NETO, A. M.; GONÇALVES, H. R.; GUIMARÃES, G. C.; AMORIM, C. J. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. S.; TAVARES, T. M. Intoxicação por chumbo: Zinco protoporfirina no sangue de crianças de Santo Amaro da Purificação e de Salvador, BA. *Jornal de Pediatria*, v. 72, n. 5, p.295-298. 1996.

CARVALHO, F. M.; SILVANY NETO, A. M.; TAVARES, T. M.; COSTA, A. C. A.; CHAVES, C. D. R.; NASCIMENTO, L. D.; REIS, M. A. Chumbo no sangue de crianças e passivo ambiental de uma fundição de chumbo no Brasil. *Ver. Panam Salud Publica*, v. 13(1), p. 19-24. 2003.

CERRI, F. F. P. Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.

DE CAPITANI, E. M.; PAOLIELLO, M. M. B. ALMEIDA, G. R. C. Fontes de Exposição Humana ao Chumbo no Brasil. Revista Medicina. Ribeirão Preto. V. 42 (3), p. 311-318. 2009.

DIAS, G. P.; BARROSO, E. V. Determinação Experimental do Coeficiente de Restituição Normal de Rochas: Aplicação na previsão do alcance de blocos em encostas. Anuário do Instituto de Geociências. UFRJ. 2006.

DIAS, J. W. C. Manual de operação AGV PTS. Energética® - Qualidade do Ar. Rio de Janeiro. 2016.

EVANGELISTA, F.S.B.; SILVA, I.C.R. Fontes de contaminação pelo Chumbo (Pb). 8ª Mostra de produção científica da pós-graduação lato sensu da PUC Goiás, v.1, p.1426-34, 2013.

FARIAS, F. P. M.; BURITI, C. J. O.; LIMA, W. C. P. B.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. Simulação numérica do processo de separação areia/água/óleo pesado em hidrociclones. In: *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. V. 1, p. 1-14. Barcelona, 2009.

FARIAS, F. P. M.; SOUZA, J. S.; LIMA, W. C. P. B.; MACÊDO, A. C.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. *Influence of Geometric Parameters of the Hydrocyclone and Sand Concentration on the Water/Sand/Heavy-Oil Separation Process: Modeling and Simulation. The International Journal of Multiphysics*. Vol. 5. 2011.

FORBES, R. G. Identificação e Avaliação dos Principais Aspectos Relacionados À Reciclagem Dos Plásticos Mais Utilizados No Setor Automobilístico Brasileiro e o seu Atendimento à Regulamentação Ambiental. Curitiba. 2008.

FUNAYAMA, C. A. R. Efeitos do chumbo sobre o cérebro em desenvolvimento. Rev. Medicina, Ribeirão Preto, v. 42, n. 3, p. 287-290. 2009.

GABBI, R. Modelagem matemática do escoamento turbulento em canal axissimétrico com “Bluff-Body”. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação de Matemática – UNIUIJ. 2013.

GERLACH, R. F.; GONCALVES, S. C. D.; GUERRA, C.S. Biomarcadores de Exposição a Chumbo. Medicina (USP.FMRP), v. 42, p. 237-246. 2009.

GONÇALVES, S. M. Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. UFU. 2016.

GONZAGA, N. P.; SILVA, P. C.; POSSIGNOLO, N. V. Avaliação dos aspectos e impactos ambientais relacionados à fabricação de baterias automotivas: estudo de caso de um empreendimento localizado na região de Campinas-SP. Revista Ciência e Inovação – FAM, v. 2, n. 1, p. 18-28. 2015.

HWANG, K.; HWANG, Y.; YOSHIDA, H. *Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. In: Chemical Engineering Science.* 2012.

JANSSON, M. *CFD Simulations of Silos Content. Master's Thesis. Department of Chemical and Biological Engineering. Chalmers University of Technology.* 2014.

JUENGCHAROENSUKYING, J.; POOCHINDA, K.; CHALERMSINSUWAN, B. Effects of cyclone vortex finder and inlet angle in solid separation using CFD simulation. International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies. Thailand. 2017.

LIMA, V. F.; MERÇON, F. Metais Pesados no Ensino da Química. Química Nova na Escola, 33, p. 199-205. 2011.

LUNA, F. D. T. Estudo Numérico do Processo de Separação de um Sistema Bifásico em Separador Ciclônico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química. UFCG. 2014.

LUNA, F. D. T.; FARIAS NETO, S. R. Estudo numérico de um equipamento inovador no processo de separação água/óleo: Célula Turbilhonar. Relatório PIBIT/CNPQ. UAEQ. UFCG. 2011.

MALDANER, L. H. Uso de ciclones para coleta de material particulado gerado no beneficiamento de madeira. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Passo Fundo. 2012.

- MARINS, L. P. M. Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.
- MARTIGNONI, W. P.; BERNARDO, S.; QUINTANI, C. L. Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 24, no. 01, pp 89-94. 2007.
- MINETO, A. T. Simulação numérica de escoamentos gás-sólido em leito fluidizado borbulhante utilizando a teoria cinética dos escoamentos granulares. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UNESP. 2009.
- MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde. *Ver. Panam Salud Publica*, v. 15 (2), p. 119-129. 2004.
- PANTAROTO, H. L.; FIGUEIREDO, P. J. M. Chumbo: Exploração, Uso e Saúde Pública. XIV Simpósio de engenharia de produção - SIMPEP, Bauru, v. 1. p. 1. 2007.
- PONTES, R. S. Baterias de Chumbo. UFPB, João Pessoa. 2009.
- QUITERIO, L. S.; SILVA, C. R. S.; VAITSMAN, D. S.; MARTINHON, P. T.; MOREIRA, M. F. R.; ARAÚJO, U. C.; MATTOS, R. C. O. C.; SANTOS, L. S. C. Uso da poeira e do ar como indicadores de contaminação ambiental em áreas circunvizinhas a uma fonte de emissão estacionária de chumbo. *Cad. Saúde Pública do Rio de Janeiro*, v. 17, n. 3, p 501-508. 2001.
- RAMIREZ, M. V. Simulação da perda de carga e da eficiência de coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química. UFSCar. 2009.
- ROCHA, S. M. S., Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta na limpeza de gases em filtro de mangas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 2010.
- ROSA, E. S. Escoamento Multifásico Isotérmico: Modelos de multifluidos e de mistura. Bookman. Porto Alegre. 2012.
- SADAO, M. Intoxicação por chumbo. *Revista de oxidologia*. p.37-42, jan.-fev.-mar. 2002.

SAIANI, R. A. S. Concentração de chumbo em dentes de crianças com alterações neurológicas. Tese de Doutorado em Odontopediatria. Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto. Universidade de São Paulo. 2012.

SANTOS, F. L. P. Simulação numérica Euleriana de escoamento gás-sólido em risers com dimensões reduzidas aplicando malhas refinadas. USP-São Carlos. Tese de Doutorado. 2008.

SANTOS, F. P.; MEDRONHO, R. A. Simulação numérica da fluidodinâmica de um *riser* de craqueamento catalítico. Escola de Química/UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.

SANTOS, J. S.T. Estudo experimental e numérico de parafinação em escoamento de hidrocarbonetos em dutos produtores. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. 2009.

SCHIFER, T. S.; BOGUSZ JUNIOR, S.; MONTANO, M. A. E. Aspectos Toxicológicos do Chumbo. *Infarma*, v. 17, nº 5/6, p 67-72. 2005.

SHIGEMORI, K.; HWANG, K.; HWANG, Y.; YOSHIDA, H. *Improvement of particle separation efficiency by installing conical top-plate in hydrocyclones. In: Powder Technology*. 2012.

SILVA, C. H. Uso de Indicadores de Dose Interna e de Efeito como Ferramentas para a Avaliação da Exposição ao Chumbo. Dissertação de Mestrado. Escola Nacional de Saúde Pública. Fundação Oswaldo Cruz. 2001.

SILVA, J. M. Separação água/óleo usando um separador ciclônico: modelagem e simulação. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Química. UFCG. 2013.

SOARES, A. F. B. Aspectos Hidrodinâmicos da Separação Água/óleo via hidrociclone. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Química. UFCG. 2013.

SOUZA, J. S.; PAIVA, M. K. N.; FARIAS, F. P. M.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. Influência da temperatura no processo de separação água/óleo pesado via hidrociclone – Modelagem e Simulação. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2010.



SZABÓ JÚNIOR, A. M. Manual de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho. 10ª Edição. Editora Rideel. 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Lead (Pb). EPA. 2016.

WANG, B.; XU, D. L.; CHU, K. W.; YU, A. B. Numerical Study of gas-solid flow in a cyclone separator. Applied Mathematical Modelling, vol. 30, issue 11, pages 1326-1342. 2006.

WANG, S.; SHAO, B.; LIU, R.; ZHAO, J.; LIU, Y.; LIU, Y.; YANG, S. Comparison of numerical simulations and experiments in conical gas-solids spouted bed. Chinese Journal of Chemical Engineering, Elsevier, v. 23, p. 1579-1586. 2015.

WEI, J.; ZHANG, H.; WANG, Y.; WEN, Z.; YAO, B.; DONG, J. The Gas-solid flow characteristics of cyclones. Henan Polytechnic University. China. 2016.

ZHANG, Y.; WANG, Z., JIN, Y. Simulation and Experiment of gas-solid flow field in short contact cyclone reactors. China University of Petroleum. China. 2013.

ZIMMERMANN, M. S. Modelagem e simulação do processo de separação gás/óleo empregando um separador ciclônico. Trabalho de Conclusão de Curso. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. 2014.

ZIMMERMANN, M. S. Processo de Separação Óleo/Gás Usando Separador Ciclônico: Modelagem e Simulação. Monografia apresentada ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH-25/ANP) para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Universidade Federal de Campina Grande. 2015.

## APÊNDICE A

O número de Reynolds pode ser expresso pela Equação A-1.

$$Re = \frac{d_t u \rho}{\mu} \quad (\text{A-1})$$

onde  $d_t$  é o diâmetro da tubulação,  $u$  é a velocidade do escoamento,  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

Nas Equações A-2, A-3 e A-4 são expressas a velocidade ( $u$ ), a massa específica ( $\rho$ ) e a relação entre o comprimento ( $\Delta l$ ) e o volume ( $V$ ), respectivamente.

$$u = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (\text{A-2})$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A-3})$$

$$\frac{\Delta l}{V} = \frac{1}{A} \quad \therefore \quad \frac{[m]}{[m^3]} = \frac{1}{[m^2]} \quad (\text{A-4})$$

onde  $\Delta t$  é a variação do tempo,  $m$  é a massa e  $A$  é a área.

Na Equação A-5 define-se o fluxo mássico ( $\dot{w}$ ).

$$\dot{w} = \frac{m}{\Delta t} \quad (\text{A-5})$$

Substituindo as Equações A-2, A-3, A-4 e A-5 na Equação A-1, tem-se então a Equação A-6.

$$Re = \frac{d_t \left( \frac{\Delta s}{\Delta t} \right) \frac{m}{V}}{\mu} = \frac{d_t \left( \frac{m}{\Delta t} \right) \frac{\Delta l}{V}}{\mu} = \frac{d_t (\dot{w}) \frac{1}{A}}{\mu} \quad (\text{A-6})$$

Focando-se na parte cilíndrica do separador ciclônico, tem-se a área apresentada na Equação A-7.

$$A = \pi r^2 = \pi \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 = \frac{\pi d_c^2}{4} \quad (\text{A-7})$$

onde  $r$  é o raio e  $d_c$  é o diâmetro do cilindro.

Substituindo a Equação A-7 na Equação A-6, tem-se a Equação A-8.

$$Re = \frac{d_c(\dot{w}) \frac{1}{A}}{\mu} = \frac{d_c(\dot{w}) \frac{1}{\frac{\pi d_c^2}{4}}}{\mu} = \frac{d_c(\dot{w}) \frac{4}{\pi d_c^2}}{\mu} \quad (\text{A-8})$$

Reordenando a Equação A-8, obtém-se a Equação A-9.

$$Re = \frac{4\dot{w}}{\mu\pi d_c} \quad (\text{A-9})$$

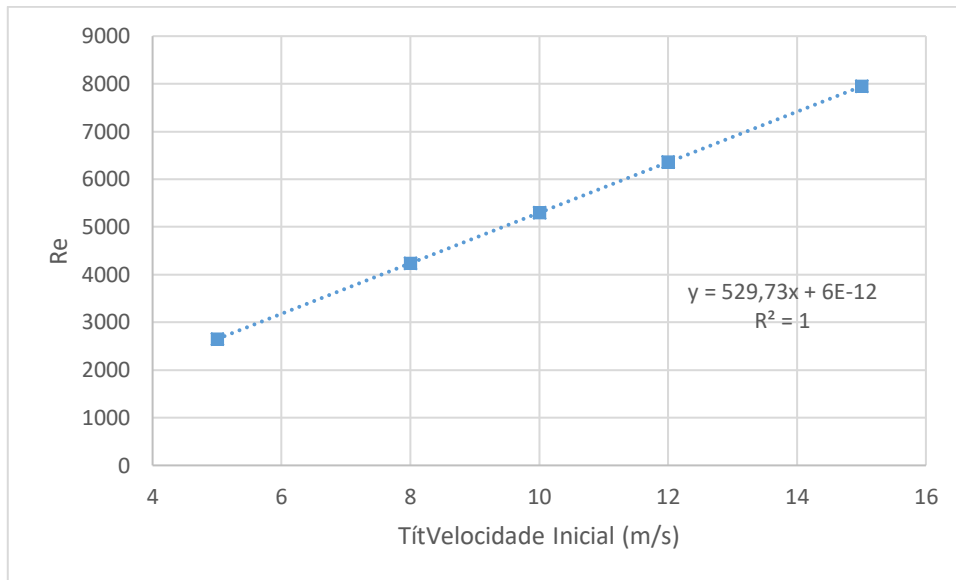
Substituindo os valores da vazão mássica referente a cada uma das velocidades nas seções de entrada adotadas como condição de contorno na Equação A-9, usada no cálculo do número de Reynolds como apresentado na Tabela A-1.

Tabela A-1 – Cálculo do número de Reynolds.

Velocidade Inicial (m/s)	Fluxo Mássico na Entrada (Kg/s)	Número de Reynolds (Re)
5	0,00266625	2648
8	0,004266	4237
10	0,0053325	5297
12	0,006399	6356
15	0,00799875	7945

A partir dos dados da Tabela A-1, é possível fazer uma relação entre as velocidades iniciais e o número de Reynolds como ilustrado na Figura A-1. A partir dessa curva, é possível traçar uma linha de tendência e encontrar uma equação que represente essa relação. A expressão encontrada é demonstrada pela Equação A-10. Pode-se também fazer uma relação entre as eficiências de separação de gás e de partículas de chumbo e o número de Reynolds como é apresentado nas Figuras A-2 e A-3, respectivamente.

Figura A-1 – Relação entre o número de Reynolds e as velocidades iniciais.



$$Re = 529,73u_i + 6 \times 10^{-12} \quad (A-10)$$

Figura A-2 – Relação entre o número de Reynolds e a eficiência de gás.

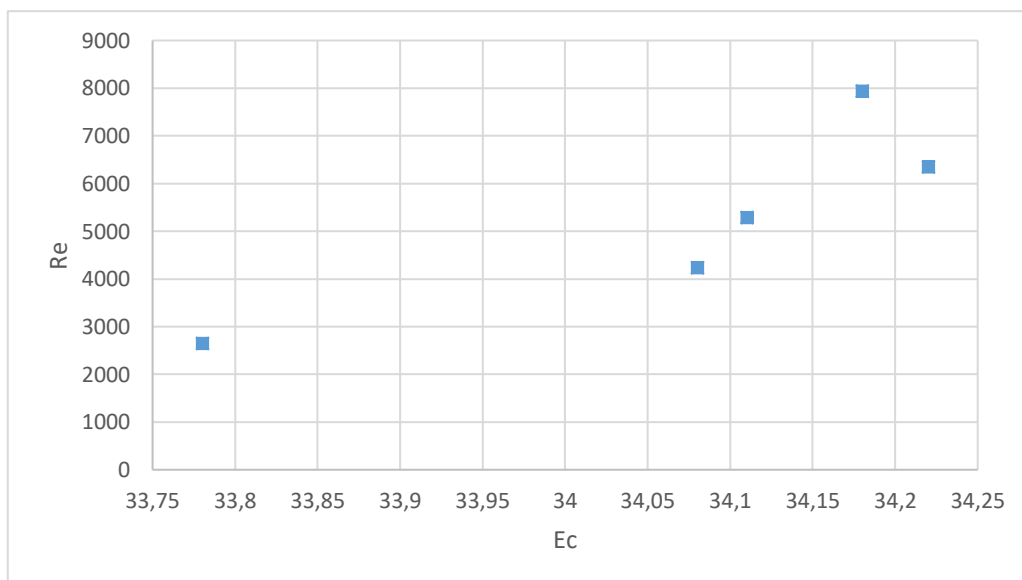


Figura A-3 – Relação entre o número de Reynolds e a eficiência de partículas de chumbo.

