

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Bruno Oliveira Lopes

**ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE
PARTÍCULAS MINERAIS EM HIDROCICLONE VIA CFD**

Campina Grande – PB

2018

Bruno Oliveira Lopes

ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS EM HIDROCICLONE VIA CFD

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Sistemas Termomecânicos.

Linha de pesquisa: Fenômenos de Transporte e Energia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande – PB

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG(Bibliotecária Maria Antonia de Sousa CRB 15/398)

L864a Lopes, Bruno Oliveira.
Análise numérica do processo de separação de partículas minerais em hidrociclone via CFD / Bruno Oliveira Lopes. – Campina Grande, 2018.
81 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

1. Hidrociclone. 2. CFD. 3. Mineração. 4. Simulação. 5. Sólido-Líquido. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 621.928.3(043)

ANÁLISE NUMÉRICA DE PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS
MINERAIS EM HIDROCICLONE VIA CFD.

BRUNO OLIVEIRA LOPES

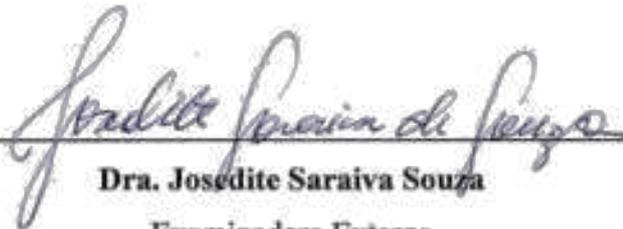
Dissertação Aprovada em 23/02/2018 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dra. Josedita Saraiva Souza

Examinadora Externa

UNINASSAU



Dra. Daniela Passos Simões de Almeida Tavares

Examinadora Externa

UNINASSAU

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais, Valdir e Josefa, e as minhas irmãs, Flávia e Dayane, que sempre me deram todo o apoio, força e dedicação, me ensinando a ter fé, paciência e força de vontade para superar todos os desafios que a vida me impôs. À minha esposa Bruna Kaliuma, por me oferecer o apoio necessário em todos os momentos, me aconselhando e encorajando a seguir em frente. Aos meus amigos e professores aos quais sem eles eu não teria o conhecimento necessário e apoio nos momentos difíceis desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao criador, pois toda a sabedoria e inspiração vêm dele e somente ele é capaz de nos dá aquilo que nós realmente precisamos no momento de maior necessidade.

A meus pais por todo apoio e dedicação e por ver nos seus olhos toda a felicidade a cada conquista minha e em saber que para eles essa conquista também é deles.

Às minhas irmãs Flávia e Dayane por estarem presente incentivando e apoiando sempre que eu precisei.

A minha linda esposa, Bruna Kalúma, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos apoiando desde os projetos mais simples até os mais cansativos, me fazendo acreditar, escutando horas e horas de um assunto que ela mesma afirma não entender, mas que mesmo assim escuta só para me dá a devida atenção.

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes discutindo sobre os mais diversos assuntos, compartilhando conhecimento ou apenas jogando conversa fora depois de um dia cansativo de estudos.

Aos professores que cada um à sua maneira soube passar o conhecimento e motivar o aprendizado.

Ao professor Antônio Gilson, orientador, que soube me guiar na direção correta e sempre me apoiou desde os momentos mais simples aos mais difíceis.

Aos desenvolvedores dos softwares usados nesse trabalho, Ansys e Autodesk, por disponibilizarem versões grátis para estudantes, as quais foram essenciais neste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande, à Pós – Graduação de Engenharia Mecânica, a CAPES.

EPÍGRAFE

“Ora, no tocante às coisas sacrificadas aos ídolos, sabemos que todos temos ciência. A ciência incha, mas o amor edifica. E, se alguém cuida saber alguma coisa, ainda não sabe como convém saber. Mas, se alguém ama a Deus, esse é conhecido dele”.

I Coríntios 8:1-3

LOPES, B. O. **ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS EM HIDROCICLONE VIA CFD.** 2018, 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2018.

RESUMO

A mineração é uma atividade econômica relevante em diversos países. No tratamento de minérios, a água é um insumo indispensável. Para a classificação de minérios, a indústria mineral tem usado o processo de hidrociclonagem, onde a água é utilizada como meio para o transporte de partículas de minério dispersas, que são separadas do líquido através da força centrífuga no interior do equipamento denominado de hidrociclone. O avanço constante do poder de processamento dos computadores em conjunto com a evolução nas técnicas e métodos numéricos tem permitido simular com grande precisão problemas complexos de fluidodinâmica tal qual o escoamento em hidrociclones. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo estudar o processo de separação de partículas de minério em hidrociclones via software *Ansys Fluent*. Para a simulação fluidodinâmica utilizou-se uma modelagem matemática baseada em uma análise Euleriana-Lagrangeana. Resultados dos campos de pressão, velocidade, e fração volumétrica das fases, eficiência do processo de separação em diversas condições operacionais são apresentados e avaliados. Dos resultados verificou-se que o aumento da velocidade de escoamento na entrada do equipamento tende a aumentar o desempenho do hidrociclone na eficiência de separação até certo limite.

Palavras chave: Hidrociclone. CFD. Mineração. Simulação. Sólido-Líquido.

LOPES, B. O. NUMERICAL ANALYSIS OF THE SEPARATION PROCESS OF MINERAL PARTICLES IN HYDROCYCLONE BYCFD. 2018, 85 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Post - Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, PB, 2018.

ABSTRACT

Mining is a relevant economic activity in many countries. In the treatment of ores, water is an indispensable input. For the classification of ores, the mineral industry has used the hydrocyclone process, where water is used as the medium for transporting dispersed ore particles, which are separated from the liquid by centrifugal force inside the so-called hydrocyclone equipment. The constant advance of the processing power of the computers together with the evolution in the techniques and numerical methods has allowed to simulate with great precision complex problems of fluidodynamics like the flow in hydrocyclones. In this sense, this work aims to study the process of separation of ore particles in hydrocyclones using Ansys Fluent software. For the fluid dynamics simulation, a mathematical model based on an Eulerian-Lagrangian analysis was used. Results of pressure, velocity, and volumetric fraction phases, efficiency of the separation process under various operational conditions are presented and evaluated. From the results it has been found that increasing the flow velocity at the inlet of the equipment tends to increase the performance of the hydrocyclone in the separation efficiency to a certain extent.

Keywords: Hydrocyclone. CFD. Mining. Simulation. Solid-Liquid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Partes em um hidrociclone.....	19
Figura 2.2 – Movimento de um fluido no interior do hidrociclone	20
Figura 2.3 – Curva de eficiência granulométrica.	21
Figura 2.4 – Eficiência granulométrica reduzida.....	22
Figura 2.5 – Distribuição granulométrica na alimentação.	25
Figura 2.6 – Temas resultantes da pesquisa.	26
Figura 2.7 – Parâmetros geométricos de um hidrociclone.....	26
Figura 2.8 – Diferentes entradas para hidrociclone de 20 mm. (a) Original. (b) Entrada dupla com metade da largura. (c) Entrada dupla com a mesma largura. (d) Entrada tetra com metade da largura.....	28
Figura 2.9 – Diferentes planos superiores para hidrociclones de 20 mm. (a) Cone de 30°. (b) Cone de 45°. (c) Cone de 60°. (d) Canal guia de 180°. (e) Canal guia de 270°	29
Figura 2.10 – Ilustração de um hidrociclone com entrada em espiral	30
Figura 2.11 – Diferentes formatos de <i>vortex finder</i> em hidrociclones	31
Figura 2.12 – Diferentes formatos da região cônica em hidrociclones.....	32
Figura 2.13 – Efeito curto – circuito em hidrociclones	35
Figura 2.14 – Efeito <i>fish hook</i> em hidrociclones	37
Figura 3.1 – Hidrociclone estudado nesta pesquisa.....	47
Figura 3.2 – Malha numérica usada nas simulações - 180 mil células	49
Figura 3.3 – Fluxograma para solução numérica.	50
Figura 3.4 – Distribuição do material particulado usado nas simulações.....	54
Figura 3.5 – Fluxograma para solução da fase dispersa.	55
Figura 4.1 – Distribuição de velocidade (m/s) no plano $Y = 0$ do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência para o Caso (1): (a) $k - \epsilon$ <i>Realizable</i> , (b) $k - \epsilon$ RNG e (c) RSM.....	59
Figura 4.2 – Distribuição de pressão no plano $Y = 0$ do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência para o Caso (1): (a) $k - \epsilon$ <i>Realizable</i> , (b) $k - \epsilon$ RNG e (c) RSM.....	60
Figura 4.3 – Perfil de pressão no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência Caso (1): a) $k - \epsilon$ <i>Realizable</i> , b) $k - \epsilon$ RNG c) e RSM	61
Figura 4.4 – Perfil de velocidade tangencial no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência para o Caso (1): a) $k - \epsilon$ <i>Realizable</i> , b) $k - \epsilon$ RGN e c) RSM.	62

Figura 4.5 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais da diferença de pressão no hidrociclone em função da vazão mássica de alimentação.	63
Figura 4.6 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais da razão de líquido no hidrociclone em função da vazão mássica de alimentação.	64
Figura 4.7 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais da eficiência total reduzida no hidrociclone em função da vazão mássica de alimentação	65
Figura 4.8 – Transiente de velocidade (m/s) no plano $Y = 0$ do hidrociclone obtido com o modelo de turbulência RSM (caso 1).....	66
Figura 4.9 – Transiente de pressão (Pa) no plano $Y = 0$ do hidrociclone obtido com o modelo de turbulência RSM (caso 1)	67
Figura 4.10 – Linhas de corrente e vórtice secundário no interior do hidrociclone (caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).	68
Figura 4.11 – Tempo de residência do fluido no hidrociclone (caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).....	68
Figura 4.12 – Tempo de residência no interior do hidrociclone (caso 1, modelo de turbulência rsm, $t = 1$ s).....	69
Figura 4.13 – Velocidade das partículas no interior do hidrociclone (caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).	70
Figura 4.14 – Perfil de pressão (Pa) no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes casos. A) Caso (1). b) Caso (2). c) Caso (3).....	71
Figura 4.15 – Distribuição de velocidade no interior do hidrociclone em diferentes posições transversais ao eixo Z (caso 1, modelo de turbulência rsm, $t = 1$ s).	72
Figura 4.16 – Perfil de velocidade (m/s) no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes casos. a) Caso (1). b) Caso (2). c) Caso (3).	73
Figura 4.17 – Campo vetorial de velocidade da região superficial do hidrociclone, plano $Y = 0$	74
Figura 4.18 – Campo vetorial de velocidade da região cilíndrico-cônica, do hidrociclone, plano $Y = 0$	75
Figura 4.19 – Campo vetorial de velocidade da região cônica do hidrociclone, plano $Y = 0$	76
Figura 4.20 – Eficiência granulométrica reduzida Caso (1).....	76
Figura 4.21 – Eficiência granulométrica reduzida Caso (2).....	76
Figura 4.22 – Eficiência granulométrica reduzida Caso (3).....	76
Figura 4.23 – Eficiência granulométrica reduzida Caso (4).....	77
Figura 4.24 – Comparação entre as eficiências granulométrica reduza predita em função do diâmetro de partícula.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões do hidrociclone	47
Tabela 3.2 – Definições gerais do solver.	51
Tabela 3.3 – Modelos matemáticos e métodos para modelo de turbulência	51
Tabela 3.4 – Condições de contorno para fase contínua.	52
Tabela 3.5 – Material e propriedades físicas da fase contínua	53
Tabela 3.6 – Parâmetros do injetor usados na simulação.....	54
Tabela 3.7 – Parâmetros da fase dispersa usados na simulação.	55
Tabela 3.8 – Teste de dependência de malha.	56
Tabela 3.9 – Casos simulados utilizando os valores experimentais de Gonçalves (2016).	57
Tabela 4.1 – Teste de dependência de malha – Caso 1	58
Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais de diferentes parâmetros do processo, para todos os casos analisados	65
Tabela 4.3 – Parâmetro m da equação (2.3)	78

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro do hidrociclone	[m]
D_i	Diâmetro do duto de alimentação	[m]
l	Comprimento do <i>vortex finder</i>	[m]
L	Comprimento do hidrociclone	[m]
D_u	Diâmetro do <i>apex</i>	[m]
D_o	Diâmetro do <i>vortex finder</i>	[m]
h	Comprimento da parte cilíndrica	[m]
H	Comprimento do tronco do cone	[m]
θ	Ângulo do tronco do cone	[graus]
Q_A	Capacidade de processamento	[kg s ⁻¹]
R_L	Razão de líquido	[-]
$Q_{L,U}$	Vazão mássica de água no concentrado (<i>underflow</i>)	[kg s ⁻¹]
$Q_{L,A}$	Vazão mássica de água na entrada	[kg s ⁻¹]
G	Eficiência granulométrica	[%]
$Q_{S,U d}$	Vazão mássica de sólidos no concentrado (<i>underflow</i>)	[kg s ⁻¹]
$Q_{S,A d}$	Vazão mássica de sólidos na alimentação	[kg s ⁻¹]
d_{50}	Diâmetro de corte	[m]
G'	Eficiência granulométrica reduzida	[%]
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido	[m]
E_T	Eficiência total de separação	[-]
$Q_{S,U}$	Vazão mássica de sólidos no concentrado	[kg s ⁻¹]
$Q_{S,A}$	vazão mássica de sólido na entrada	[kg s ⁻¹]
E'_T	Eficiência total reduzida	[%]
d_p	Diâmetro da partícula	[m]
\bar{d}	Diâmetro de Rosin-Rammler	[m]
m	Parâmetro do modelo para ajuste	[-]
n	Parâmetro do modelo para ajuste	[-]
X	Concentração de sólidos	[%]
ρ	Densidade do fluido	[kg m ⁻³]
∂	Derivada parcial	[-]

t	Tempo	[s]
p	Pressão estática	[Pa]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensão	[Pa]
\vec{g}	Vetor gravitacional	[m s ⁻²]
\vec{F}	Forças externas (termo fonte)	[N]
μ	Viscosidade	[m s ⁻¹ kg ⁻¹]
I	Tensor unitário	[-]
u_i	Componente de velocidade instantânea	[m s ⁻¹]
\bar{u}_i	Componente de velocidade média	[m s ⁻¹]
u'_i	Componente de velocidade flutuante	[m s ⁻¹]
C_d	Coefficiente de arrasto da partícula	[-]
Re	Número relativo de Reynolds	[-]
τ_r	Tempo de relaxação de partículas	[s]
\dot{m}_p	Fluxo mássico de partículas	[kg s ⁻¹]
Δt	Passo de tempo	[s]

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo Geral	18
1.2 Objetivos específicos	18
1.3 Justificativa	18
CAPÍTULO 2	19
REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Hidrociclones	19
2.1.1 Descrição e princípios de funcionamento	19
2.1.2 Parâmetros de desempenho de um hidrociclone	21
<i>2.1.2.1 Capacidade de processamento</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2.2 Razão de líquido</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2.3 Eficiência granulométrica</i>	<i>22</i>
<i>2.1.2.4 Eficiência granulométrica reduzida</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2.5 Eficiência total de separação</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2.6 Eficiência total reduzida</i>	<i>24</i>
<i>2.1.2.7 Distribuição das partículas</i>	<i>24</i>
2.1.3 Estado da arte	25
<i>2.1.3.1 Efeito das variáveis geométricas nos parâmetros de desempenho</i>	<i>26</i>
<i>2.1.3.2 Efeito das variáveis operacionais na eficiência de separação</i>	<i>33</i>
<i>2.1.3.3 Fenômenos físicos no hidrociclone</i>	<i>35</i>
2.2 Fluidodinâmica Computacional	37
2.2.1 Teoria e modelagem matemática	38
<i>2.2.1.1 A equação de conservação da massa</i>	<i>38</i>
<i>2.2.1.2 A equação da Conservação da quantidade de movimento</i>	<i>38</i>
<i>2.2.1.3 Turbulência</i>	<i>39</i>
<i>2.2.1.4 Modelagem Euleriana-Lagrangeana</i>	<i>42</i>
<i>2.2.1.5 Interação fluido – partícula: acoplamento de duas vias.</i>	<i>43</i>
<i>2.2.1.6 Malha numérica</i>	<i>44</i>
CAPÍTULO 3	46
MATERIAIS E MÉTODOS	46

3.1 O problema físico	46
3.2 Softwares e geometria	46
3.2.1 Softwares	46
3.2.2 A Geometria	47
3.3 A malha numérica	48
3.4 A solução numérica das equações governantes	49
3.4.1 Fase contínua	49
3.4.1.1 Refino da malha	50
3.4.1.2 Pré-processamento (Setup).....	50
3.4.1.3 Processamento (Solution).....	53
3.4.1.4 Pós-processamento (Results)	53
3.4.2 Fase dispersa.....	53
3.4.2.1 Propriedades físicas da fase dispersa.....	54
3.4.2.2 Parâmetros do injetor na alimentação.....	54
3.4.2.3 Parâmetros da fase dispersa	55
3.4.2.4 Contagem em regime permanente	56
3.4.3 Eficiência de separação	56
3.4.4 Validação do modelo e teste de dependência de malha.....	56
CAPÍTULO 4	56
RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Seleção da malha numérica e modelo de turbulência	58
4.2 Validação do modelo	63
4.3 Análise hidrodinâmica do hidrociclone, Caso (1)	66
4.3.1 Transiente de pressão e velocidade	66
4.3.2 Trajetória das partículas e linhas de corrente	67
4.3.3 Perfis de pressão	70
4.3.4 Perfis e vetores de velocidade	72
4.4 Análise da eficiência de separação.....	76
CAPÍTULO 5	79
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	79
5.1 Conclusões	79
5.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	80
REFERÊNCIAS.....	81

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais e, devido a isto, apresenta grande quantidade e diversidade de riquezas naturais, onde se pode enfatizar a mineração como setor básico para o desenvolvimento socioeconômico do país. Segundo dados da VALE, em 2017, a participação da mineração na economia brasileira é cada vez maior. A contribuição da mineração para a produção total e PIB do país, que era de 0,4% em 1950, subiu para cerca de 1,0% em 1980, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração. Em 2013, o setor representou 4%, de acordo com o Portal Brasil e tem previsão para aumentar a sua participação para 5% em 2017. Segundo Penna (2009), a atividade demanda grande quantidade de água, podendo levar a alguns impactos ambientais como: aumento da turbidez; metais pesados (altamente tóxicos); assoreamento de rios; poluição do ar, principalmente por material particulado; perdas de grandes áreas de ecossistemas nativos ou de uso humano.

A água é usada na mineração em vias de transporte de minério. A separação do minério da água é feita geralmente em grandes reservatórios por decantação. Partículas menores necessitam de processos físicos e químicos para separação. Um dos processos físicos de grande importância na mineração é a separação em hidrociclones, usado em lavagem e classificações que necessitam de unidades compactas, muito menores que os separadores gravitacionais para a mesma capacidade instalada, apresentando assim um menor impacto ambiental, além de oferecer a possibilidade de aumento da produtividade.

O hidrociclone apresenta pequeno custo de investimento além de um controle operacional relativamente simples. No entanto, a faixa de operação ideal para cada configuração geométrica é restrita e nesse caso são necessários equipamentos distintos para cada objetivo. Em uma planta industrial, é necessário que esses equipamentos estejam organizados em conjuntos, podendo ser dispostos em série e ou paralelo, para cumprir as diversas etapas do processamento de minérios.

Sabendo que a variação das medidas geométricas e condições de operação modificam o tipo de aplicação e influenciam diretamente no desempenho de um hidrociclone, o projeto desses equipamentos pode ser realizado por comparação dos parâmetros de desempenho, seja por meio de experimentos ou fluidodinâmica computacional (CFD).

O uso de simulação CFD em sistemas termomecânicos tem se tornado cada vez mais intenso nas últimas décadas, principalmente devido ao fato do avanço da técnica e dos

hardwares. Com esse avanço foi possível a elaboração de modelos físicos mais realistas com resultados mais precisos e mais rápidos, podendo algumas vezes ser até mais econômico devido ao fato de diminuir o número de protótipos e experimentos necessários.

1.1 Objetivo Geral

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo estudar numericamente o processo de separação de partículas minerais em hidrociclones via CFD.

Como objetivos específicos podem-se citar:

1.2 Objetivos específicos

- a) Apresentar uma modelagem matemática para descrever o escoamento bifásico sólido-fluido no interior do equipamento;
- b) Avaliar via CFD, a hidrodinâmica do escoamento e eficiência de separação do hidrociclone em diferentes condições operacionais do hidrociclone;
- c) Comparar os resultados teóricos e experimentais reportados na literatura, a fim de validar a modelagem matemática proposta.
- d) Comparativo entre modelos de turbulência $k - \epsilon$ e RSM.

1.3 Justificativa

A tecnologia de hidrociclones é largamente utilizada na mineração e devido a isto está em constante evolução. A grande variedade de processos e aplicações requer um maior investimento em pesquisa e desenvolvimento de hidrociclones para aplicações específicas, pois apesar dos estudos realizados a respeito do tema, ainda não existe uma descrição detalhada que se aplique a todos os casos necessários. Este estudo pretende aplicar as técnicas de CFD ao fenômeno do escoamento em hidrociclones, de modo a obter um melhor entendimento dos parâmetros aplicados às simulações de separação sólido – líquido através da abordagem Euler – Lagrange.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Hidrociclones

2.1.1 Descrição e princípios de funcionamento

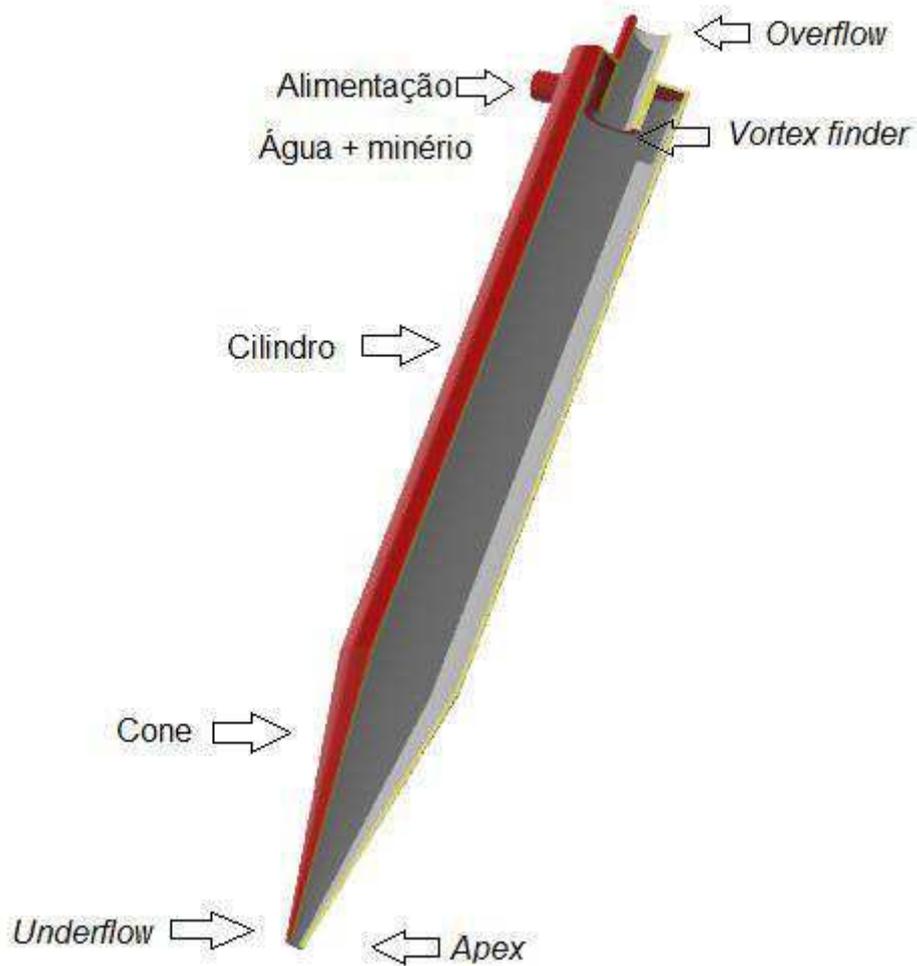
Hidrociclones são equipamentos amplamente usados por mineradoras para separação e classificação sólido-líquido através de força centrífuga. Seu uso pode ser aplicado para outras áreas como a petrolífera, na separação do óleo e água, e em outras aplicações menos frequentes como agricultura, na separação de sedimentos de areia da água de irrigação, separação de polímeros de diferentes densidades e classificação de materiais raros.

A existência de hidrociclones é datada de 1890, mas apenas em 1940, é que a fabricação desses equipamentos utilizou tecnologias mais avançadas (SVAROVSKY, 2000). Apresentam algumas vantagens por serem equipamentos de baixo custo de aquisição, ter capacidade de processamento elevada para o volume que ocupa e partes fixas, que reduz custos de manutenção. Por outro lado, no caso de classificação de minério abrasivo, os custos de manutenção dos equipamentos e bombas se tornam elevados. Outra desvantagem é que aplicações distintas requerem equipamentos com características geométricas distintas. Além disso, variação na condição de operação altera o desempenho do equipamento.

Em geral, o hidrociclone é formado por uma parte cônica unida de forma coaxial a uma parte cilíndrica, onde é instalada uma entrada tangencial disposta desta forma com o objetivo de criar um movimento rotativo do fluido no seu interior. Na parte superior há um tubo de saída denominado *vortex finder* por onde sai a parte menos densa (*overflow*) e na parte inferior há o *apex* por onde sai a parte mais densa (*underflow*). A Figura (2.1) mostra em detalhes as partes do equipamento.

O movimento do fluido no interior do hidrociclone é semelhante ao que ocorre em furacões e ciclones atmosféricos, Figura (2.2) onde ocorre a conservação do momento angular da corrente do fluido e, com isso, há um aumento da rotação para menores distâncias em relação ao eixo central, fazendo com que a velocidade absoluta seja muito maior que na periferia (MORAES *et al.*, 2009).

Figura 2.1 – Partes em um hidrociclone.

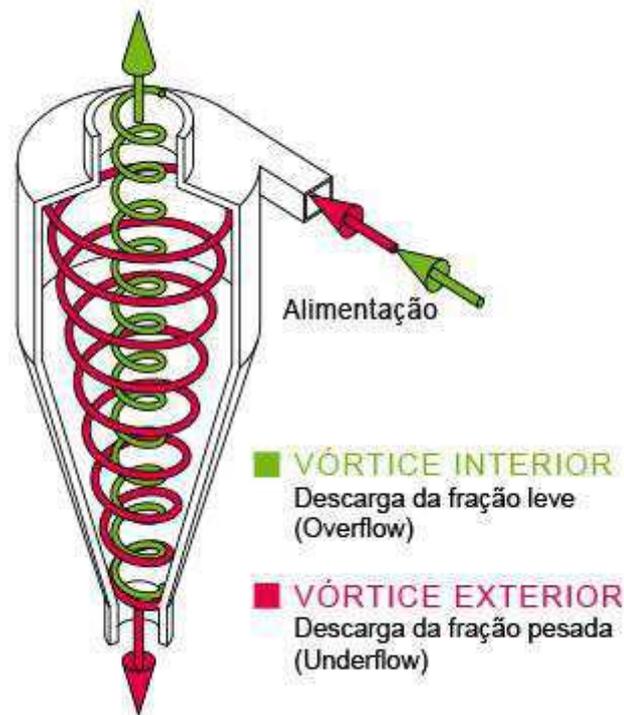


O mecanismo básico de separação em um hidrociclone se dá pela combinação dos efeitos do arrasto e da inércia sobre a fase dispersa. O efeito rotacional do fluido no interior do equipamento provoca uma força centrífuga levando a parcela mais densa para a periferia do equipamento, onde o mesmo é deslocado para o *underflow* seguindo o fluxo descendente. A parcela da fase dispersa, que não atingiu a periferia, sai do equipamento através do *overflow* seguindo o vórtice secundário, explicando desse modo como ocorre a classificação de partículas no interior do hidrociclone.

2.1.2 Parâmetros de desempenho de um hidrociclone

Esta seção descreve os principais parâmetros de desempenho na análise do equipamento.

Figura 2.2 – Movimento de um fluido no interior do hidrociclone.



Fonte: (AKW, 2017)

2.1.2.1 Capacidade de processamento

Define-se capacidade de processamento como sendo a vazão volumétrica alimentada no equipamento em litros por segundo, representada por, Q_A .

2.1.2.2 Razão de líquido

Em um hidrociclone uma parte da fase contínua deixa o equipamento pelo *underflow*. No caso da separação líquido-sólido, a razão entre a vazão de líquido que sai pelo *underflow* e a vazão de líquido da alimentação é chamada de razão de líquido, sendo dado como segue:

$$R_L = \frac{Q_{L,U}}{Q_{L,A}} \quad (2.1)$$

onde R_L é a razão de líquido, $Q_{L,U}$ é a vazão mássica de água no concentrado (*underflow*), $Q_{L,A}$ é a vazão mássica de água na entrada, dada em kg/s. A razão de líquido está relacionada ao poder de classificação e eficiência do equipamento. Para maiores quantidades de fluido no

underflow tem-se uma maior quantidade de sólidos e com isso maior eficiência. Porém, caso o objetivo seja obter uma corrente concentrada, uma menor razão de fluido deve ser obtido e, nesse caso, uma menor eficiência é observada (GONÇALVES, 2016).

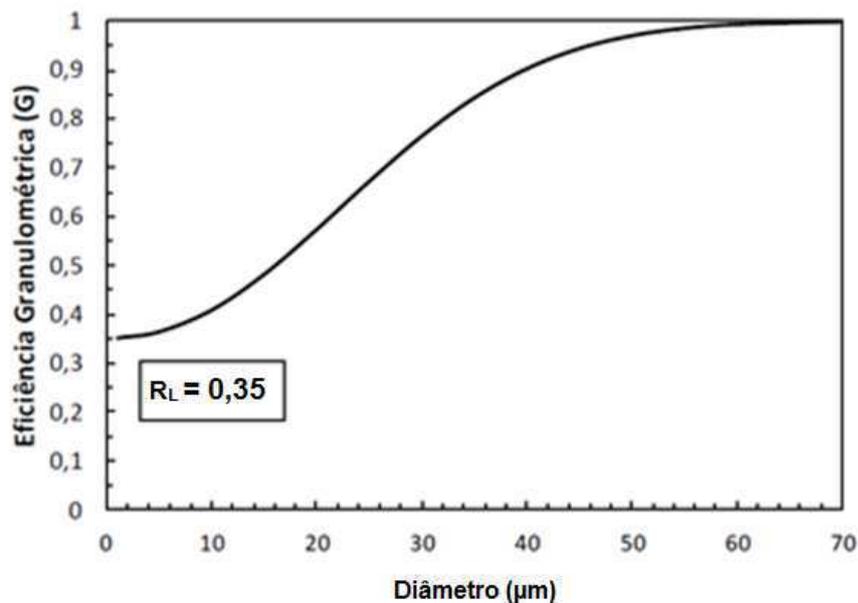
2.1.2.3 Eficiência granulométrica

A eficiência granulométrica, Equação (2.2), é a razão entre a vazão mássica de sólidos no concentrado (*underflow*) e a vazão mássica de sólidos na alimentação. Considerando que o material particulado apresenta uma variação de diâmetro, é possível mostrar uma curva da eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula, Figura (2.3).

$$G = \frac{Q_{S,U|d}}{Q_{S,A|d}} \quad (2.2)$$

onde G é a eficiência granulométrica em um dado diâmetro, $Q_{S,U|d}$ é a vazão mássica de sólido no concentrado (*underflow*) e $Q_{S,A|d}$ é a vazão mássica de sólido na entrada, em kg/s.

Figura 2.3 – Curva de eficiência granulométrica.



Fonte: adaptado de ALVES (2012).

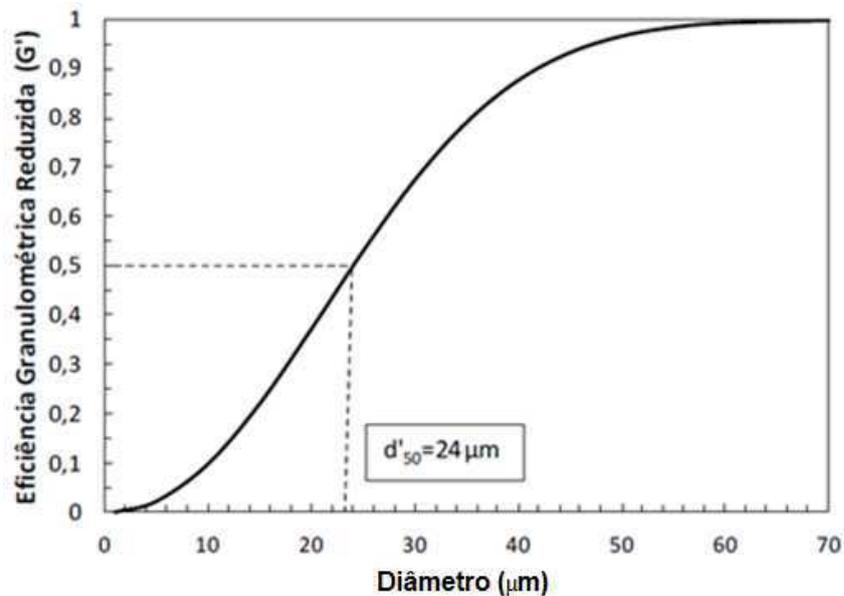
2.1.2.4 Eficiência granulométrica reduzida

Segundo Alves (2012), uma parte do sólido é separada não apenas pela ação da força centrífuga, mas também pela divisão de corrente devido às duas saídas de correntes. A parcela do sólido que foi separado exclusivamente pela ação da força centrífuga é chamada de eficiência granulométrica reduzida, sendo dado como segue:

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{d_p}{d'_{50}} \right)^m \right] \quad (2.3)$$

onde G' é a eficiência granulométrica reduzida, d_p é o diâmetro da partícula e d'_{50} é o diâmetro de corte reduzido com 50% de probabilidade de ser separado, e m é um parâmetro do modelo de eficiência granulométrica reduzida, Figura (2.4).

Figura 2.4 – Eficiência granulométrica reduzida.



Fonte: adaptado de ALVES (2012).

2.1.2.5 Eficiência total de separação

A eficiência total de separação engloba a razão entre a vazão mássica de sólidos no concentrado e a vazão mássica na alimentação, independente do diâmetro de partícula. É dada por:

$$E_T = \frac{Q_{S,U}}{Q_{S,A}} \quad (2.4)$$

onde E_T é a eficiência total de separação, $Q_{S,U}$ é a vazão mássica de sólido no concentrado (*underflow*) e $Q_{S,A}$ é a vazão mássica de sólido na entrada, em kg/s.

2.1.2.6 Eficiência total reduzida

Semelhante à eficiência total de separação, é possível calcular a eficiência total reduzida (ALVES, 2012), conforme dado pela Equação (2.5):

$$E'_T = \frac{E_T - R_L}{1 - R_L} = \int_0^1 G' dX \quad (2.5)$$

ou ainda, onde n é o expoente de Rosin-Rammler e m é o expoente da curva de eficiência granulométrica reduzida.

$$E'_T = \int_0^1 \left\{ 1 - \exp \left[-0,693 \left([-\ln(1 - X)]^{\frac{1}{n}} \frac{\bar{d}}{d_{50}} \right)^m \right] \right\} dX \quad (2.6)$$

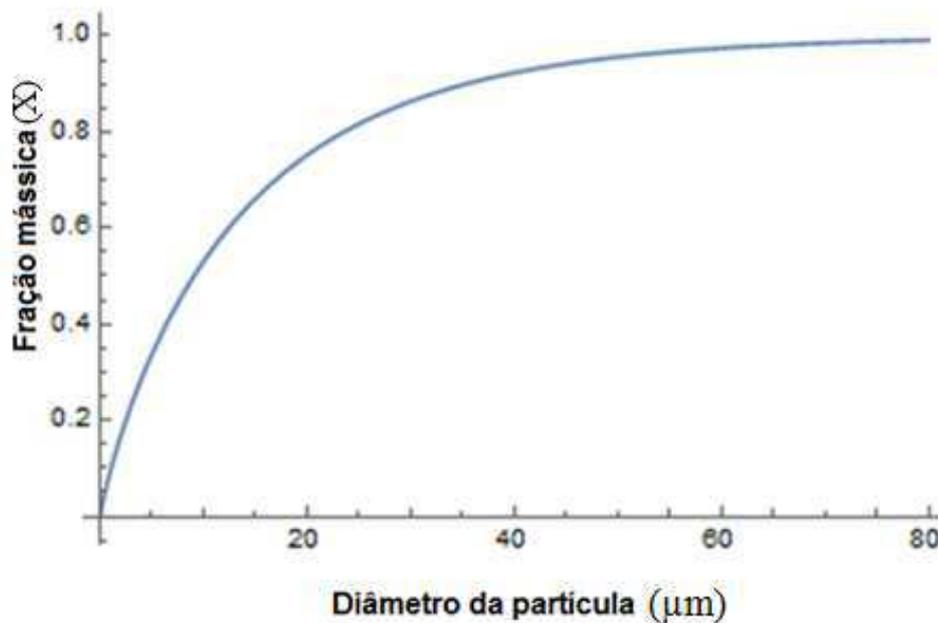
2.1.2.7 Distribuição das partículas

Uma representação conveniente da distribuição de tamanho de partículas é a expressão de Rosin-Rammler. A distribuição de Rosin-Rammler, pode ser escrita como segue:

$$1 - X = \exp \left[\left(-\frac{d_p}{\bar{d}} \right)^n \right] \quad (2.7)$$

onde X representa a fração em massa das partículas na alimentação cujo maior diâmetro é representado por d_p , \bar{d} é o diâmetro de Rosin-Rammler, e n é o expoente de Rosin-Rammler (ANSYS, 2017). Na Figura (2.5), tem-se um exemplo de distribuição granulométrica na alimentação. Nesse exemplo, 100% das partículas têm diâmetro menor que 80 μm , enquanto aproximadamente 50% das partículas têm diâmetro menor que 10 μm .

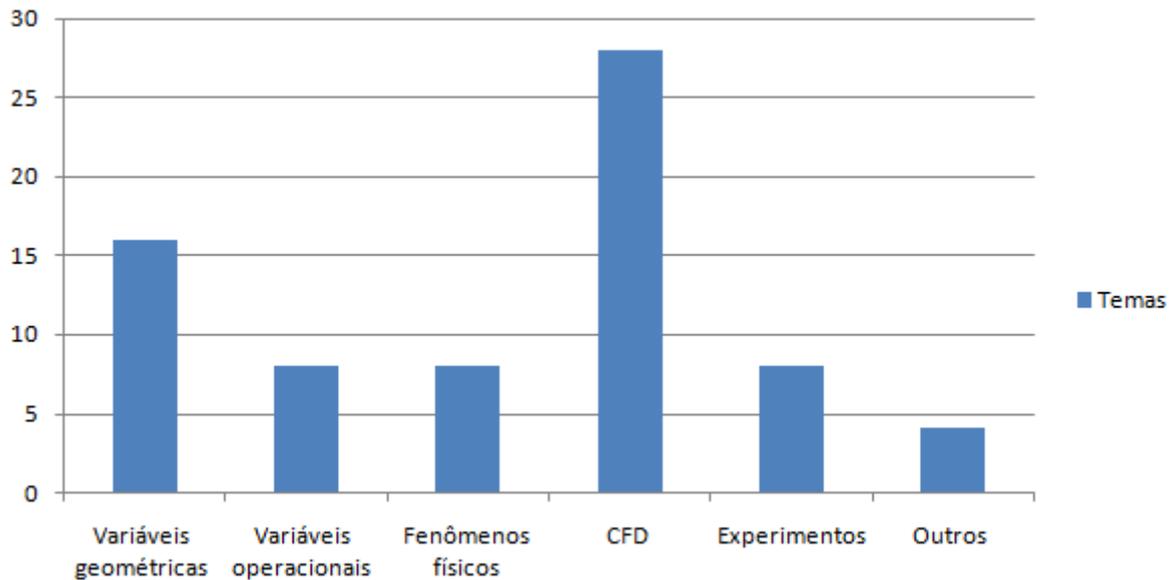
Figura 2.5 – Distribuição granulométrica na alimentação.



2.1.3 Estado da arte

As palavras chave “Hidrociclone, CFD, *solid-liquid*, Lagrange, RSM” foram usadas para pesquisa do material usado na revisão da literatura para este trabalho, resultando em 370 trabalhos, entre 2012 e 2017, dos quais, os trabalhos mais relevantes para o objeto de estudo, foram citados nesta revisão. Uma análise geral dos trabalhos mostrou que existem temas específicos abordados que podem ser divididos em diferentes grupos. Há aqueles que utilizaram ferramentas computacionais e experimentos, e outros mais específicos que usam outras ferramentas. As análises citadas foram principalmente focadas nas variáveis geométricas e operacionais, e as suas relações com os fenômenos físicos e desempenho de hidrociclones usando as ferramentas CFD. Sendo assim, buscou-se estruturar o texto de forma a explicar o estado da arte sobre hidrociclones, separando os temas referentes à geometria e operadores como variáveis de entrada, e os fenômenos físicos e parâmetros de desempenho como variáveis de saída através de ferramentas CFD e experimentos. A Figura (2.6) mostra o quantitativo dos temas resultantes da pesquisa.

Figura 2.6 – Temas resultantes da pesquisa.



2.1.3.1 Efeito das variáveis geométricas nos parâmetros de desempenho

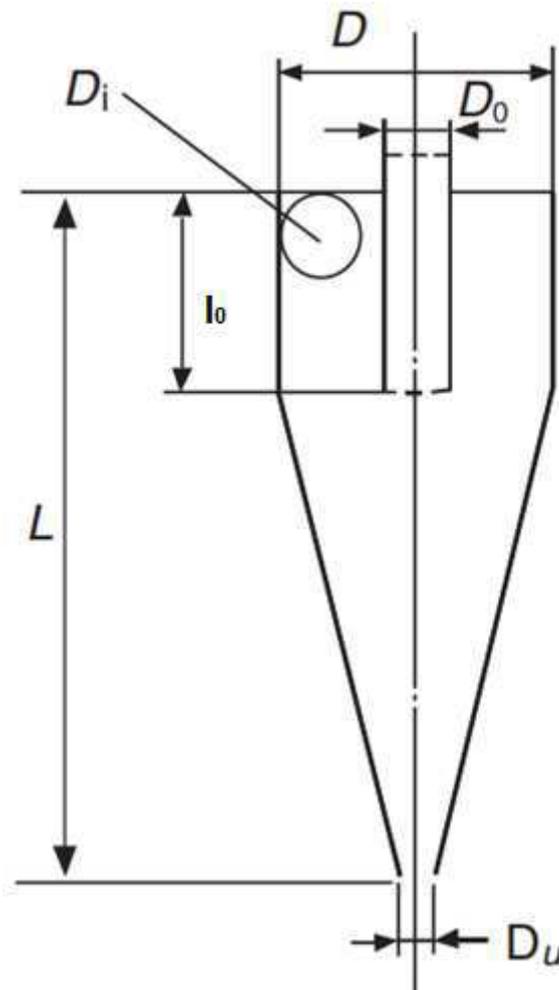
Em hidrociclones, as variáveis geométricas apresentam influência direta nos parâmetros de desempenho do equipamento. Algumas características de desempenho apresentam comportamento oposto à outras para a mesma variação na geometria. Isso faz com que não seja possível obter um modelo de hidrociclone ideal para todas as aplicações. Para efeito de melhor entendimento, as variáveis geométricas foram divididas em cinco regiões, a saber: região de entrada, região cilíndrica, região cônica, região do *vortex finder* e região do *apex*. Em hidrociclones tradicionais, essas regiões apresentam geralmente formatos cilíndricos e ortogonais onde são alterados apenas os valores dos comprimentos e diâmetros das partes fundamentais. Novos conceitos de hidrociclones surgiram com o tempo propondo mudanças, não apenas nas dimensões base, mas também no formato. Alguns desses novos conceitos apresentam melhorias em algumas características de desempenho sem necessariamente prejudicar outras e, com isso, vêm se tornando cada vez mais usuais. Entre os parâmetros de desempenho, o poder de concentração e capacidade de processamento geralmente são características que se deslocam para lados opostos com a variação da geometria. Nesse, e em vários outros casos, a geometria é escolhida de acordo com as características desejadas.

De modo geral, hidrociclones de diâmetros maiores apresentam maior capacidade de processamento, em contrapartida tendem a aumentar o diâmetro de corte d_{50} . A parte cônica de ângulos menores ajuda a diminuir a razão de fluido enquanto diminuem a capacidade de

processamento. O comprimento do *vortex finder* pode impactar no diâmetro de corte e eficiência total de separação. Neste caso, deve – se escolher um comprimento adequado. Por outro lado os diâmetros do *vortex finder* e *apex* influenciam na razão de líquido e eficiência total de separação.

Svarovsky (2000) apresenta como dimensões fundamentais de um hidrociclone: diâmetro da parte cilíndrica (D), diâmetro do *overflow* (D_o), diâmetro da entrada (D_i), comprimento do vortex finder (l), diâmetro do *underflow* (D_u), comprimento total (L), conforme ilustrado na Figura (2.7).

Figura 2.7 – Parâmetros geométricos de um hidrociclone.



Fonte: SVAROVSKY (2000).

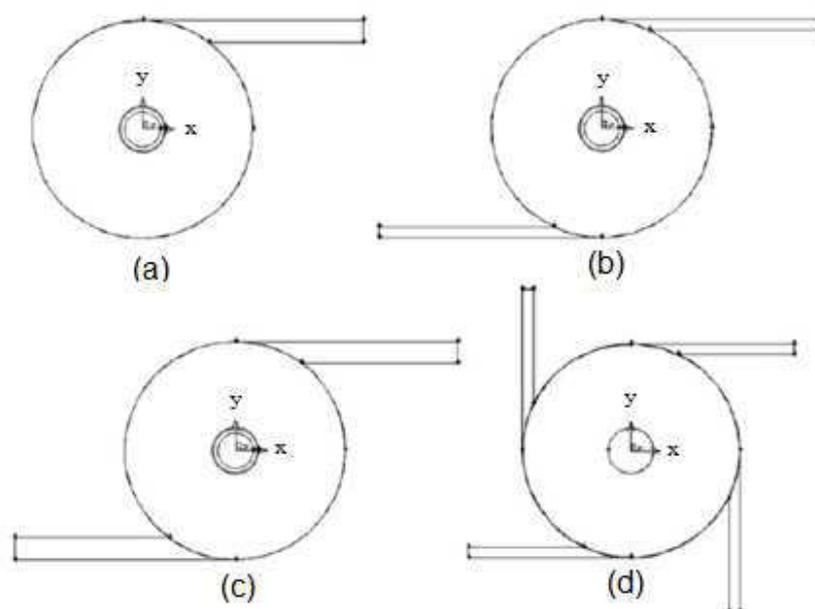
Detalhes mais específicos a respeito da influência da geometria foram analisados a partir de artigos recentes em periódicos especializados, como mostrados a seguir:

a) Região da entrada

Diversos estudos já foram realizados para avaliar os efeitos da região de alimentação na eficiência de hidrociclones. Em geral, esses estudos buscam soluções para diminuir a perda de carga, atrito nas paredes opostas às entradas, efeitos como “fluxo de curto circuito”, que seria um atalho por onde as partículas passam para a saída do diluído, redução de turbulência na entrada e maior uniformidade do escoamento no interior do equipamento.

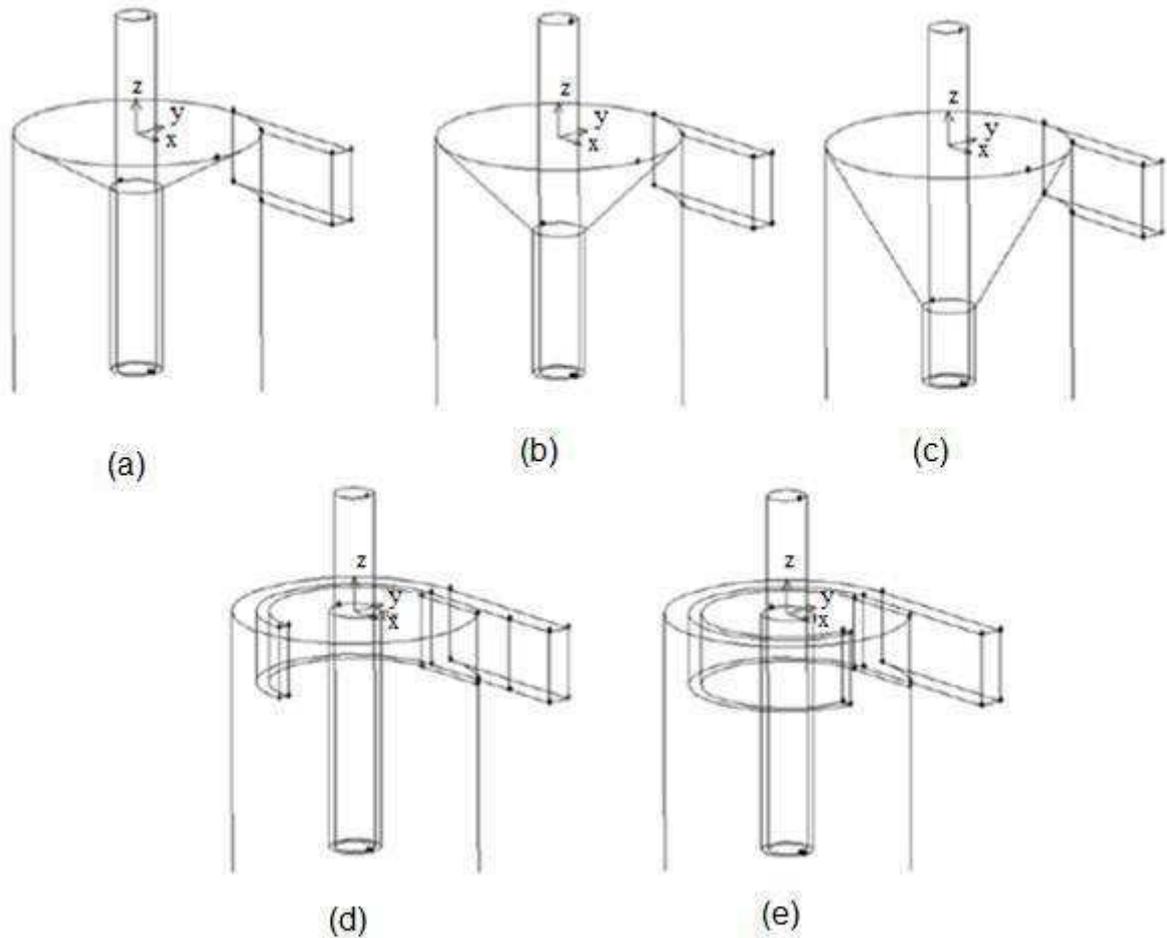
Hwang *et al.* (2013) estudaram o efeito do número de entradas, largura da entrada, o ângulo do plano superior da região cilíndrica e canais para guiar a trajetória do fluido de alimentação, no desempenho do hidrociclone. De acordo com os autores, o efeito dos planos superiores em ângulo e canais guia, foi o de proporcionar uma maior eficiência granulométrica para menores diâmetros de partículas, no hidrociclone com apenas uma entrada. Além disso, os autores verificaram que o aumento do número de entradas combinados à menor largura de alimentação aumenta a eficiência de separação para todas as faixas granulométricas. Nas Figuras (2.8) e (2.9) são mostrados desenhos esquemáticos de hidrociclones com vários tipos de entradas.

Figura 2.8 – Diferentes entradas para hidrociclone de 20 mm. (a) Original. (b) Entrada dupla com metade da largura. (c) Entrada dupla com a mesma largura. (d) Entrada tetra com metade da largura.



Fonte: adaptado de HWANG *et al.* (2013).

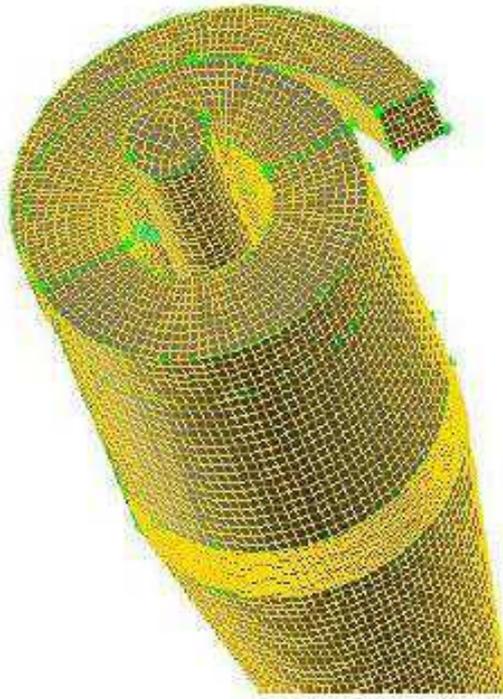
Figura 2.9 – Diferentes planos superiores para hidrociclones de 20 mm. (a) Cone de 30°. (b) Cone de 45°. (c) Cone de 60°. (d) Canal guia de 180°. (e) Canal guia de 270°.



Fonte: adaptado de HWANG *et al.* (2013).

Zhang *et al.* (2013) estudaram via CFD o efeito da entrada em formato espiral quando comparado ao formato tradicional. A Figura (2.10) mostra a malha numérica utilizada pelos autores. Os resultados mostraram que o formato em espiral provoca um aumento da velocidade na entrada, para a mesma diferença de pressão, resultando em uma melhor distribuição de pressão no interior do equipamento e uma maior eficiência de separação. Zhang *et al.* (2017) estudaram diferentes raios de curvatura para entrada em formato espiral e mostraram que o aumento de eficiência está relacionado ao aumento na velocidade tangencial e maior estabilidade do núcleo gasoso para entradas com menores raios de curvatura.

Figura 2.10 – Ilustração de um hidrociclone com entrada em espiral.



Fonte: ZHANG *et al.* (2013).

b) Região do vortex finder

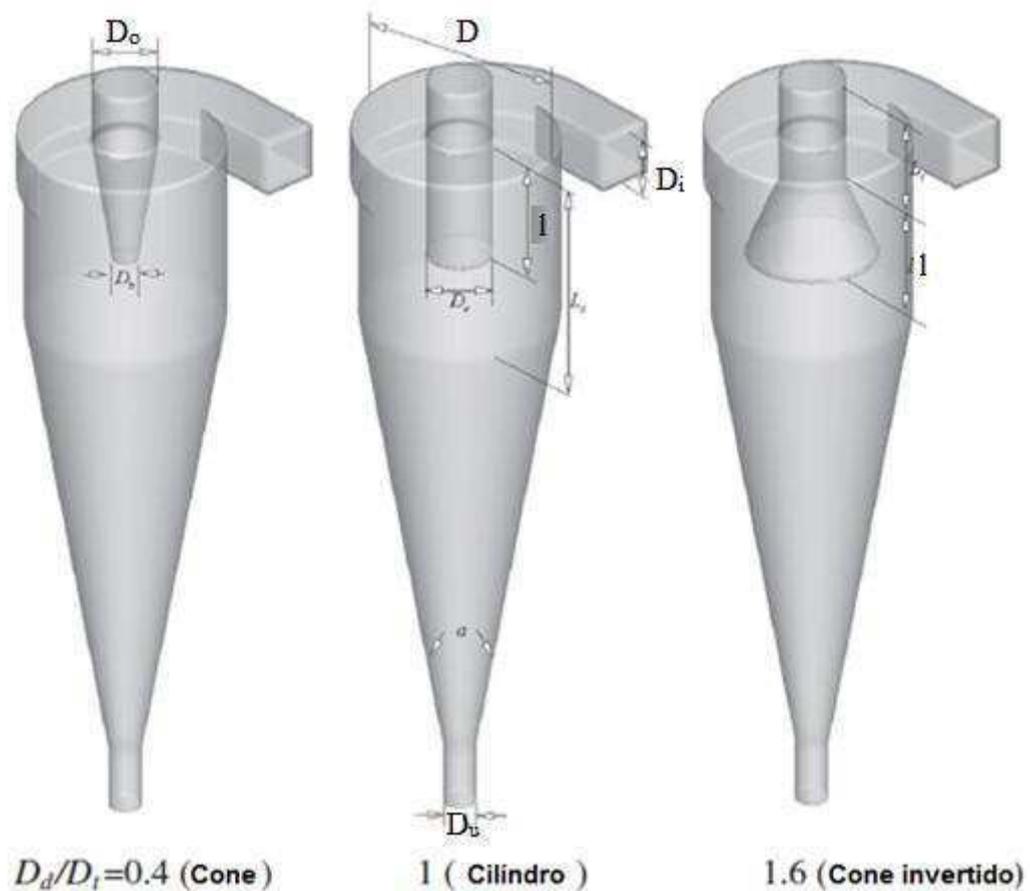
He *et al.* (2013) estudaram cinco diferentes comprimentos de *vortex finder* e observaram que o seu comprimento interfere na velocidade tangencial e no vórtice ascendente, impactando, dessa forma, na eficiência de separação e diâmetro de corte d_{50} . A melhor eficiência de separação ocorreu para a relação comprimento e diâmetro do hidrociclone $l/D = 1,32$, ver Figura 2.7, indicando que existe uma relação de comprimento ideal para maximizar a eficiência de separação.

A Figura (2.11) mostra diferentes formatos de *vortex finder* estudados por Ghodrat *et al.* (2014a). Segundo os autores, o efeito do comprimento do *vortex finder* na eficiência de separação é muito menor que aqueles provocados pelo diâmetro e forma e, além disso, a forma e diâmetro são sensíveis à concentração de alimentação. Algumas características de desempenho como nitidez de separação (inclinação da curva de eficiência granulométrica próximo à região do diâmetro de corte d_{50}) são afetadas pela forma e diâmetro do *vortex finder*.

Vieira *et al.* (2014) estudaram o efeito da variação do diâmetro do *vortex finder*, nos parâmetros de processo. Os autores observaram que essa variação afetou os valores de razão de líquidos, eficiência de separação e número de Euler.

Hwang *et al.* (2017) observaram que o formato do *vortex finder* apresenta relação com o tempo de residência da partícula e diâmetro de corte. Já Cui *et al.* (2017) relacionaram o diâmetro do *vortex finder* e espessura da parede ao nível de turbulência e estabilidade do escoamento.

Figura 2.11 – Diferentes formatos de *vortex finder* em hidrociclones.



Fonte: adaptado de GHODRAT *et al.* (2014a).

c) Região cilíndrica

O diâmetro da região cilíndrica está relacionado à capacidade de processamento e diâmetro de corte, mas, dependendo da distribuição granulométrica na alimentação, pode

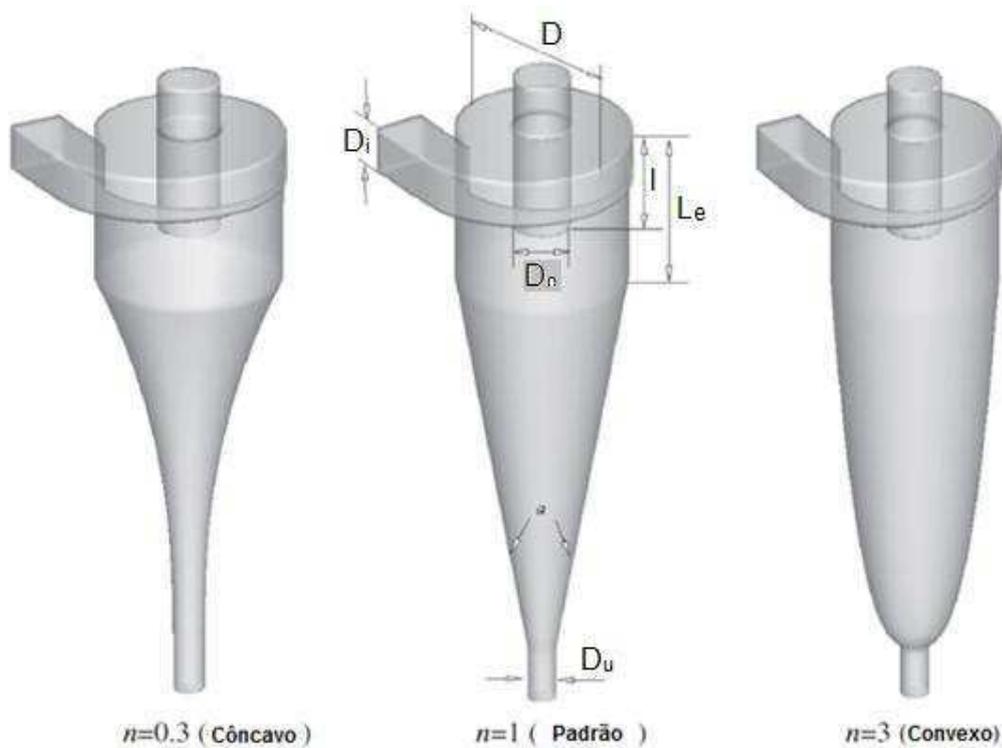
interferir na eficiência total de separação. O comprimento da região cilíndrica pode interferir na nitidez de separação e capacidade de processamento (SVAROVSKY, 2000).

d) Região cônica

A região cônica influencia na velocidade tangencial e vórtice no interior do equipamento que, por sua vez, altera as características de desempenho do mesmo. Não somente o comprimento, mas também o ângulo e formato da região cônica influenciam o desempenho do equipamento.

Ghodrat *et al.* (2014b) estudaram via CFD, hidrociclones com a região cônica padrão, côncava e convexa, para diferentes comprimentos e diferentes concentrações de sólidos. A Figura (2.12) mostra os formatos de diferentes regiões cônicas, reportadas pelos autores.

Figura 2.12 – Diferentes formatos da região cônica em hidrociclones.



Fonte: GHODRAT *et al.* (2014b).

Ghodrat *et al.* (2014b) verificaram que o aumento do comprimento da região cônica aumentou a eficiência de separação, mas esse efeito foi mais significativo para menores concentrações de sólidos. A pressão de alimentação e o diâmetro de corte diminuíram com o

aumento do comprimento do cone, independente da concentração de sólidos. Valores da razão de líquidos aumentaram com o comprimento do cone. Os valores da diferença de pressão, razão de líquido e diâmetro de corte foram afetados pelo formato da região cônica. De modo geral, os valores de diferença de pressão e razão de líquidos tenderam a aumentar para o formato côncavo e diminuir para o convexo, enquanto que o diâmetro de corte se comportou de maneira oposta, aumentando para o convexo e diminuindo para o côncavo. O formato padrão assumiu valores médios.

e) Região do Apex

Gonçalves (2016) estudou experimentalmente o efeito da variação do diâmetro do *apex* em hidrociclones para diferentes concentrações de alimentação e diferença de pressão. A eficiência de separação e o número de Euler aumentaram com o aumento do diâmetro do *apex*, enquanto que a concentração de sólidos no *underflow* diminuiu com o aumento do diâmetro.

Dubey *et al.* (2016) estudaram a relação entre o ângulo de descarga do *apex* com os parâmetros de desempenho do hidrociclone. O aumento da concentração de sólidos na alimentação apresenta tendência de diminuir o ângulo do jato de descarga na saída inferior. Por sua vez a diminuição do ângulo do jato de descarga, na saída inferior, apresentou influencia na diminuição do diâmetro de corte.

Ni *et al.* (2016) estudaram o efeito do diâmetro do *apex* e observou resultados semelhantes aos de Gonçalves (2016). Na pesquisa dos autores, o aumento do diâmetro aumentou a razão de líquidos e apresentou influência na eficiência de separação. O valor da eficiência tendeu a aumentar inicialmente com o aumento do diâmetro até chegar a um valor máximo declinando em seguida com a continuação do aumento do diâmetro.

2.1.3.2 Efeito das variáveis operacionais na eficiência de separação

As condições operacionais em um hidrociclone influenciam no seu desempenho. As condições operacionais estão limitadas às características da fase discreta como concentração, distribuição de diâmetros e formatos de partículas, além de condições do ambiente como a pressão atmosférica e temperatura, a vazão de alimentação e, por fim, o meio de separação. Em alguns casos, as condições operacionais apresentam relação entre si podendo o

desempenho ser diferente para a mesma variação diante da alteração de alguma outra condição. A seguir são mostrados alguns resultados de estudos focados nas condições operacionais de hidrociclones.

a) Meio

Hidrociclones podem ser usados como classificadores para separação de materiais particulados diferentes em um mesmo meio. Fu *et al.* (2017) estudaram o efeito da densidade média do meio na eficiência de separação de partículas de diferentes densidades e concluíram que existe um valor de densidade média para o caso em questão que maximiza a eficiência de separação.

b) Condições operacionais relacionados à fase discreta

Chu *et al.* (2012) realizaram simulações via CFD em hidrociclones e observaram que o aumento da densidade das partículas melhora eficiência de separação.

Kashiwaya *et al.* (2012) estudaram a influencia do formato das partículas na separação. Os autores observaram que partículas com formato diferente do esférico apresentam comportamento diferente em relação à variação de velocidade na alimentação.

Kuang *et al.* (2012) observaram em hidrociclones que, quando a concentração de sólidos aumenta, a eficiência de separação diminui, a razão de líquidos aumenta até um valor máximo e em seguida diminui, a diferença de pressão diminui até um valor mínimo e em seguida passa a aumentar.

Para Gonçalves *et al.* (2017), os efeitos da concentração de sólidos foram semelhantes à Kuang *et al.* (2012), em relação à eficiência de separação. Contudo, os valores de razão de líquido tanto podiam aumentar com o aumento da concentração, como também diminuir, sendo relacionado também ao diâmetro do *apex*. Para diâmetros do *apex* menores houve um aumento na razão de líquido.

c) Pressão de alimentação

Gonçalves (2016) realizou experimentos em hidrociclones variando a diferença de pressão, entre a entrada e saída superior, e constatou aumento na eficiência total de separação

para valores elevados de pressão na alimentação, chegando até um limite superior para o qual a eficiência não aumentou significativamente. Os valores de diferença de pressão influenciam também, na concentração de sólidos na saída e na razão de líquidos.

d) Pressão de saída

Xu *et al.* (2012) estudaram o efeito de operação de hidrociclones em baixas pressões atmosféricas, sobre o desempenho do equipamento. Os autores concluíram que o efeito do *air core* aumenta, enquanto que a eficiência de separação tende a diminuir.

e) Ângulo de inclinação

Vakamalla *et al.* (2014) estudaram o efeito do ângulo inclinação no desempenho de hidrociclones e constataram que, em pressões elevadas, maiores inclinações tenderam a diminuir a razão de líquido. O diâmetro de corte sofreu uma leve diminuição, ocorreu diminuição no diâmetro do *air core* e uma maior concentração de sólidos no *underflow*.

2.1.3.3 Fenômenos físicos no hidrociclone

a) Air core

Dependendo das condições de operação, o escoamento pode apresentar a formação de um núcleo central gasoso devido à baixa pressão na região central provocada pela rotação do líquido. No caso de ambas as saídas estiverem abertas para atmosfera, o núcleo central será formado por ar, denominado *Air Core* (VIEIRA, 2006).

Para Chu *et al.* (2012), Xu *et al.* (2012) e Ghadirian *et al.* (2012), a pressão de saída influencia na formação do *air core*. Já Narasimha *et al.* (2012) relacionam o diâmetro do *air core* à concentração de sólidos, diâmetro e comprimento do *vortex finder*. Do ponto de vista da simulação, Ghadirian *et al.* (2012) indicam que a malha, condições iniciais e modelo de turbulência são influenciadores do surgimento do *air core* na simulação CFD.

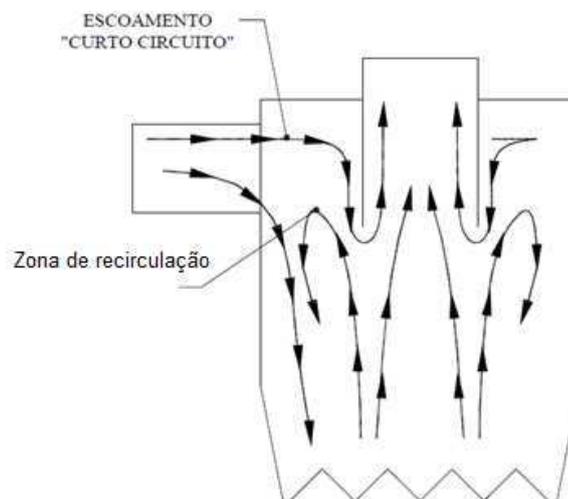
Xu *et al.* (2017) estudaram através do modelo de turbulência RSM, a formação e estabilização do *air core* sob diferentes condições de velocidade na entrada, viscosidade do

fluido e pressão atmosférica. Concluíram que o estado permanente do núcleo de ar apresenta três fases distintas, uma primeira fase de estabilidade, uma segunda fase de instabilidade e uma terceira fase novamente de estabilidade. Os fatores operacionais não afetaram o estado permanente do *air core*, exceto quando se aumenta a velocidade de entrada, proporcionando um aumento nas velocidades tangenciais e diâmetro do *air core*. Em diferentes partes do hidrociclone, o *air core* apresentou comportamento diferente, se mantendo estável próximo ao *vortex finder* e região cilíndrica, mas se mantendo instável na região cônica.

b) Fluxo de curto – circuito

Um fluxo de curto – circuito, Figura (2.13), pode ocorrer próximo à entrada e a parede externa do *vortex finder* devido ao gradiente de pressão e da diferença de tamanho entre o *vortex finder* e o vórtice secundário ascendente. Nesta figura ilustra-se o fenômeno onde a alimentação segue um caminho preferencial diretamente para o *overflow*. Essa situação é indesejável, pois a parcela de partículas que passam pelo curto – circuito não é classificada.

Figura 2.13 – Efeito curto – circuito em hidrociclones.



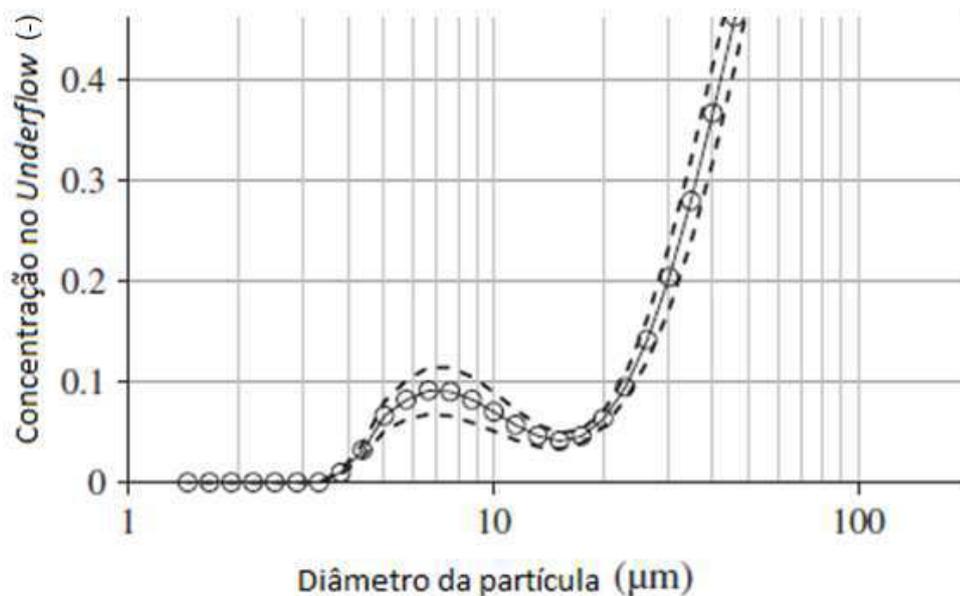
Fonte: Adaptado de TONIN (2012).

c) Efeito fish hook

O chamado efeito *fish hook*, anzol de pesca em português, é caracterizado por uma distorção na curva de eficiência granulométrica, na região de menores diâmetros de partículas,

próximos a 10 μm (Figura 2.14), que deixa a curva com aspecto semelhante à ponta de um anzol de pesca, daí o nome. Este efeito é motivo de controvérsia, pois alguns pesquisadores consideram que o efeito é resultado de erros de medição, tanto para trabalhos que usam práticas experimentais, como também alguns trabalhos em CFD. Neste último caso, os autores consideraram a distorção na curva como erros de medição e o desconsideraram nos resultados. Bourgeois e Majumder (2013) realizaram uma análise estatística correlacionando valores experimentais de vários trabalhos em hidrociclones, com o objetivo de analisar se o fenômeno *fish hook* se trata de erro de medição ou é de fato um fenômeno físico, chegando à conclusão de que o fenômeno é real.

Figura 2.14 – Efeito *fish hook* em hidrociclones.



Fonte: adaptado de BOURGEOIS e MAJUMDER (2013).

2.2 Fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional (CFD) tem se destacado nos últimos anos como solução de engenharia onde a instrumentação de equipamentos industriais se torna difícil. Técnicas CFD podem trazer além de soluções precisas, uma melhor compreensão de fenômenos complexos tal como o escoamento em hidrociclones (ESSS, 2012). No entanto, a prática de experimentos é indispensável para validação de resultados numéricos, assim como auxiliar na escolha e ajuste de parâmetros. Com a evolução dos *hardwares* e *softwares* tornou-

se possível o desenvolvimento de modelos cada vez mais realistas que diminuam a diferença entre valores obtidos entre a simulação e o experimento. Porém, o custo computacional cresce de forma exponencial a esse nível de detalhamento.

2.2.1 Teoria e modelagem matemática

Modelar matematicamente o escoamento de fluidos requer a definição de algumas equações fundamentais, as quais são tratadas nos tópicos a seguir.

2.2.1.1 A equação de conservação da massa

A equação de conservação da massa, também conhecida como equação da continuidade, Equação (2.8), é dada por (Manual ANSYS, 18.0).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.8)$$

Onde ρ é a densidade e \vec{v} é o vetor de velocidade.

2.2.1.2 A equação da Conservação da quantidade de movimento

A conservação do momento linear em um referencial inercial (não acelerado), Equação (2.9), é descrita por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.9)$$

onde p é a pressão estática, $\bar{\tau}$ é o tensor de tensão, e $\rho \vec{g}$ e \vec{F} são a força de corpo gravitacional e forças externas do corpo (por exemplo, que surgem da interação com a fase dispersa), respectivamente.

Para um fluido incompressível, o tensor de tensão $\bar{\tau}$ é dado pela Equação (2.10).

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right) \right] \quad (2.10)$$

onde μ é a viscosidade molecular, e I é o tensor unitário.

2.2.1.3 Turbulência

O escoamento turbulento é caracterizado como um fenômeno caótico com grande flutuação da velocidade no espaço e no tempo apresentando uma ampla faixa de vórtices. A resolução direta (DNS) das equações de transporte instantâneas de Navier – Stokes resolveria completamente o problema da turbulência, no entanto isso implica em elevado custo computacional e é tecnicamente inviável. Como solução para tornar viável o problema da turbulência, um procedimento que busca obter um valor médio deve ser aplicado às equações de Navier – Stokes, para filtrar todas as partes ou pelo menos o espectro turbulento. O procedimento de média mais usado é a média de Reynolds resultando nas *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS). Neste processo, as estruturas turbulentas são eliminadas e é obtida uma variação suave da velocidade média e dos campos de pressão. Como consequência deste procedimento surgem termos adicionais que precisam ser resolvidos por modelos de turbulência adequados. Para escolher o modelo de turbulência adequado é necessário conhecer o tipo de problema, precisão dos resultados e poder computacional disponível. Uma alternativa aos modelos do tipo RANS são os modelos do tipo *Scale-Resolving Simulation* (SRS), cujo mais usado é o *Large Eddy Simulation* (LES) que por sua vez funciona como um filtro, resolvendo diretamente uma parte do espectro turbulento. Esses modelos apesar de apresentarem maior precisão, exigem maior custo computacional devido à necessidade das simulações ocorrerem em regime transiente com intervalos de tempo relativamente curtos (ANSYS, 2017).

A velocidade instantânea em um escoamento em regime turbulento pode ser descrita pela Equação (2.11), como segue:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (2.11)$$

onde \bar{u}_i e u_i' são os componentes de velocidade média e flutuante ($i = 1, 2, 3$.)

Substituindo essa expressão nas equações instantâneas da conservação da massa e momento linear, tomando uma média, se obtém as equações de conservação da massa e momento linear médio, como segue; nas equações 2.12 a 2.22

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2.13)$$

As equações (2.12) e (2.13) são chamadas de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Verifica-se nessas equações, o aparecimento de termos adicionais que representam os efeitos da turbulência. Essas tensões de Reynolds $-\rho \overline{u_i u_j}$ devem ser modeladas para fechar a equação.

O escoamento no interior de um hidrociclone apresenta grande anisotropia e complexidade. Entre os modelos de turbulência (RANS), o $k - \varepsilon$ e o modelo das tensões de Reynolds (RSM) são os mais indicados para a modelagem do fluxo turbulento nesta aplicação. O modelo $k - \varepsilon$ apresenta boa predição em escoamentos internos na sua versão RNG e *Realizable*, e baixo custo computacional devido ao fato de simplificar o problema para apenas duas equações adicionais através do conceito de viscosidade turbulenta, uma característica inerente ao escoamento. O modelo RSM, em geral, pode ser considerado mais preciso nesse tipo de aplicação em comparação ao $k - \varepsilon$, pois, para cada um dos seis tensores de Reynolds é acrescentada uma equação. Além de uma equação adicional de escala $k - \varepsilon$ ou $k - \omega$. Modelos SRS já foram usados em simulações de hidrociclones e apresentaram excelentes resultados, mas o elevado custo computacional o torna inviável em algumas pesquisas. A seguir são discutidos dois desses modelos de turbulência.

a) Modelo $k - \varepsilon$

Os modelos de turbulência de duas equações (modelos $k - \varepsilon$) são historicamente os mais usados industrialmente. No Ansys Fluent, o uso do modelo *Realizable* é recomendado a outras variáveis da família e deve ser usado em combinação com *Enhanced Wall Treatment* ou *near-wall treatment*, para solução da camada limite.

b) Modelo RSM

O modelo RSM inclui vários efeitos que não são tão facilmente manipulados pelos modelos baseados em viscosidade turbulenta. O mais importante é a estabilização da turbulência devido à forte rotação e a curvatura observada em hidrociclones. Por outro lado, esse modelo apresenta uma menor convergência. A Equação (2.14) é a equação de transporte do modelo.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} + \epsilon_{ij} + F_{ij} \quad (2.14)$$

onde os termos que a compõe são dados como segue:

- Convecção.

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (-\rho u_k \overline{u_i u_j}) \quad (2.15)$$

- Difusão turbulenta.

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} [-\rho u_k \overline{u_i u_j u_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)] \quad (2.16)$$

- Difusão molecular.

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j}) \right] \quad (2.17)$$

- Produção de tensão.

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (2.18)$$

- Produção de empuxo.

$$G_{ij} = -\rho\beta(g_i\overline{u_j\theta} + g_j\overline{u_i\theta}) \quad (2.19)$$

➤ Pressão – deformação.

$$\phi_{ij} = p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.20)$$

➤ Dissipação.

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (2.21)$$

➤ Produção de rotação.

$$F_{ij} = -2\rho\Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}) \quad (2.22)$$

No entanto, os termos $D_{T,ij}$, G_{ij} , ϕ_{ij} e ε_{ij} precisam ser modelados para o fechamento da equação RSM. Esses termos são definidos nos diferentes modelos RSM e pode ser encontrado em (ANSYS, 2017).

2.2.1.4 Modelagem Euleriana-Lagrangeana

O efeito de separação em hidrociclones compreende a existência de pelo menos duas fases. A resolução numérica dos escoamentos multifásicos pode ser compreendida pelas abordagens Euler – Lagrange e/ou Euler – Euler. Na abordagem Euler – Lagrange, a fase contínua é tratada de forma Euleriana enquanto a fase discreta é resolvida de forma Lagrangeana usando como dados de entrada a solução da fase contínua para descrever o seu comportamento. A grande vantagem de se utilizar a abordagem Euler – Lagrange consiste em conhecer a trajetória das partículas no tempo. Modelos implementados no Ansys Fluent prevê a trajetória de uma partícula da fase discreta integrando o equilíbrio de força sobre a partícula, que é descrito em um quadro de referência Lagrangeano e pode ser escrito pela equação (2.23) como segue:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{(\vec{u} - \vec{u}_p)}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (2.23)$$

onde \vec{F} é um termo adicional de aceleração (força / unidade de massa de partículas), $\frac{(\vec{u} - \vec{u}_p)}{\tau_r}$ é a força de arrasto por unidade de massa de partículas. Na Equação (2.23), o parâmetro τ_r , que representa o tempo de relaxação das partículas é dado por:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_d Re} \quad (2.24)$$

onde \vec{u} é a velocidade da fase fluida, \vec{u}_p é a velocidade da partícula, μ é a viscosidade molecular do fluido, ρ é a densidade do fluido, ρ_p é a densidade da partícula, d_p é o diâmetro da partícula, C_d é o coeficiente de arrasto da partícula e Re é o número relativo de Reynolds, que é definido como segue:

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (2.25)$$

Os modelos de fase discreta disponíveis no Fluent apresentam níveis de complexidade variável com o interesse em estudo. Para análises simplificadas, com baixa concentração de sólidos ou em situações onde o efeito da concentração de sólidos não é relevante, a fase discreta permanece desativada e é acionada apenas quando o usuário deseja conhecer a trajetória das partículas. Para casos mais realistas onde se deseja conhecer o efeito da concentração de partículas sobre o escoamento, deve ser usado o *Coupled DPM model*, acoplamento de duas vias, e em casos ainda mais realistas é possível analisar, também o efeito da interação entre as partículas com o chamado *Discrete Element Model (DEM)*. Com o custo do realismo apresentado pelos modelos mais complexos, o tempo de simulação tende a crescer exponencialmente. É importante observar que os modelos de fase discreta consideram uma concentração menor que 10 – 12 %. Essa limitação pode ser superada em algumas variantes *Dense Particle Model (DPM)* como, por exemplo, o modelo de fase discreta densa.

2.2.1.5 Interação fluido – partícula: acoplamento de duas vias.

Para analisar o efeito da concentração de sólidos no desempenho do equipamento, o Ansys Fluent pode ser usado para prever os padrões de fase discretos baseados em um campo de fluxo de fase contínuo fixo (uma abordagem desacoplada ou "acoplamento unidirecional"), ou pode-se incluir o efeito da fase discreta no continuum (Acoplamento de duas vias).

A transferência de momentum da fase contínua para a fase discreta (integração fluido – partícula) é calculada no Ansys Fluent examinando a mudança no momento linear de uma partícula à medida que passa através de cada volume de controle. Esta mudança de momentum é calculada pela Equação (2.26).

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_d Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{outra} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (2.26)$$

onde \dot{m}_p é o fluxo mássico de partículas e Δt é o intervalo de tempo. Esta troca de momentum aparece como uma fonte de impulso no balanço de momentum da fase contínua em quaisquer cálculos subsequentes do campo de fluxo de fase contínua.

2.2.1.6 Malha numérica

Uma solução numérica é obtida através da aproximação de um problema, em domínio contínuo, por elementos discretos. Quanto maior o número desses elementos, mais aproximada será a solução, em contrapartida a quantidade de operações matemáticas será acrescentada e, caso seja em demasia torna a solução onerosa. O conjunto desses elementos no espaço é chamado de malha numérica.

Existem diversas métodos para discretização de uma geometria e, dependendo do tipo de simulação, um método pode ser mais conveniente que outros. Um método de grande relevância em CFD para resolução das equações diferenciais parciais lineares é o método dos volumes finitos. Este método evoluiu de outro, diferenças finitas, e apresenta como principal vantagem obedecer à lei da conservação da massa, energia e quantidade de movimento no elemento, que nesse caso é um volume de controle, não apresentando problemas de convergência. Cada volume de controle recebe e envia informação a seus volumes vizinhos através da interseção entre os volumes e, para isso, são usadas funções de interpolação para

conhecer a propriedade nessa fronteira com base nos valores nodais. A solução pode ser obtida iterativamente de forma implícita através de um sistema de equações algébricas lineares ou de forma explícita através de um conjunto de equações algébricas lineares (MALISKA, 1995).

Os pontos podem ser distribuídos de forma não uniforme de modo a aumentar a resolução da malha em regiões com maiores gradientes das propriedades de interesse, pressão e velocidade, por exemplo, ou melhorar a qualidade dos elementos, sabendo-se que elementos de qualidade baixa podem prejudicar a solução.

Conhecer a dependência da solução em função da malha é importante para a credibilidade dos resultados. Sucessivos refinamentos podem ser feitos em todo o domínio ou em alguma região específica observando a variação do parâmetro de interesse. Uma solução que permanece constante, dentro de um valor tolerável, é dita como independente da malha. A dependência de malha pode variar também como função de outros parâmetros da simulação como, por exemplo, o modelo de turbulência. Alguns modelos de turbulência requerem maior resolução que outros, e sendo assim, o teste de dependência deve levar em consideração esta variável.

Os tipos de células no método dos volumes finitos mais comuns para uma malha tridimensional podem variar desde o elemento mais simples como um tetraedro até elementos mais complexos como hexaedros a poliedros mais complexos. A escolha entre um tipo ou outro de elemento será dada de acordo com o formato da geometria e tipo de fenômeno físico analisado. O tipo de célula não apresenta diferença no resultado quando a resolução é adequada ao problema, sendo assim, o fator determinante na escolha final do tipo de célula é simplesmente escolher o tipo que, para o mesmo grau de precisão nos resultados, apresentou o menor custo computacional. De um modo geral, elementos tetraédricos apresentam a vantagem de se adaptar a geometrias de formas complexas e tem baixo custo computacional quando comparado a outros tipos para o mesmo número de células, no entanto em alguns casos, é possível a substituição desse tipo por células poliédricas que apresentam a mesma capacidade de adaptação a geometrias complexas, mas com a vantagem de exigir um número de células cerca de oito vezes menor, diminuindo o custo computacional. Elementos hexaedros oferecem a vantagem de apresentar baixos valores de dispersão numérica quando orientados na direção do escoamento. São menos complexos que elementos poliédricos, o que diminui o custo computacional para a mesma quantidade de elementos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 O problema físico

O problema proposto consiste no estudo do escoamento multifásico turbulento no interior de um hidrociclone de onde se pretende analisar a separação Líquido-sólido, através da abordagem Euleriana-Lagrangeana. Para esta finalidade foi utilizado um trabalho experimental como referência para validação do modelo computacional utilizado nesse trabalho, com as mesmas condições ocorridas no experimento.

3.2 Softwares e geometria

3.2.1 Softwares

Para a realização desse trabalho foram utilizados *softwares* do pacote Ansys. A geometria foi desenvolvida utilizando o *software Design Modeler* do pacote Ansys. Em seguida a superfície foi exportada para o ICEM CFD, que é um gerador de malha versátil e oferece ao operador um domínio completo dos parâmetros da malha, muito útil na geração de malha hexaédrica estruturada em blocos. Para a simulação numérica foi escolhido o Ansys Fluent 18.0. O Ansys Fluent é um dos mais completos pacotes CFD do mercado, que utiliza o método de volumes finitos para solução das equações governantes, possui uma grande variedade de modelos físicos e possibilita um bom ajuste dos parâmetros do solver para a fase discreta, o que o torna a escolha ideal para esse trabalho.

3.2.2 A Geometria

O critério para escolha da geometria utilizada nas simulações foi dado com base em pesquisa de trabalhos recentes, cujo objeto de estudo foi a separação sólido-líquido em hidrociclones, e que apresentaram resultados experimentais com condições de contorno bem definidas. Neste trabalho foi usada a geometria apresentada nos trabalhos experimentais de

Gonçalves (2016), que realizaram estudos sobre o efeito da concentração de sólidos, da diferença de pressão entre a entrada e saída superior do hidrociclone (*overflow*) e diâmetro do *apex* no desempenho do equipamento.

A Figura (3.1) mostra o desenho esquemático e cotas da geometria em estudo, feito por meio do Autodesk Inventor (18.0). A Tabela (3.1) apresenta as dimensões do hidrociclone estudado nesta pesquisa.

Figura 3.1 – Hidrociclone estudado nesta pesquisa.

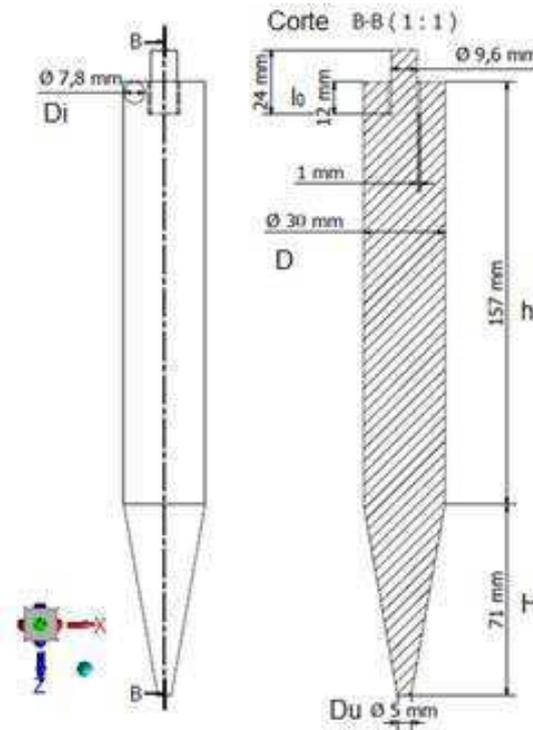


Tabela 3.1 – Dimensões do hidrociclone

Dimensão geométrica	
Diâmetro do duto de alimentação (D_i)	7,8 mm
Diâmetro do vortex finder (D_o)	9,6 mm
Diâmetro da parte cilíndrica (D)	30 mm
Comprimento da seção cilíndrica (h)	157 mm
Comprimento do tronco do cone (H)	71 mm
Comprimento do vortex finder (l_0)	12 mm
Diâmetro do apex (D_u)	5 mm
Ângulo do tronco do cone (θ)	20°

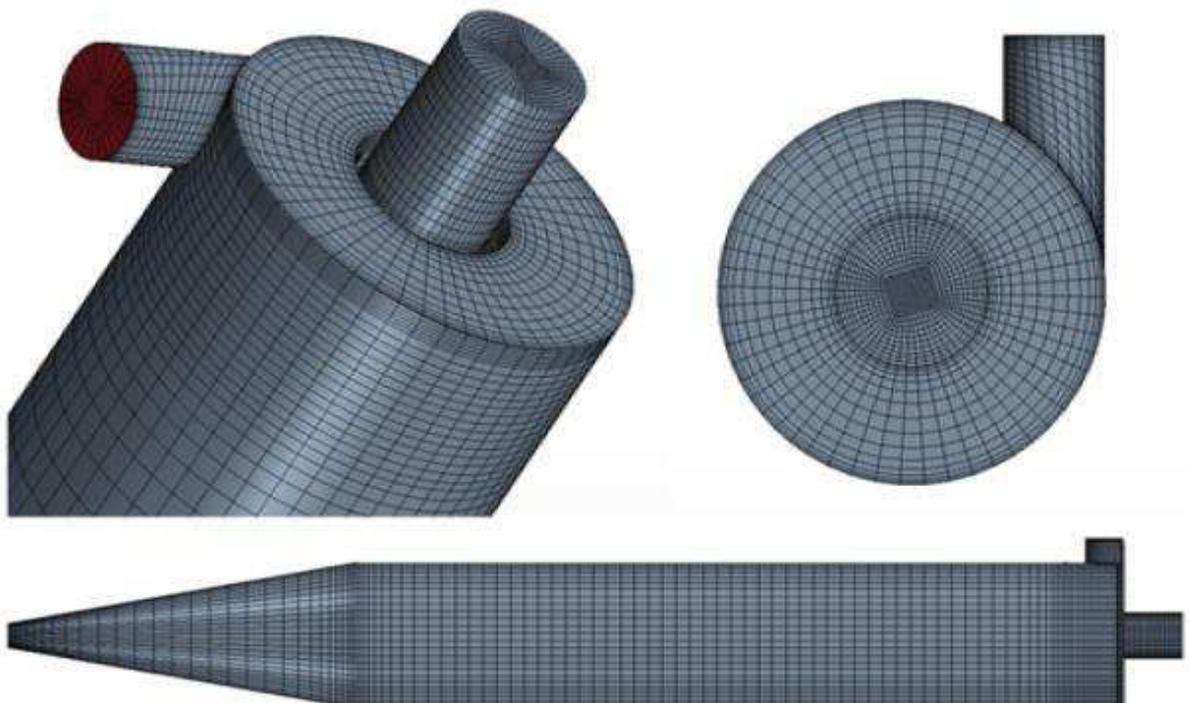
Fonte: adaptado de GONÇALVES(2016).

3.3 A malha numérica

Para a criação da malha hexaédrica foi utilizado o *software* Ansys ICEM CFD. Este tipo de malha apresentou uma série de vantagens quando comparada a outros modelos de células, como: por exemplo, um menor número de elementos, uma solução mais consistente e precisa, e uma maior facilidade de refino na região central onde ocorrem os maiores gradientes devido ao vórtice interno ascendente. Outras regiões de interesse em aumentar o refino foram aquelas próximas às paredes devido à condição de não deslizamento e regiões de mudanças de ângulo na geometria, além das regiões onde foi necessário manter a qualidade dos elementos. De modo geral, o critério de qualidade *Determinant*, que é a razão entre o menor e maior determinante da matriz Jacobiana foi sempre maior que 0,3.

O estudo de dependência de malha foi realizado considerando um escoamento monofásico observando inicialmente a variação da queda de pressão em função do número de células e modelo de turbulência e em seguida foi aplicado um método mais conservador, trata-se do valor da razão de líquido em função do número de células. A Figura (3.2) ilustra a malha que apresentou a melhor relação entre precisão dos resultados e custo computacional com aproximadamente 180 mil células.

Figura 3.2 – Malha numérica usada nas simulações – 180 mil células.



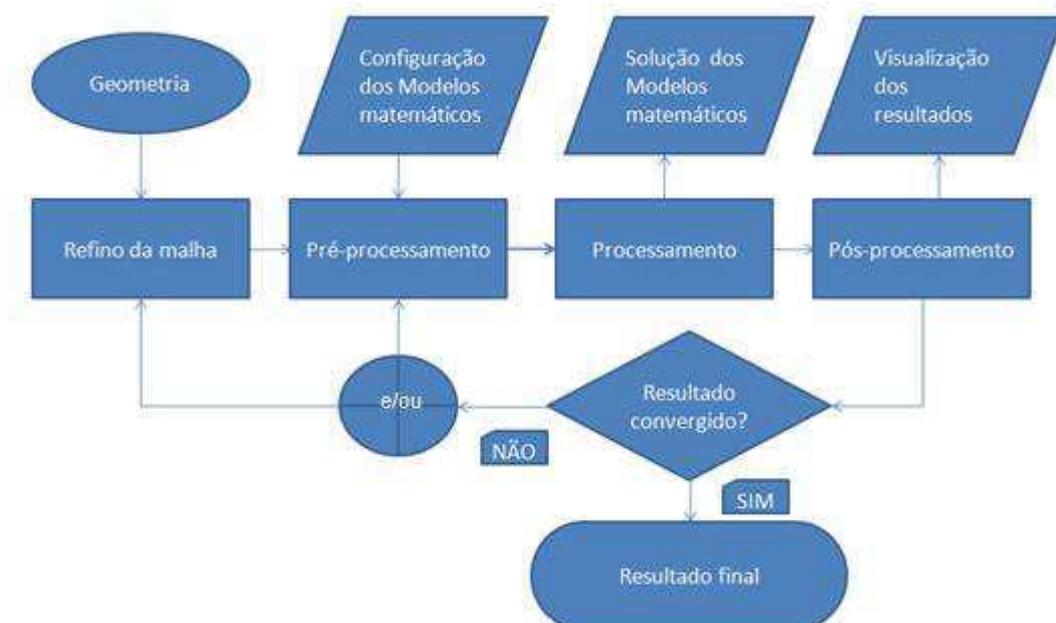
3.4 A solução numérica das equações governantes

3.4.1 Fase contínua

Para baixas concentrações de sólidos, a influência da fase dispersa no escoamento é desprezível e a solução da fase contínua pode ser separada da fase discreta. Neste trabalho, a fase contínua foi resolvida através do refino adequado da malha e escolha de modelos matemáticos que mais se aproximaram dos resultados experimentais dentro das limitações de tempo de processamento.

A Figura (3.3) mostra o fluxograma das atividades para se obter um resultado consistente da simulação. A sequência do fluxograma é iniciada com a geometria pronta, a qual não foi alterada e com a qual se obteve uma malha inicial, ponto de partida para as análises. No pré-processamento foram configurados as condições de contorno, propriedades físicas, materiais, modelos matemáticos e ajustes de constantes. No processamento propriamente dito foi possível acompanhar a evolução de alguns resultados como a diferença de pressão, por exemplo, além dos erros residuais e saber se a solução está consistente, convergindo para algum resultado ou divergindo. Ao final do processamento tem-se o Pós-processamento onde foi possível analisar os resultados com mais detalhes e tomar decisões sobre a necessidade de se refinar novamente a malha ou mudar a configuração do Pré-processamento.

Figura 3.3 – Fluxograma para solução numérica.



3.4.1.1 Refino da malha

O refino da malha foi realizado nas regiões onde houve maior gradiente de pressão e velocidade, para isto, foram utilizadas as informações do Pós-processamento, como curvas de velocidade e pressão, para tomada de decisões. A solução foi considerada independente da malha quando os resultados estiveram próximos e dentro de uma faixa tolerável entre um refino e outro.

3.4.1.2 Pré-processamento (Setup)

O Ansys Fluent oferece a possibilidade de escolher os parâmetros da simulação para diversos problemas físicos, desde modelos mais simplificados que apresentam baixo custo computacional até modelos mais detalhados para serem usados, onde o uso de modelos simplificados não seria capaz de gerar resultados aceitáveis.

Neste trabalho foram usadas as seguintes diretrizes com o grau de prioridade na sequência da apresentação: escolha do modelo, dentro de cada parâmetro, que ofereceu melhor precisão dentro das limitações de tempo para realização das simulações; quando um parâmetro não apresentar diferença significativa entre seus modelos no resultado, escolher o de menor custo computacional, e escolher os modelos com melhor estabilidade e mais robusto quando possível.

a) A modelagem utilizada

As equações que compõem o modelo para a fase contínua são as de conservação, da massa, Equação (2.8), e quantidade de movimento, Equação (2.9), além do modelo de turbulência.

Os parâmetros utilizados na simulação variam de acordo com o modelo de turbulência escolhido. Com base na revisão da literatura chegou-se à hipótese de que o modelo de turbulência é de grande importância para obter os resultados de escoamento em hidrociclones. Entre os modelos indicados optou-se por testar o $k - \epsilon$ RNG, $k - \epsilon$ *Realizable* e o RSM.

As Tabelas (3.2) e (3.3), resumem os parâmetros de entrada para a simulação da fase contínua.

Tabela 3.2 – Definições gerais do solver.

Tipo	Baseado em pressão
Formulação da velocidade	Absoluta
Gravidade	(0;0;9,81)(m/s ²)

Tabela 3.3 – Modelos matemáticos e métodos para modelo de turbulência

Modelo de turbulência	Reynolds Stress Model (7 equações)	$k - \epsilon$ (2 equações)
Variação	Linear Pressure – Strain	RNG/ <i>Realizable</i>
Tratamento de parede	Standard Wall Functions	<i>Standard Wall Functions</i>
Regime de tempo	Transiente	Permanente
Acoplamento pressão – velocidade	SIMPLE	SIMPLE
Pressão	PRESTO!	PRESTO!
Momento	Segunda ordem upwind	Segunda ordem <i>upwind</i>
Energia cinética turbulenta	Segunda ordem upwind	Segunda ordem <i>upwind</i>
Dissipação turbulenta	Segunda ordem upwind	Segunda ordem <i>upwind</i>
Tensão de Reynolds	Segunda ordem upwind	-
Formulação transiente	Segunda ordem implícito	-
Passo de tempo	0,001 s	-
Critério de convergência	Erro de 10^{-6} kg/s	Erro de 10^{-6} kg/s

Alguns parâmetros da simulação necessitam de ênfase, como é o caso da ordem de fechamento das equações, onde se percebeu que o fechamento de segunda ordem é essencial para a precisão dos resultados. Esse fechamento de segunda ordem diminuiu a estabilidade da solução exigindo diminuição do passo de tempo para que o resultado pudesse convergir. Quanto ao tratamento de parede, esse se mostrou indiferente em relação aos resultados logo foi escolhido o modelo de menor custo computacional.

b) Propriedades físicas da fase contínua e condições de contorno

As condições de contorno do hidrociclone foram definidas em vazão mássica de alimentação na entrada e pressão conhecida nas saídas (*overflow* e *underflow*). Nas paredes

foi usada a condição de aderência. Os demais parâmetros como, temperatura, pressão atmosférica, viscosidade e densidade da água, foram mantidos como valor padrão do software. A Tabela (3.4) mostra as condições de contorno aplicadas. Os valores nas saídas e paredes permanecem as mesmas para todos os casos, variando apenas a condição de entrada para cada caso listado na Tabela (3.4). A Tabela (3.5) mostra as propriedades físicas para a fase contínua.

Tabela 3.4 – Condições de contorno para fase contínua.

Região	Condição	Valor
Alimentação de entrada	Vazão mássica	0,321 kg/s
<i>Overflow</i>	Pressão prescrita	101325 Pa
<i>Underflow</i>	Pressão prescrita	101325 Pa
Paredes	Não deslizamento	-

Tabela 3.5 – Material e propriedades físicas da fase contínua

Tipo de fluido	Água
Densidade	998,2 kg/m ³
Viscosidade dinâmica	0,001003 Pa·s
Temperatura	298 K

3.4.1.3 *Processamento (Solution)*

Na etapa de processamento foi criado um *Report* informando a diferença de pressão entre a entrada e a saída superior (*Overflow*). A solução foi considerada permanente quando os valores de diferença de pressão e razão de líquidos se estabilizaram. A simulação foi mantida por pelo menos duas mil interações para os modelos $k - \epsilon$ e dez mil interações para o modelo RSM, para garantir a estabilidade dos resultados. Em geral a solução apresentou estado permanente para valores residuais da ordem de 10^{-6} kg/s.

3.4.1.4 *Pós-processamento (Results)*

Na etapa de Pós – processamento foram analisados gráficos com gradiente de pressão e velocidade, além de campos vetoriais de velocidade e curvas de pressão e velocidade. Os

valores de diferença de pressão e razão de líquidos foram usados para a validação da malha e dos modelos usados.

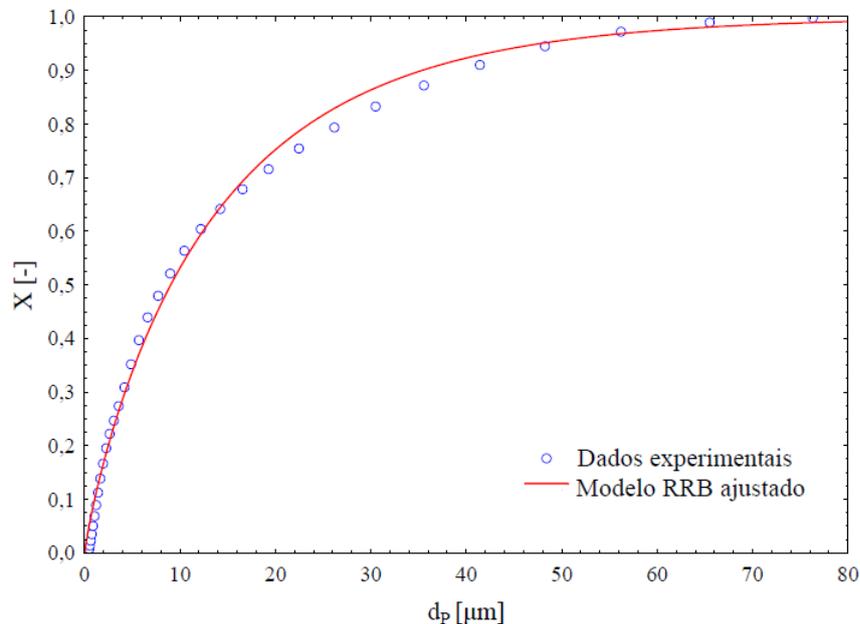
3.4.2 Fase dispersa

Para modelar o comportamento da fase dispersa utilizou-se das equações (2.23)-(2.26) e (3.1).

3.4.2.1 Propriedades físicas da fase dispersa

O material utilizado nos experimentos de Gonçalves (2016) foi o mineral “quartzito” composto por 95% de sílica (SiO_2), 4% de alumina (Al_2O_3) e 1% de impurezas diversas. Sua densidade foi avaliada em $2690 \pm 0,5 \text{ kg/m}^3$. A distribuição granulométrica do quartzito é apresentada na Figura (3.4).

Figura 3.4 – Distribuição do material particulado usado nas simulações.



Fonte: GONÇALVES (2016).

A distribuição granulométrica do material pode ser representada pelo modelo RRB (Rosin-Rammler-Bennet). Parâmetros do modelo ajustados resultam em $\bar{d} = 13,7$ e $n = 0,88$. A equação que descreve o modelo é dada por:

$$1 - X = \exp \left[\left(-\frac{d_p}{13,7} \right)^{0,88} \right] \quad (3.1)$$

3.4.2.2 Parâmetros do injetor na alimentação

Os parâmetros do injetor estão listados na Tabela (3.6). Entre os parâmetros de maior influência no resultado da fase discreta, *Discrete Random walk model* foi essencial para prever a influencia da turbulência no deslocamento das partículas com número de entradas acima de 30.

Tabela 3.6 – Parâmetros do injetor usados na simulação.

Tipo de injetor	Localizado na superfície da entrada
Tipo de partícula	Inerte
Velocidade	10 m/s
<i>Scale from rate by face area</i>	Habilitado
<i>Inject using normal direction</i>	Habilitado
Coefficiente de arrasto	Esfera
Dispersão turbulênta <i>discrete random walk model</i>	30 entradas
Escala de tempo constant	0,002 s

3.4.2.3 Parâmetros da fase dispersa

Semelhante ao caso da fase contínua, a escolha dos modelos de fase dispersa se deu com base na comparação entre os resultados da separação de partículas obtidas na simulação e os resultados experimentais. Os parâmetros mostrados na Tabela (3.7) possuem grande influência nos resultados de separação da fase dispersa. Seus valores foram escolhidos com base na precisão e capacidade de processamento no momento das simulações.

Uma vez que a fase contínua está resolvida, a trajetória da fase discreta é calculada usando esse resultado.

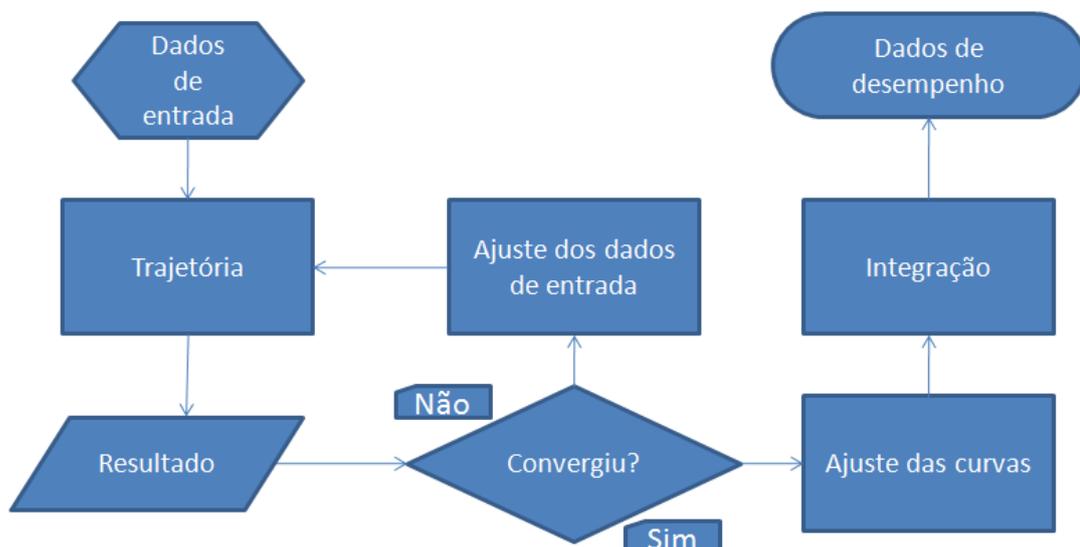
Tabela 3.7 – Parâmetros da fase dispersa usados na simulação.

Máximo número de interações:	$1,5 * 10^6$
Fator do passo de tempo	800
Controle de precisão	Tolerância 10^{-8}
Número máximo de refinamentos	1000
Integração de baixa ordem	Analítico
Integração de alta ordem	Trapezoidal

3.4.2.4 Contagem em regime permanente

Inicialmente os parâmetros do material particulado são configurados no injetor, localizado na entrada do equipamento. O traçado da trajetória das partículas e os ajustes dos modelos e parâmetros do injetor são realizados interativamente até que a solução da fase discreta tenha convergido.

A partir da solução convergida, foi realizada a contagem das parcelas da fase discreta que deixaram o equipamento pelo overflow e underflow para os diâmetros de, 4, 6, 8, 10 e 12 μm , e através das Equações (2.1), (2.2) e (2.3), esse pontos foram marcados no gráfico de eficiência granulométrica reduzida. Utilizou-se o software *Mathemática*^R para ajustar a Equação (2.3) a esses pontos, de onde foi possível obter os parâmetros (m) e (d_{50}). A figura (3.5) ilustra o fluxograma para solução da fase dispersa.

Figura 3.5 – Fluxograma para solução da fase dispersa.

3.4.3 Eficiência de separação

A eficiência total reduzida foi calculada usando os parâmetros (m) e (d_{50}) da Equação (2.3), (\bar{d}) e (n) da equação (3.1), na equação (2.6)

3.4.4 Validação do modelo e teste de dependência de malha

Inicialmente fez-se um teste para verificar a dependência da malha em relação ao número de células e modelo de turbulência. Foram comparados valores de diferença de pressão e razão de líquido com valores experimentais do Caso (1). Os parâmetro da malha foram alterados de forma interativa até obter uma solução independente da malha. A Tabela (3.8) mostra os valores para as duas malhas finais do teste.

Tabela 3.8 – Teste de dependência de malha.

Modelo de turbulência	Número de células	Diferença de pressão (Pascal)	Razão de líquido
$k - \varepsilon$ Realizable	180.000	-	-
$k - \varepsilon$ Realizable	360.000	-	-
$k - \varepsilon$ RNG	180.000	-	-
$k - \varepsilon$ RNG	360.000	-	-
RSM	180.000	-	-
RSM	360.000	-	-
Experimental Caso1	-	88.000	11

Para a validação do modelo foram escolhidos alguns parâmetros de desempenho do hidrociclone. Como a solução do problema geral requer a solução tanto no campo do escoamento quanto no de separação, a diferença de pressão entre alimentação e saídas e razão de líquidos estão relacionados à solução da fase contínua. Já os valores de eficiência total reduzida são dependentes do escoamento e dos parâmetros da fase discreta. A Tabela (3.9) mostra os valores experimentais aos quais serão comparados aos resultados simulados.

Tabela 3.9 – Casos simulados utilizando os valores experimentais de Gonçalves (2016).

Casos	Parâmetros			
	Vazão mássica (kg/s)	$-\Delta P$ (kPa)	R_L (%)	E'_T (%)
1	0,321	88	11	61,35
2	0,367	118	10,15	63,12
3	0,403	147	9,44	65,35
4	0,441	177	8,86	64,52

Fonte: GONÇALVES (2016).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Seleção da malha numérica e modelo de turbulência

Os resultados da dependência de malha e tipo de modelo de turbulência são mostrados na Tabela (4.1), que mostra os valores de diferença de pressão, entre a entrada e a saída superior do hidrociclone, e da razão de líquido em função do modelo de turbulência e quantidade de células das duas malhas finais analisadas, para o caso (1). Observando os valores apresentados para cada modelo de turbulência, é possível afirmar que os valores obtidos não mudam com a variação do número de células. Esse resultado indica que a solução, a partir de 180.000 células, não depende da malha. O modelo de turbulência que gerou resultados mais próximos dos resultados experimentais foi o RSM, principalmente em relação à razão de líquido quando comparado com os outros do tipo $k - \epsilon$ e, por esse motivo, foi escolhido para ser usado nos demais casos com diferentes vazões de alimentação. Em contrapartida, o custo computacional aumentou significativamente quando o modelo de turbulência RSM foi usado.

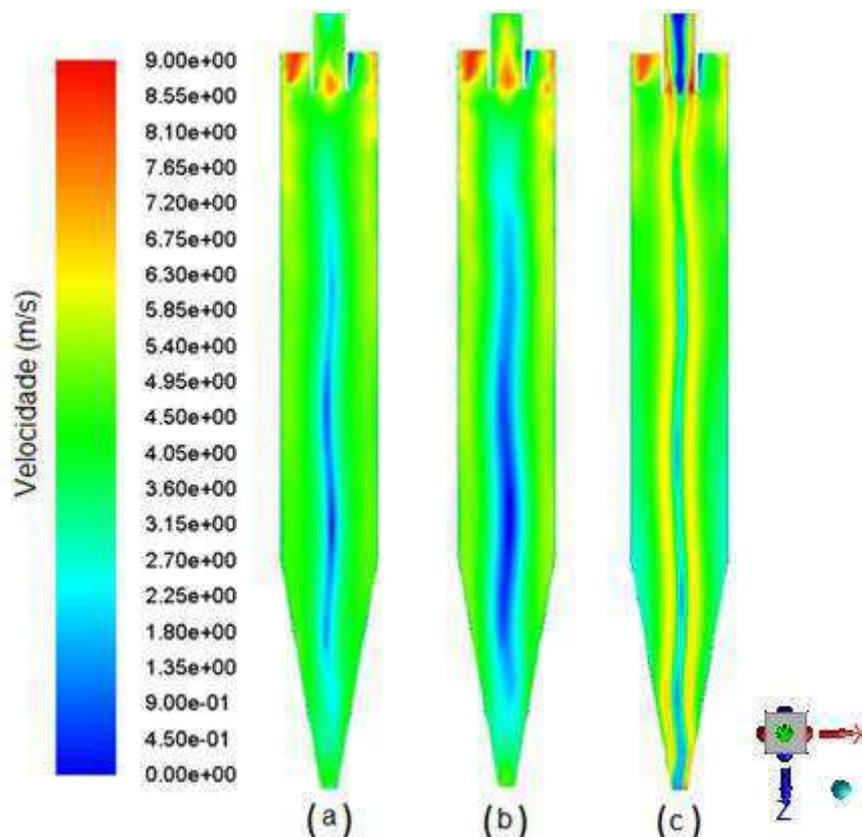
Tabela 4.1 – Teste de dependência de malha – Caso1.

Modelo de turbulência	Número de células	Diferença de pressão (Pa)	Razão de líquido (-)
$k - \epsilon$ <i>Realizable</i>	180.000	72.302	4,98
$k - \epsilon$ <i>Realizable</i>	360.000	71.000	4,95
$k - \epsilon$ RNG	180.000	70.104	4,40
$k - \epsilon$ RNG	360.000	69.567	4,39
RSM	180.000	92.290	10,0
RSM	360.000	91.721	10,0
Experimental	-	88.000	11

A Figura (4.1) mostra a distribuição de velocidade no plano central do hidrociclone, para o Caso (1) e para três modelos de turbulência. Observando a Figura (4.1), verificou-se que os modelos $k - \epsilon$ e *Realizable* e $k - \epsilon$ RNG não apresentam formação do *Air Core* nas

saídas, enquanto que no modelo RSM, esse fenômeno é bem nítido no *Overflow* e um pouco mais sutil no *Underflow*. Para o modelo RSM, este fenômeno vem acompanhando de um pico de velocidade tangencial na região do *vortex finder*, nas proximidades de sua parede. Como descrito por Svarovsky (1981), Heiskanen (1993) e Nascimento (2008), a velocidade tangencial aumenta a partir da parede do hidrociclone com o decréscimo da posição radial, passando então, por um máximo, diminuindo perto da região central do equipamento. Tal fenômeno é explicado pelas altas velocidades tangenciais, associadas ao movimento helicoidal do fluido ao longo do hidrociclone, que criam um gradiente de pressão na direção radial do equipamento, resultando, assim, em um núcleo de baixa pressão alinhado ao eixo central deste (ALVES, 2012). Nos modelos $k - \epsilon$, o pico de velocidade ocorre na região central do *vortex finder*.

Figura 4.1 – Distribuição de velocidade (m/s) no plano $Y = 0$ do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência para o Caso (1): (a) $k - \epsilon$ *Realizable*, (b) $k - \epsilon$ RNG e (c) RSM.

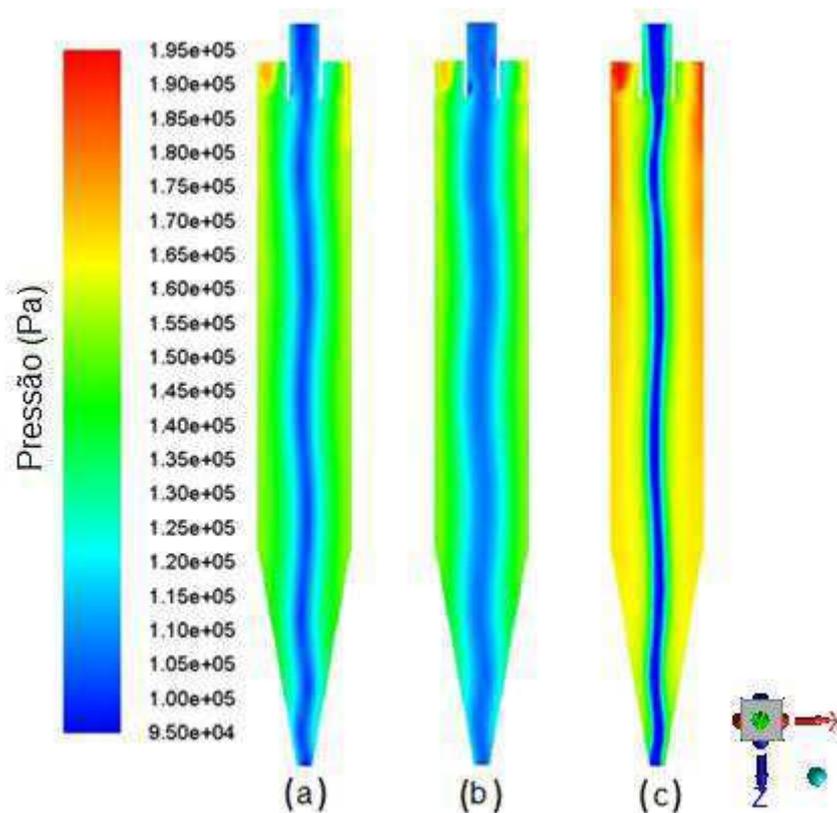


A superioridade do modelo RSM para esta aplicação se deve justamente às características inerentes ao escoamento em hidrociclones, que apresentam grande anisotropia e forças cisalhantes. Após a observação de formação do *Air Core* e levando em consideração

que no modelo RSM, a previsão de queda de pressão, vista na Tabela (4.1), é maior que as dadas pelos modelos do tipo $k - \epsilon$, pode-se então considerar que a formação do *Air Core* na simulação indica a tendência de aumento na queda de pressão.

A Figura (4.2) ilustra a distribuição de pressão no plano central do hidrociclone para o Caso (1), para três modelos de turbulência. É notado que o gradiente de pressão previsto pelo modelo RSM é maior quando comparado aquelas dadas pelo modelos do tipo $k - \epsilon$. Esse resultado é coerente com o apresentado na Tabela (4.1), onde o modelo RSM apresentou maior diferença de pressão. Os três modelos apresentam comportamento semelhante, mostrando que a pressão diminui da periferia ao centro do equipamento; essa diferença de pressão é justamente o motivo para haver separação de fases no equipamento, pois a pressão menor no centro desloca a fase menos densa para essa região (ALMEIDA, 2009).

Figura 4.2 – Distribuição de pressão no plano $Y = 0$ do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência para o Caso (1): (a) $k - \epsilon$ *Realizable*, (b) $k - \epsilon$ RNG e (c) RSM.



As Figuras (4.3) e (4.4) mostram as curvas de pressão e velocidade tangencial em função da posição radial (Y) e axial (Z), respectivamente.

Figura 4.3 – Perfil de pressão no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência Caso (1): a) $k - \epsilon$ *Realizable*, b) $k - \epsilon$ RNG c) e RSM.

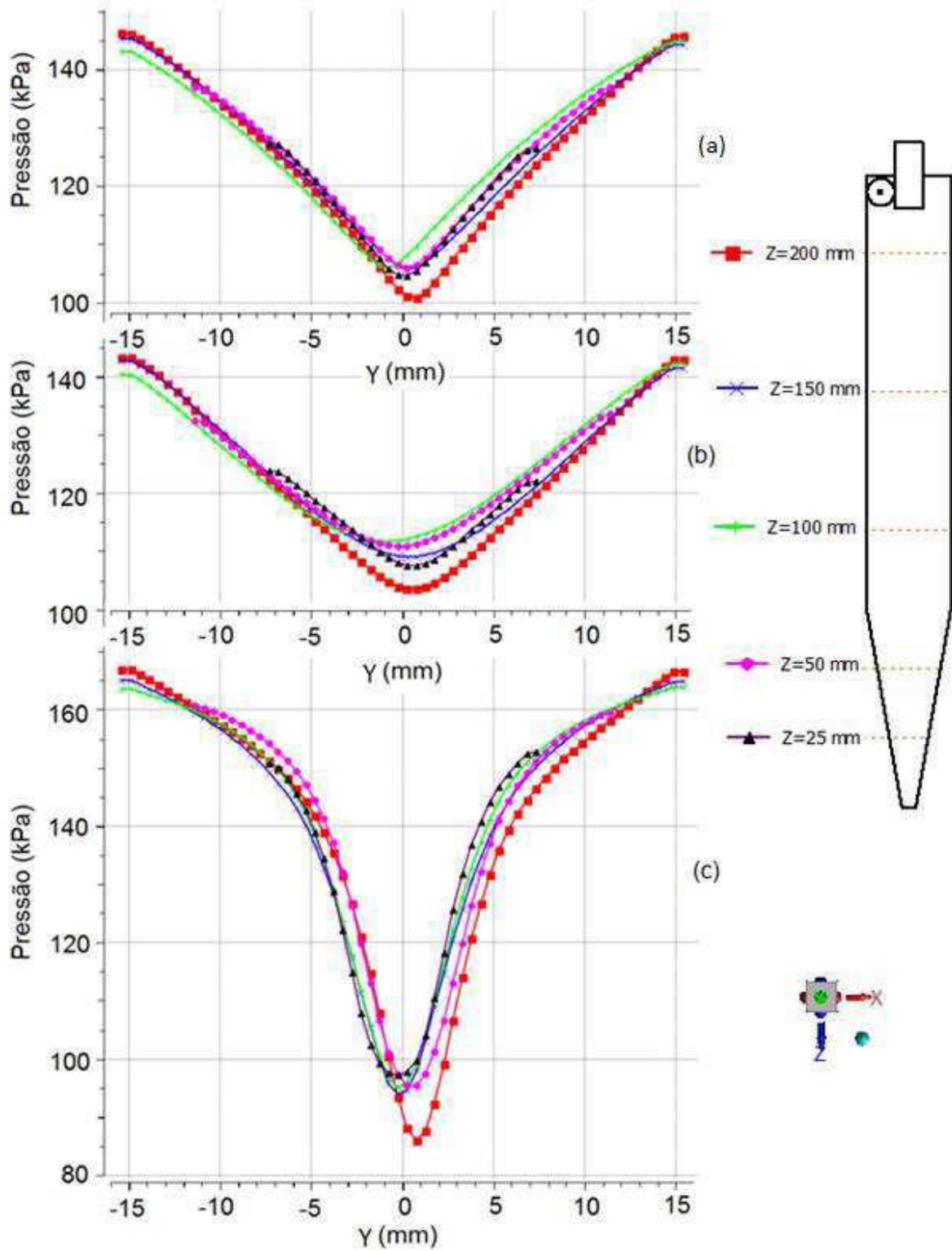
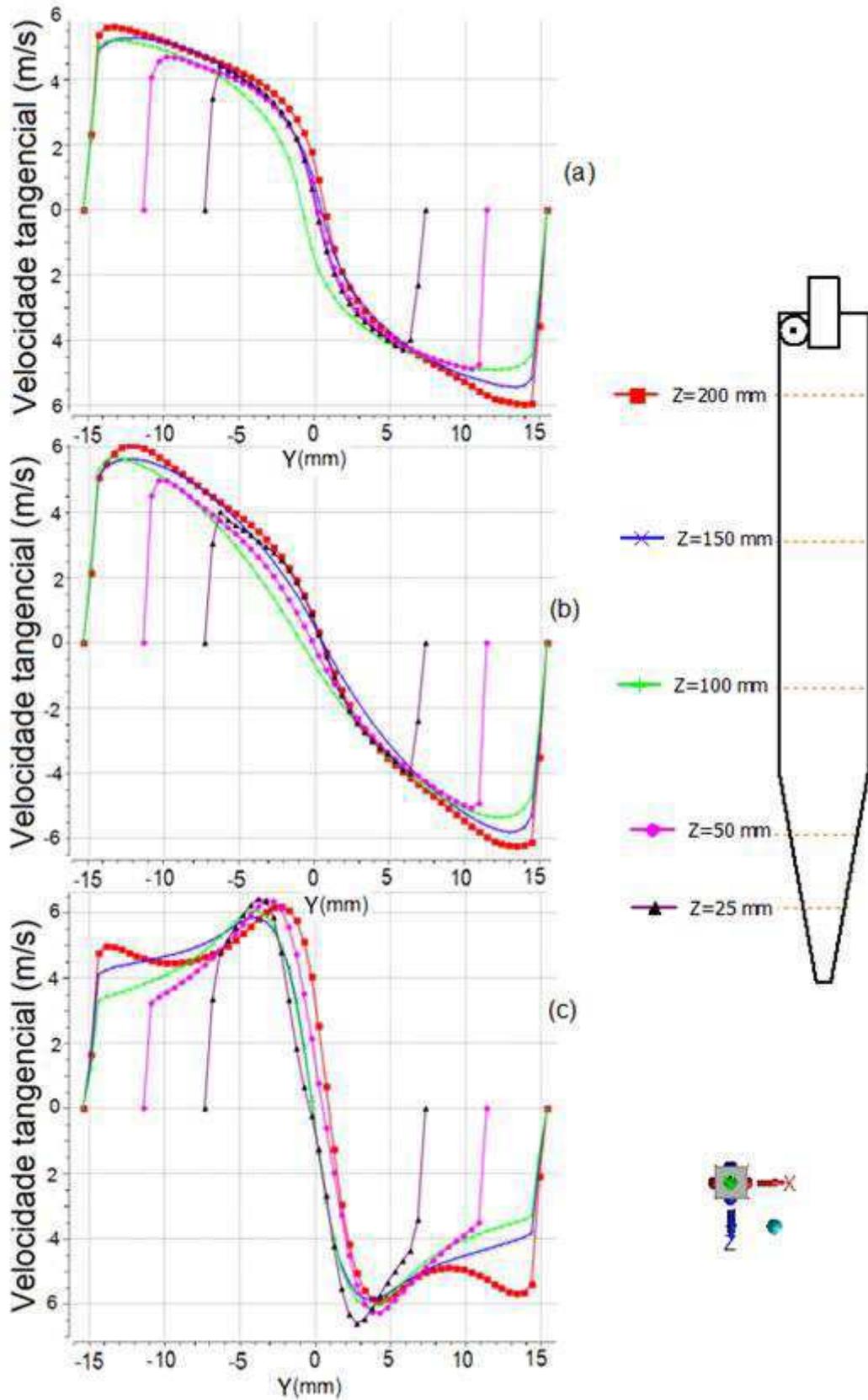


Figura 4.4 – Perfil de velocidade tangencial no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes modelos de turbulência para o Caso (1): a) $k - \varepsilon$ Realizable, b) $k - \varepsilon$ RGN e c) RSM.

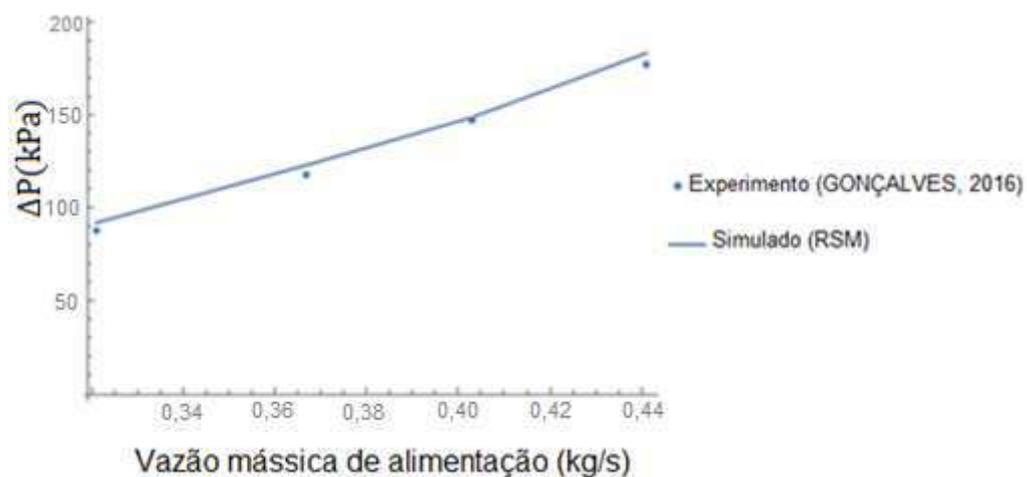


Analisando as Figuras (4.3) e (4.4), verifica-se de forma quantitativa o que já foi visto nas Figuras (4.1) e (4.2) de forma qualitativa. É interessante observar que, enquanto os modelos $k - \epsilon$ apresentam suas velocidades máximas muito próximas à parede, o modelo RSM apresenta a velocidade máxima na região central próximo ao raio do *vortex finder*. Além disso, é notado que a velocidade é mais elevada no modelo RSM em todas as seções axiais. A evolução da pressão no interior do equipamento é aproximadamente linear nos modelos $k - \epsilon$ enquanto que no RSM apresenta uma tendência logarítmica.

4.2 Validação do modelo

A Figura (4.5) mostra a evolução da diferença de pressão entre a entrada e a saída superior do hidrociclone em função do aumento da vazão de líquido na alimentação. Observando os valores dos experimentos, percebe-se que a variação da diferença de pressão se deu de forma praticamente linear em relação ao aumento da vazão e que o modelo simulado apresentou comportamento semelhante, com resultados muito próximos ao experimento. A máxima diferença entre os resultados preditos e experimentais ocorre na máxima vazão mássica, Caso (4), com um valor de 0,441 kg/s e diferença de pressão de 186 kPa, o que equivale a um erro relativo percentual de aproximadamente 4,5 %.

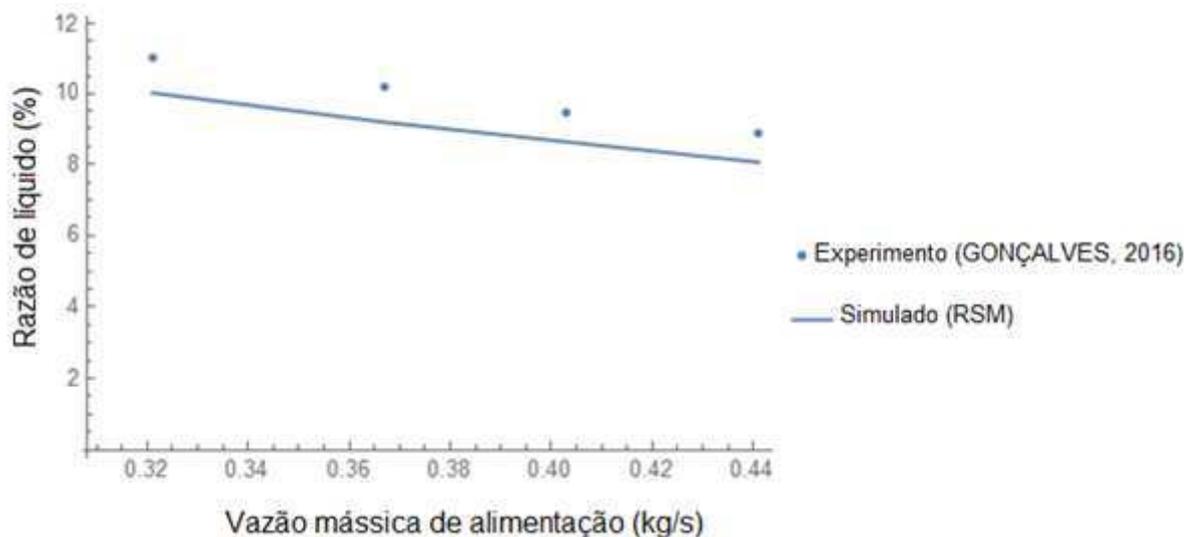
Figura 4.5 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais da diferença de pressão no hidrociclone em função da vazão mássica de alimentação.



A razão de líquido, mostrada na Figura (4.6), apresentou comportamento linear no experimento e diminuiu com o aumento da vazão de líquido, comportamento que ocorreu

semelhante aos resultados simulados. Apesar dos valores simulados não estarem tão próximos do experimento como foi mostrado no caso da diferença de pressão, os mesmos apresentaram a mesma tendência que o experimento, seguindo uma reta paralela, dentro do tolerável, indicando boa concordância. A máxima diferença entre os resultados preditos e experimentais ocorre na máxima vazão mássica, Caso (2), com um valor de 0,367 kg/s e razão de líquido de 9,18 %, o que equivale a um erro relativo percentual de aproximadamente 9,18 %.

Figura 4.6 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais da razão de líquido no hidrociclone em função da vazão mássica de alimentação.



A eficiência total reduzida é mostrada na Figura (4.7), onde o experimento apresentou valores crescentes com o aumento da vazão de líquidos do Caso (1) ao Caso (3), e permanecendo praticamente constante. Aqui ocorre mais um caso onde a simulação concordou com o experimento, mostrando valores crescentes de eficiência com aumento de vazão de alimentação e valores muito próximos entre os Caso (3) e (4). Essa variação ocorre de forma coerente com o experimento. A máxima diferença entre os resultados preditos e experimentais ocorre na máxima vazão mássica, Caso (2), com um valor de 0,367 kg/s e eficiência total reduzida de 67,88%, o que equivale a um erro relativo percentual de aproximadamente 7,5 %.

A Tabela (4.2) resume todos os resultados obtidos. Após análise da tabela, observa-se que o menor erro relativo ocorreu justamente na diferença de pressão no hidrociclone.

Figura 4.7 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais da eficiência total reduzida no hidrociclone em função da vazão mássica de alimentação.

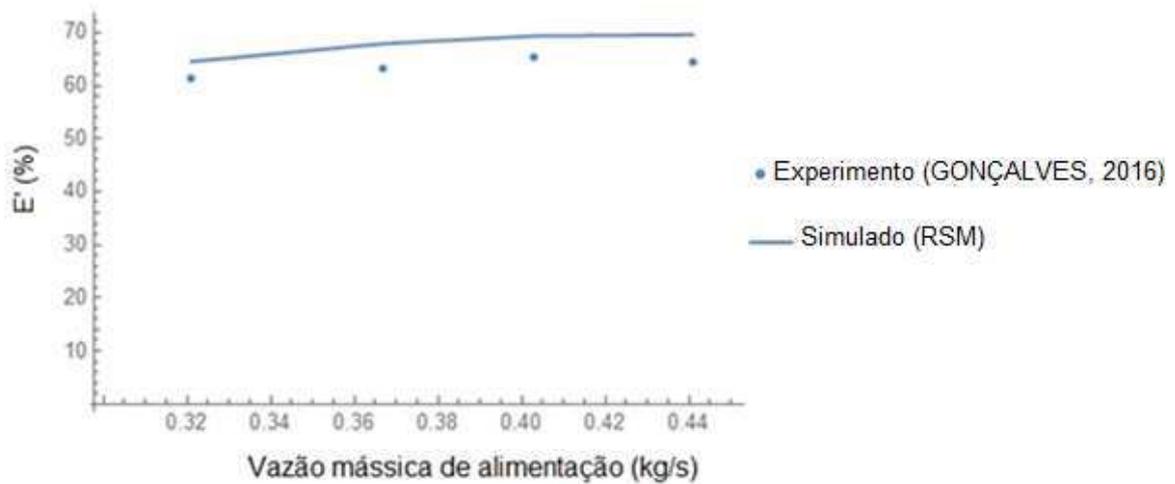


Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados preditos e experimentais de diferentes parâmetros do processo, para todos os casos analisados.

		$-\Delta P$ (kPa)	Q_A (kg/s)	R_L (%)	E'_T (%)
Caso 1	Experimento	88,00	0,321	11,00	61,35
	Simulação	91,70	-	10,00	64,52
Erro relativo (%)		4,20		9,10	5,20
Caso 2	Experimento	118,00	0,367	10,15	63,12
	Simulação	122,98	-	9,18	67,88
Erro relativo (%)		4,20		9,60	7,50
Caso 3	Experimento	147,00	0,403	9,44	65,35
	Simulação	150,00	-	9,00	69,33
Erro relativo (%)		2,00		4,70	6,10
Caso 4	Experimento	177,00	0,441	8,86	64,52
	Simulação	185,96	-	8,06	69,59
Erro relativo (%)		4,50		9,00	7,90
Erro médio (%)		3,70		8,00	06,70

4.3 Análise hidrodinâmica do hidrociclone, Caso (1).

4.3.1 Transiente de pressão e velocidade

O modelo de turbulência RSM somente apresentou resultados consistentes quando foram usados modelos de segunda ordem upwind e regime de tempo transiente. O uso de modelos de segunda ordem aumentou a precisão dos resultados, mas, tornou a convergência mais difícil e neste caso, foi necessário o uso do regime de tempo transiente a fim de se obter resultados com baixo erro residual e consistentes.

A Figura (4.8) mostra o transiente de velocidade para o Caso (1), quando se usou o modelo de turbulência RSM. O *Air Core* surge no tempo 0,5 s e se estabiliza por volta de 0,9 s. É interessante comentar que no tempo 0,4 s, o modelo RSM mostra um resultado semelhante ao $k - \epsilon$ RNG em regime permanente.

A Figura (4.9) mostra o transiente de pressão para o Caso (1), quando se usou o modelo de turbulência RSM. Semelhante à velocidade, o modelo apresenta regime permanente por volta do tempo 0,9 s e é bastante semelhante ao $k - \epsilon$ RNG, em regime permanente, no tempo 0,4 s.

Figura 4.8 – Transiente de velocidade no plano $Y = 0$ do hidrociclone obtido com o modelo de turbulência RSM (Caso 1).

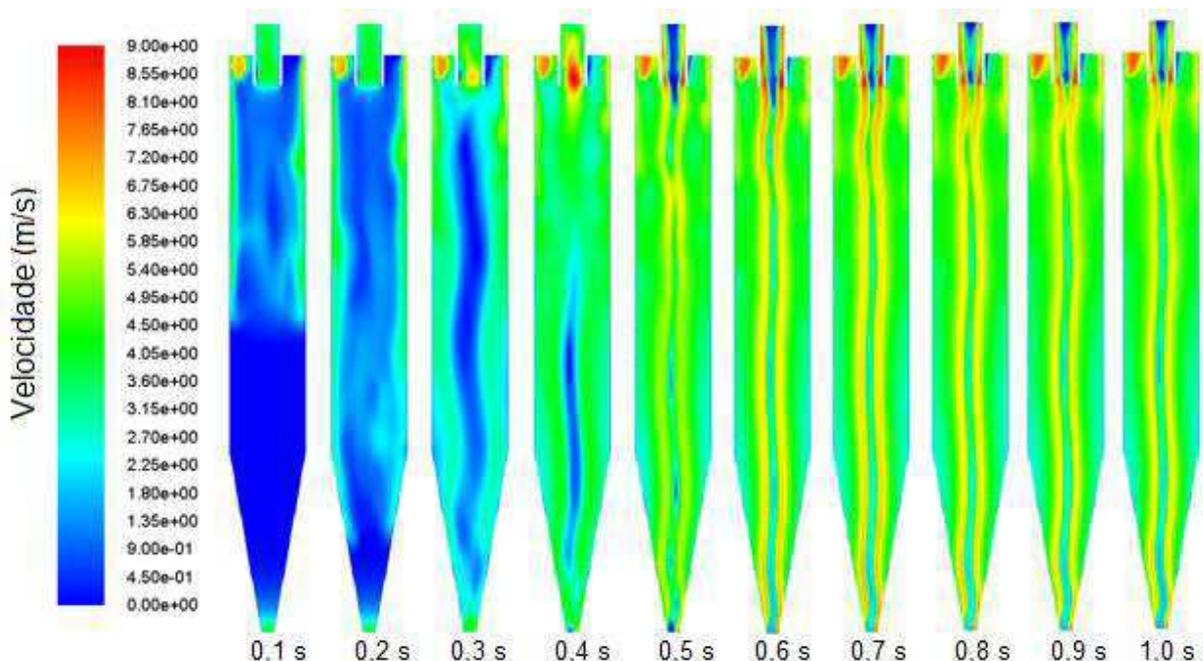
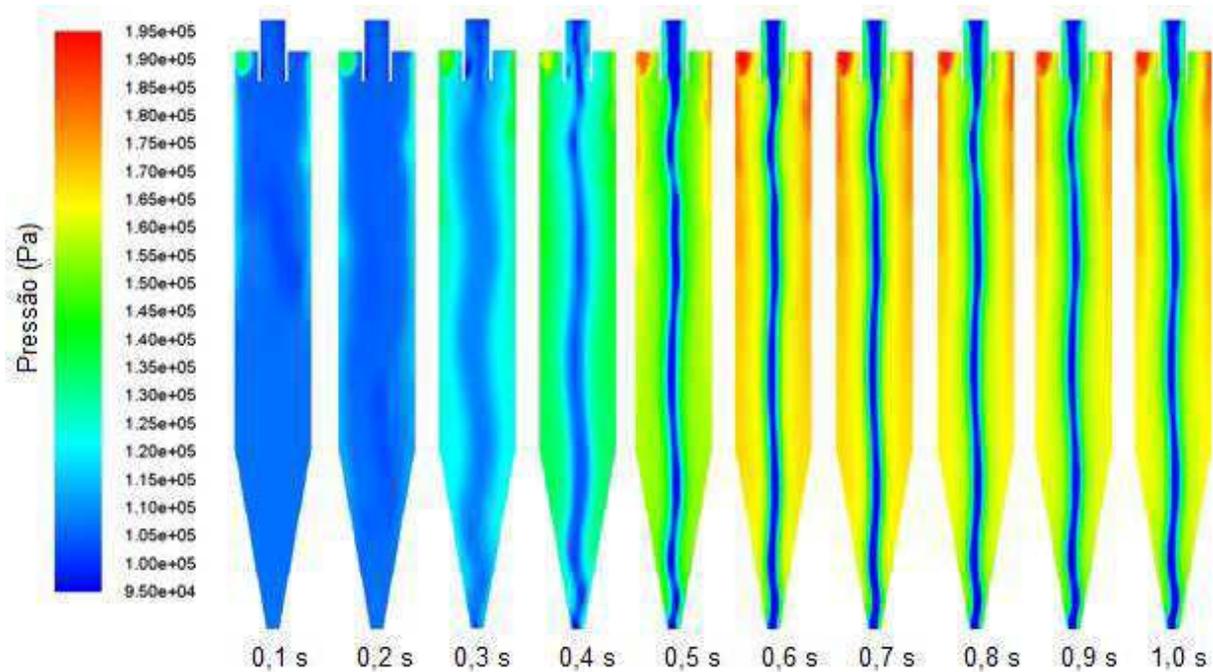


Figura 4.9 – Transiente de pressão no plano $Y = 0$ do hidrociclone obtido com o modelo de turbulência RSM (Caso 1)



4.3.2 Trajetória das partículas e linhas de corrente

A Figura (4.10) mostra as linhas de corrente no interior do equipamento. O destaque na figura mostra a região onde o vórtice primário se inverte e cria o vórtice secundário, responsável pela descarga de partículas de diâmetros menores no *overflow*. Observando a paleta de cores é notável a maior velocidade do fluido no vórtice interno (MORAES *et al.*, 2009).

A Figura (4.11) mostra o tempo de residência no interior do hidrociclone. É possível ver os vórtices, primário descendente e o secundário ascendente, formados dentro do equipamento, que são responsáveis pela trajetória do fluido e partículas sólidas. As partículas fluidas que saem pelo *overflow* apresentam um tempo de residência muito maior que aquelas que saem pelo *underflow*.

A trajetória das partículas em função do tempo de residência pode ser visto na Figura (4.12). Observando a Figura (4.12) verificou-se a concentração de partículas próximas à parede, descendo em direção ao *apex*, em trajetória espiral. O tempo de residência das partículas sólidas que saem pelo *underflow* é maior que aquelas que saem pelo *overflow*.

Figura 4.10 – Linhas de corrente e vórtice secundário no interior do hidrociclone (Caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).

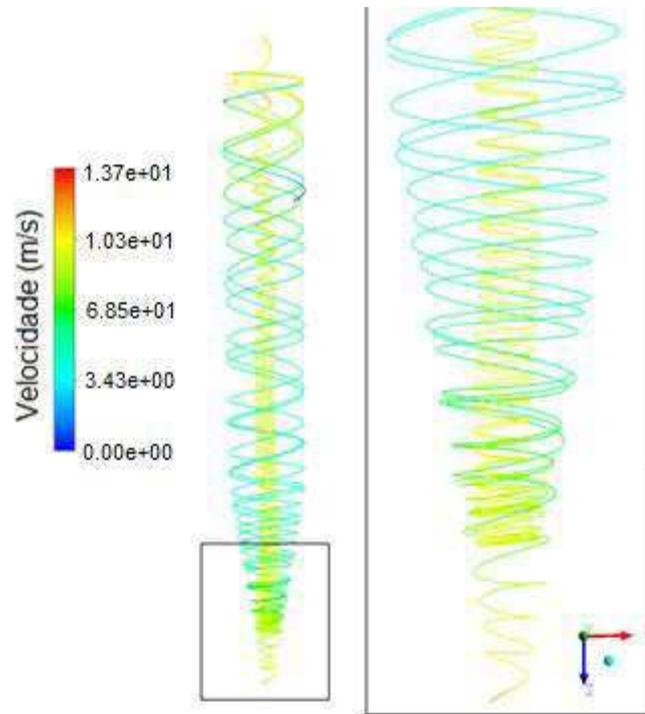


Figura 4.11 – Tempo de residência do fluido no hidrociclone (Caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).

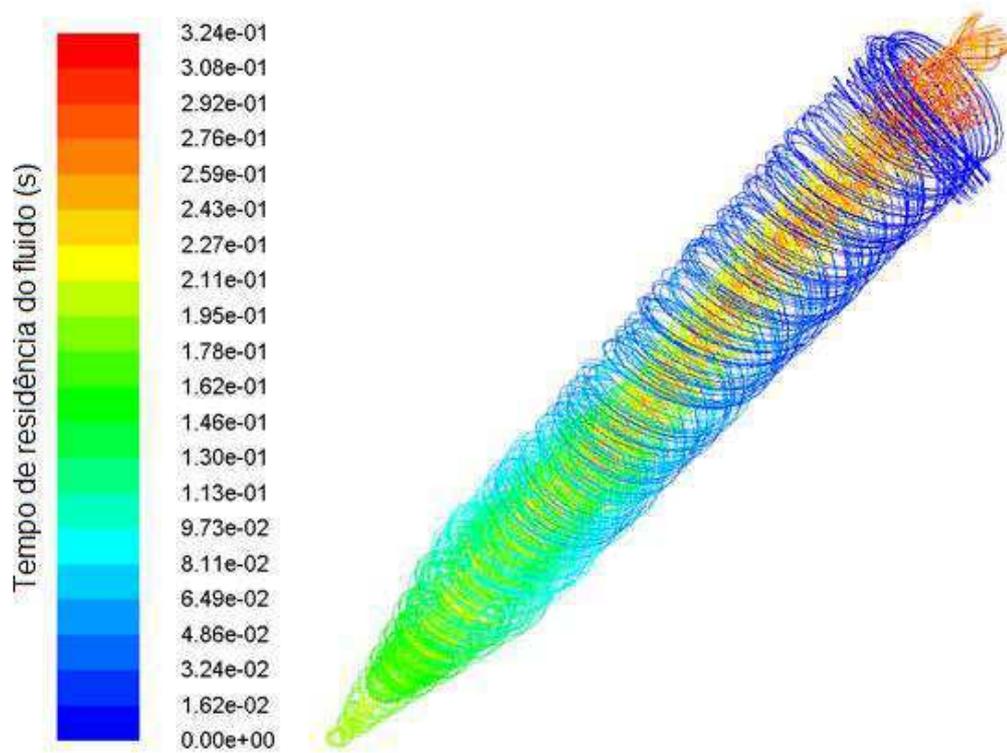
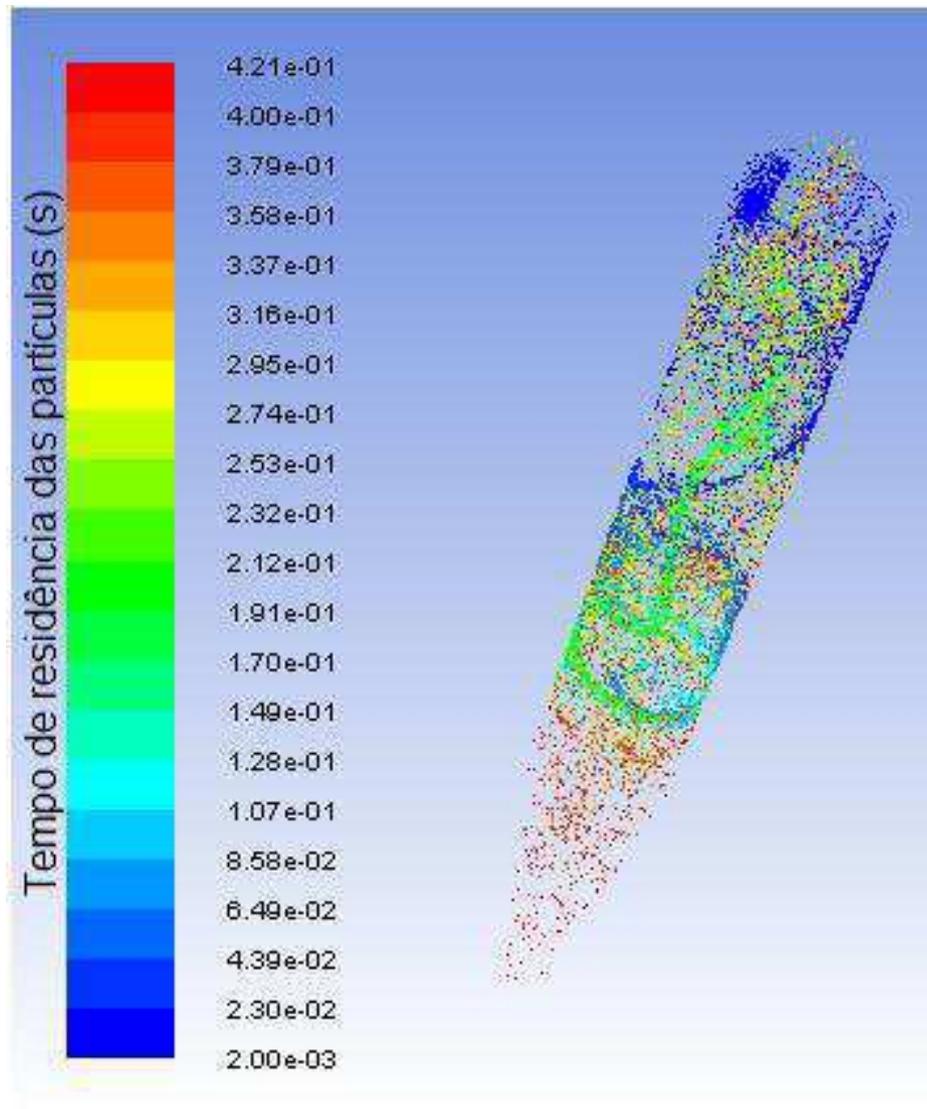
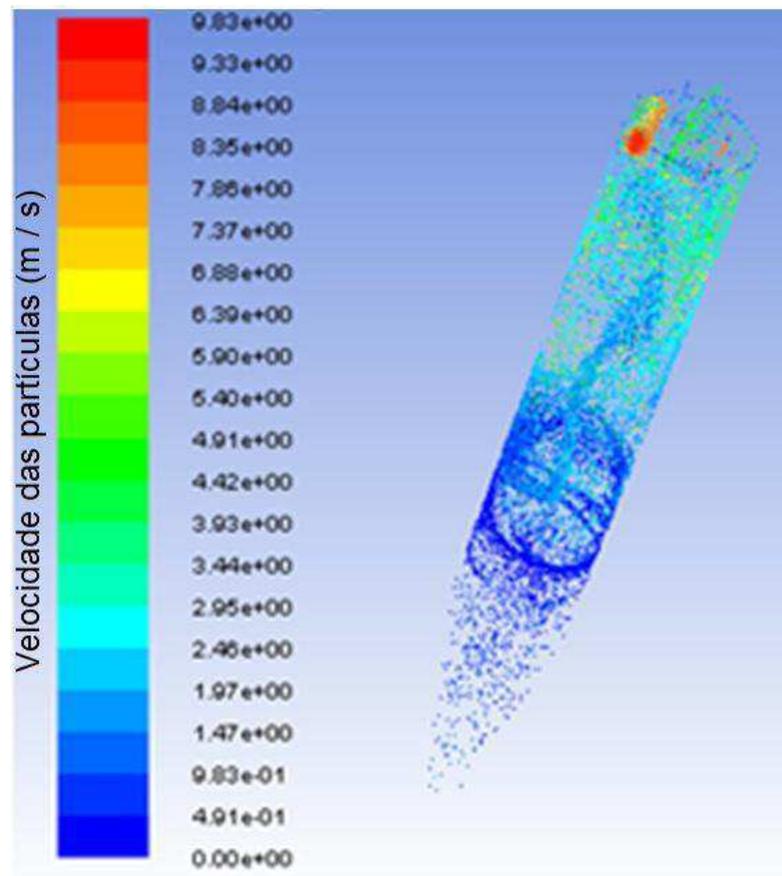


Figura 4.12 – Tempo de residência das partículas no interior do hidrociclone (Caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).



A Figura 4.13 mostra a velocidade das partículas no interior do hidrociclone. Observa-se que a velocidade das partículas que caminham na direção do *underflow* é inferior às que são separadas pelo *overflow*. Como visto na Figura 4.10, a velocidade da corrente do vórtice externo é menor, e logo observa-se que os resultados apresentados pela fase contínua, na Figura 4.10, e fase discreta, na Figura 4.13, são coerentes. Observando as regiões de maior concentração de partículas no interior do equipamento, Verifica-se que essas regiões são justamente às próximas as paredes e próximo ao núcleo central, evidenciando o efeito da separação.

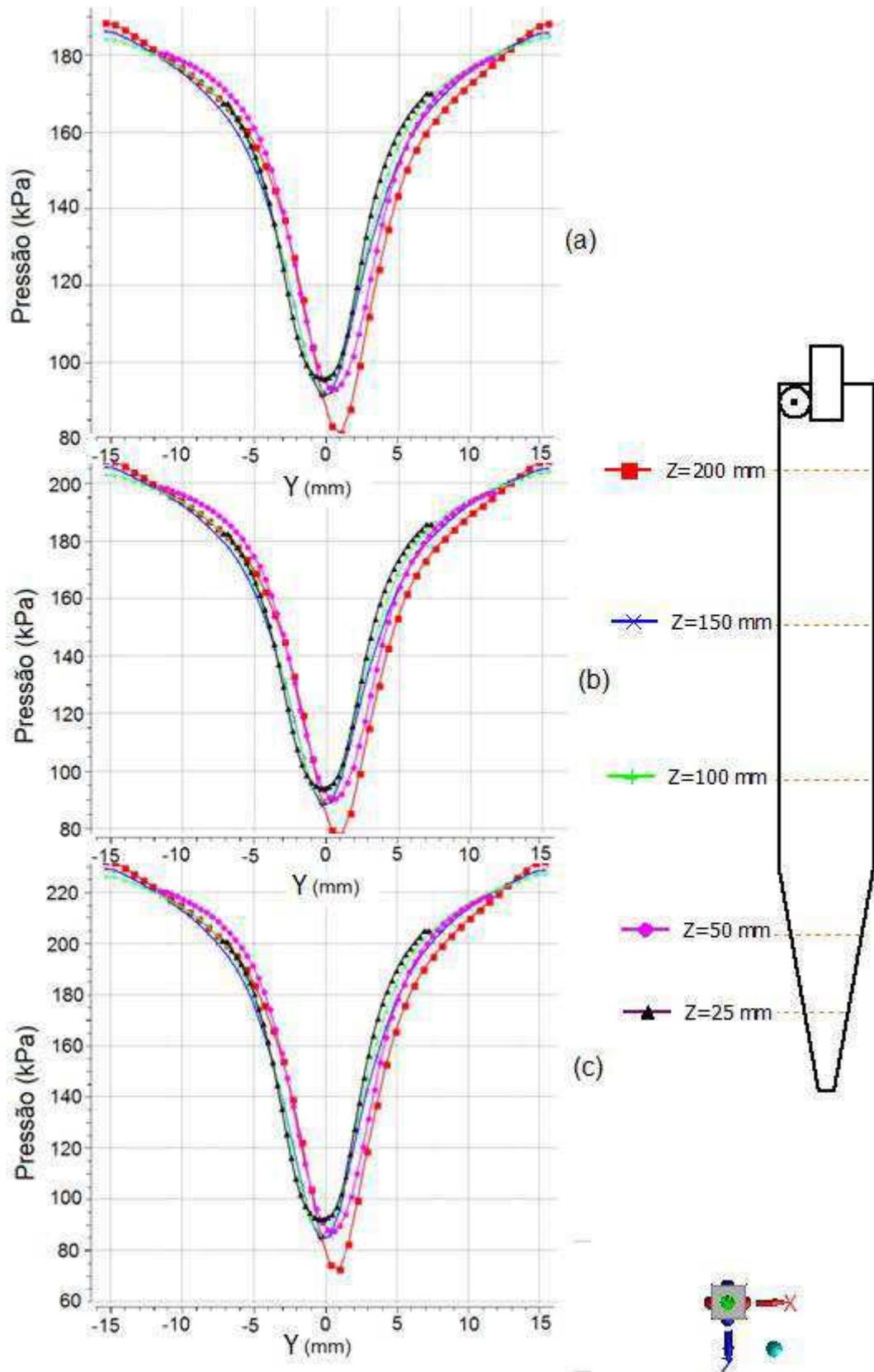
Figura 4.13 – Velocidade das partículas no interior do hidrociclone (Caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).



4.3.3 Perfis de pressão

Comparando-se as Figuras (4.3) e (4.14) verifica-se que a pressão máxima cresce com o aumento da vazão mássica de alimentação. Contudo, a pressão mínima diminui no núcleo do equipamento com o aumento da vazão. Na Figura (4.4) e mais adiante na Figura (4.16), a velocidade tangencial cresce com o aumento da vazão, e sabe-se que o aumento na velocidade tangencial está relacionado ao aumento na eficiência de separação. Por outro lado, sabe-se que a diminuição da pressão no núcleo do equipamento é um dos responsáveis pela formação do *air core*, um fenômeno conhecido por diminuir a eficiência de separação. Desses comentários, pretende-se introduzir o fato de que o aumento da vazão de alimentação é responsável por dois efeitos: um com características que tendem a aumentar a eficiência de separação, e outro que tende a diminuir tal eficiência. Dos resultados de eficiência total reduzida da Tabela (4.2), o aumento da eficiência não aumenta de forma linear com a vazão de alimentação, mostrando uma possível combinação desses efeitos.

Figura 4.14 – Perfil de pressão (Pa) no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes casos. A) Caso (1). b) Caso (2). c) Caso (3).

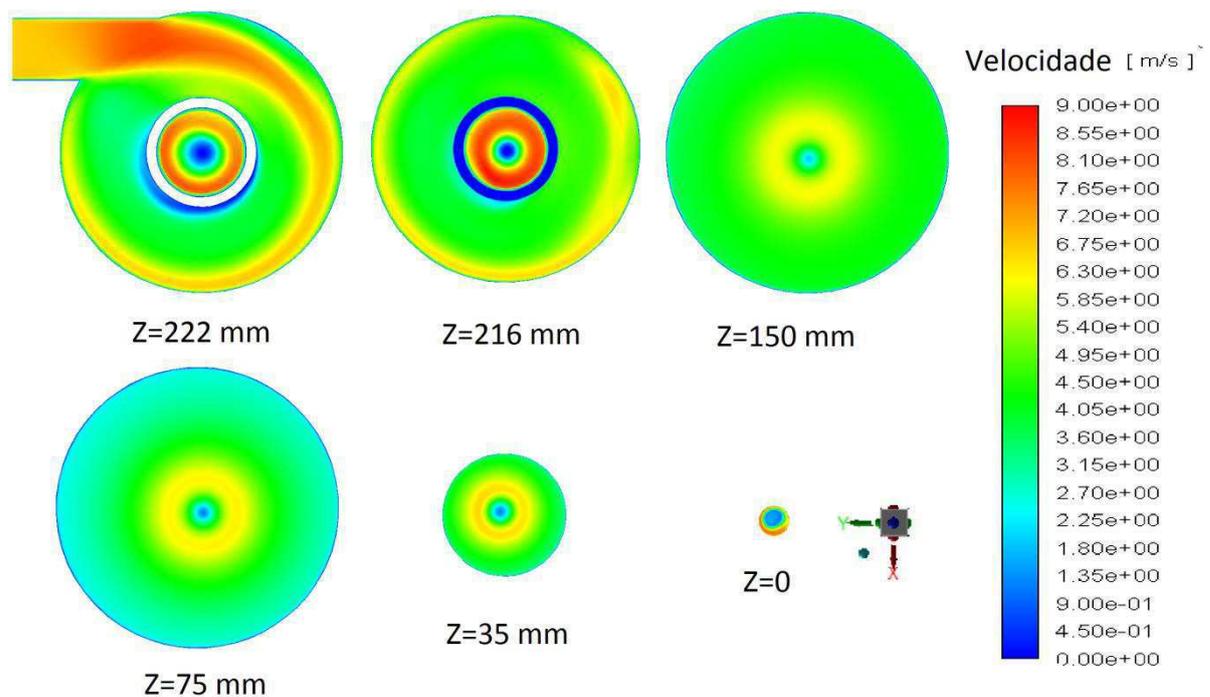


4.3.4 Perfis e vetores de velocidade

A Figura (4.15) mostra a distribuição de velocidade em diferentes planos paralelos ao longo do eixo Z do hidrociclone que ajudam a compreender o escoamento e variação de velocidade no interior do equipamento. Observando os planos, verifica-se que nas regiões da entrada e do *vortex finder* ocorrem as maiores velocidades e, certamente, as maiores tensões cisalhante e fluxo turbulento.

Os planos que interceptam o eixo longitudinal mostram que, logo abaixo da região do *vortex finder*, o escoamento apresenta uma maior uniformidade na velocidade.

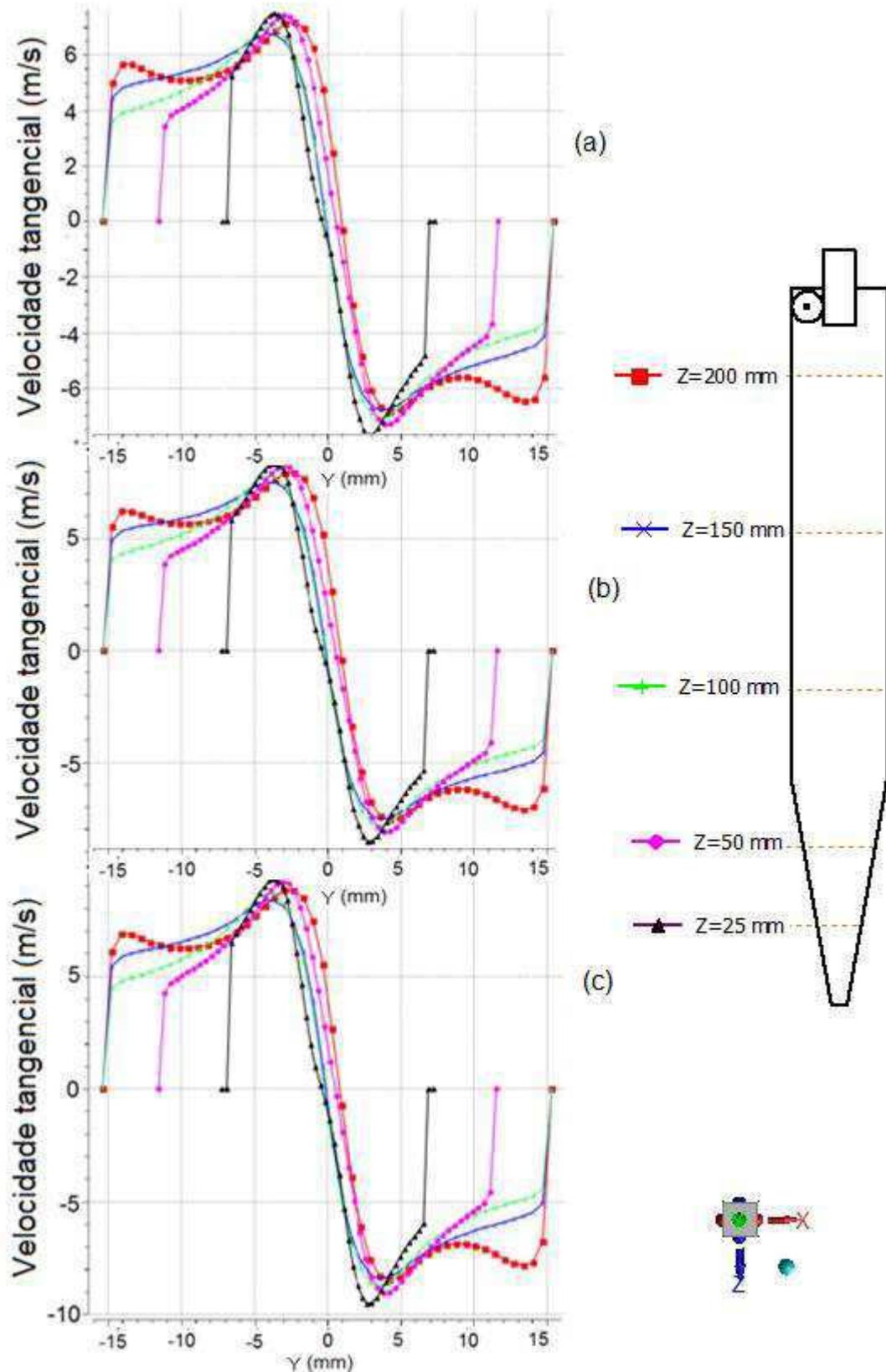
Figura 4.15 – Distribuição de velocidade no interior do hidrociclone em diferentes posições transversais ao eixo Z (Caso 1, modelo de turbulência RSM, $t = 1$ s).



A Figura (4.16) mostra os perfis de velocidade para os casos (2), (3) e (4). Observa-se que o perfil de velocidade aumenta de forma semelhante para todas as seções quando a vazão de alimentação é aumentada.

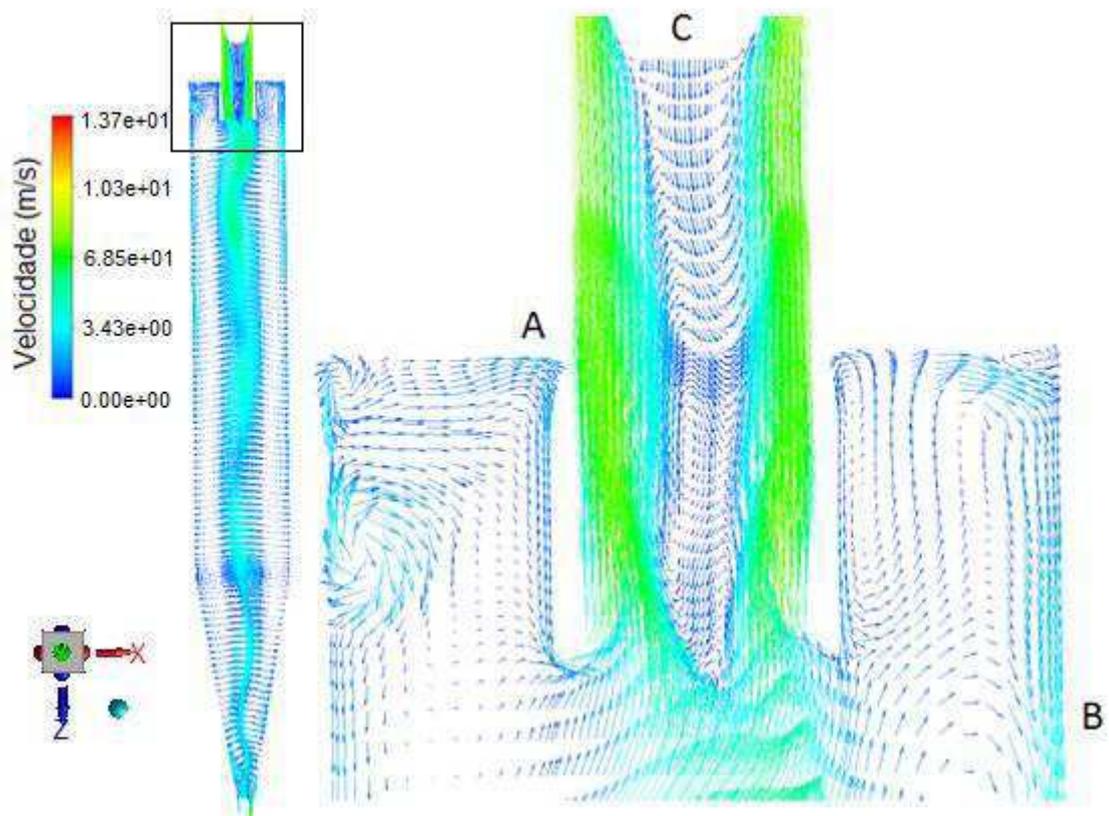
A eficiência de separação é dependente do campo de velocidade, pois seu valor determina diretamente a intensidade do campo centrífugo. Quanto maior a velocidade tangencial, maior será a intensidade do campo centrífugo, responsável pela separação das partículas sólidas.

Figura 4.16 – Perfil de velocidade no plano XY ao longo do eixo Z do hidrociclone para diferentes casos. a) Caso (1), b) Caso (2) e c) Caso (3).



A Figura (4.17) mostra o campo de vetores de velocidade em um plano $Y = 0$ no equipamento. Nesta figura é possível observar, próximo à região “A”, um fluxo de curto circuito citado por Tonni, (2012); próximo à região “B”, uma zona de recirculação do vórtice ascendente para o descendente e, na região “C” vê-se um fluxo reverso responsável pela formação do *Air Core*.

Figura 4.17 – Campo vetorial de velocidade da região superior do hidrociclone, plano $Y = 0$.



A Figura (4.18) dá continuidade à análise do campo vetorial de velocidade mostrando a região “D”, próximo ao afunilamento do hidrociclone, onde é percebido um aumento na recirculação junto à parede indo para o vórtice interno ascendente.

A Figura (4.19) ilustra o campo vetorial de velocidade na região do *Underflow*. A região “E” mostra a direção dos vetores na região onde o vórtice interno ascendente é formado, enquanto a região “F” mostra a direção da descarga.

Figura 4.18 – Campo vetorial de velocidade da região cilíndrico-cônica, do hidrociclone, plano $Y = 0$

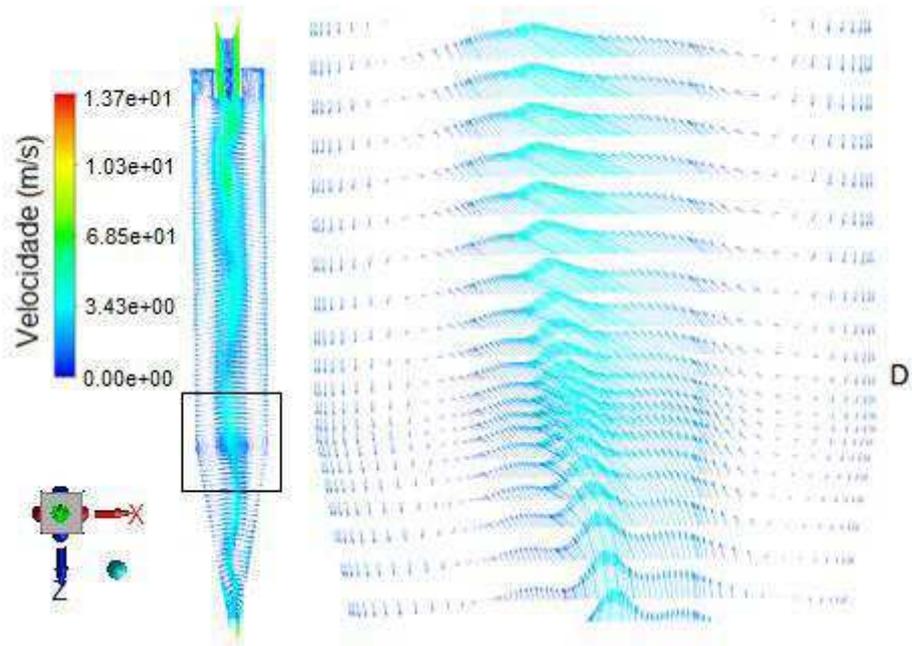
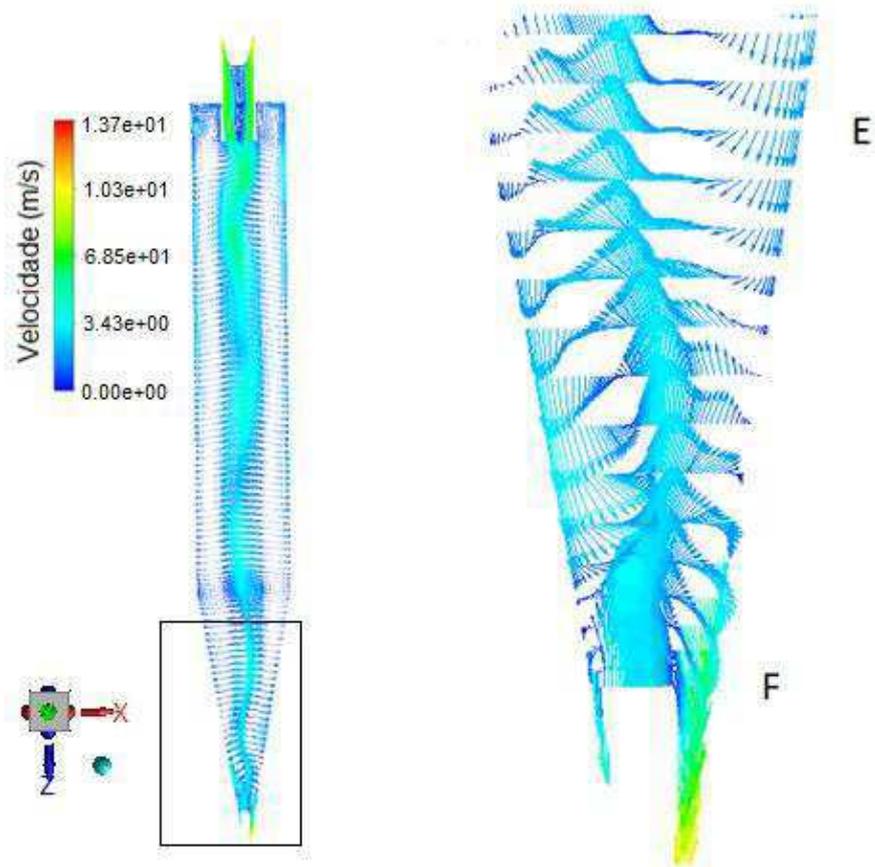


Figura 4.19 – Campo vetorial de velocidade da região cônica do hidrociclone, plano $Y = 0$



4.4 Análise da eficiência de separação

As Figuras (4.20) a (4.23) ilustram o comportamento da eficiência granulométrica reduzida simulada pelo Ansys Fluent, e aquela predita pela Equação (2.3), após ajuste aos dados preditos.

Figura 4.20 – Eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro de partícula para o Caso (1).

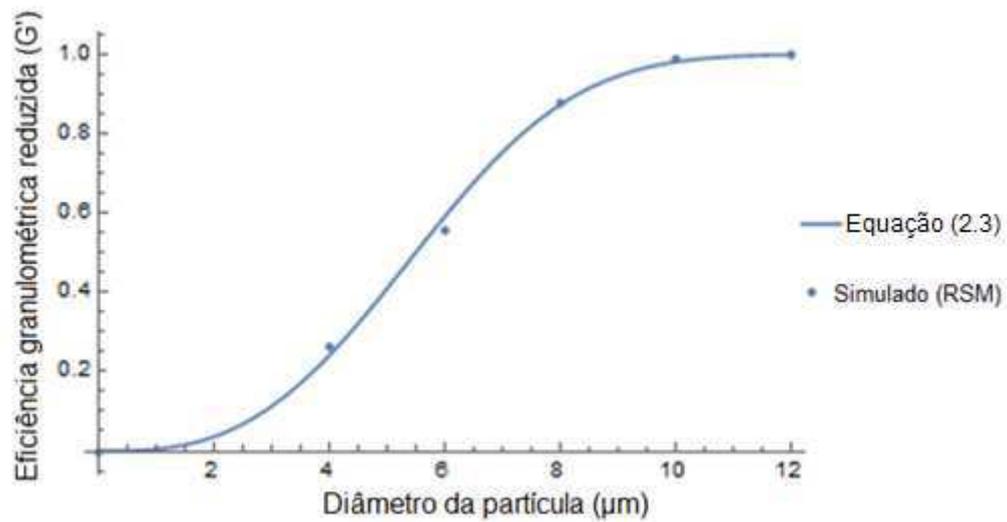


Figura 4.21 – Eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro da partícula para o Caso (2).

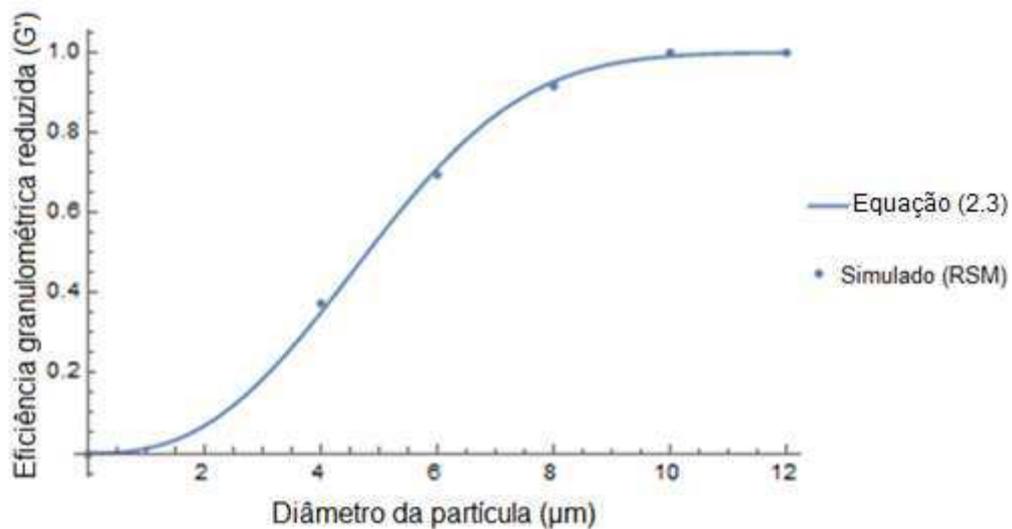


Figura 4.22 – Eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro da partícula para o Caso (3).

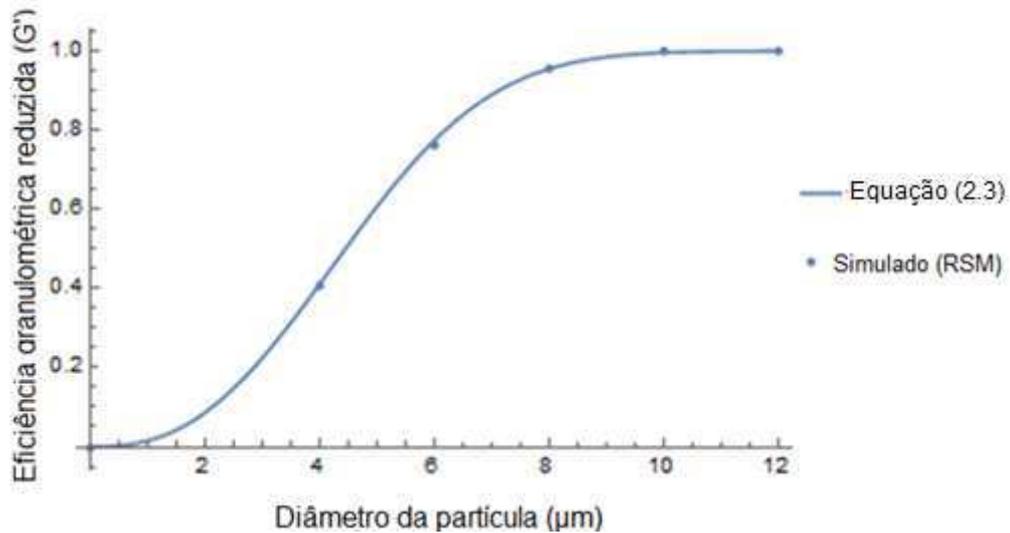
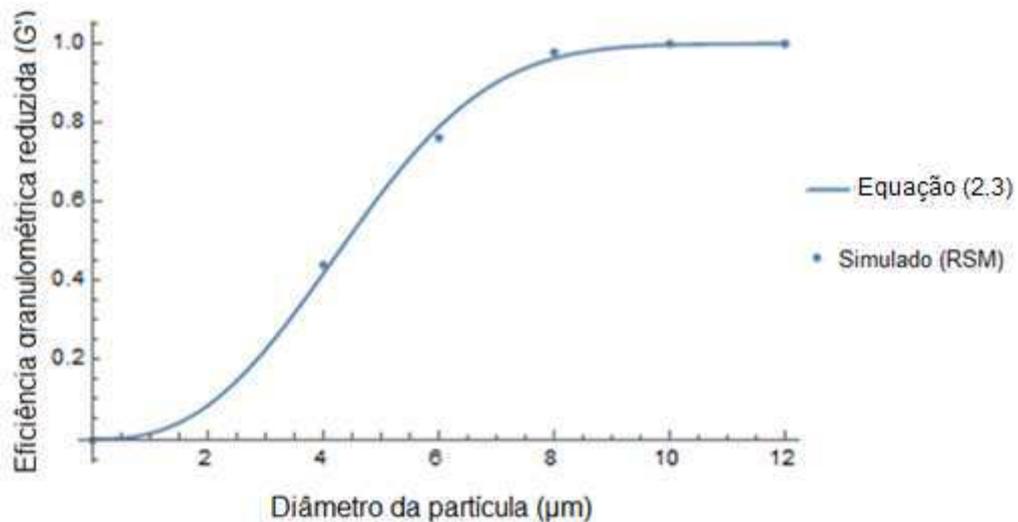


Figura 4.23 – Eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro da partícula para o Caso (4).



Após análises das figuras verifica-se que a eficiência granulométrica reduzida aumenta com o diâmetro das partículas. Para $d_p \geq 12$, a eficiência granulométrica reduzida já atinge seu valor máximo. Da comparação entre os resultados simulados e dado pela Equação (2.3) verificou-se um excelente ajuste com coeficiente de correlação muito próximo de 1.

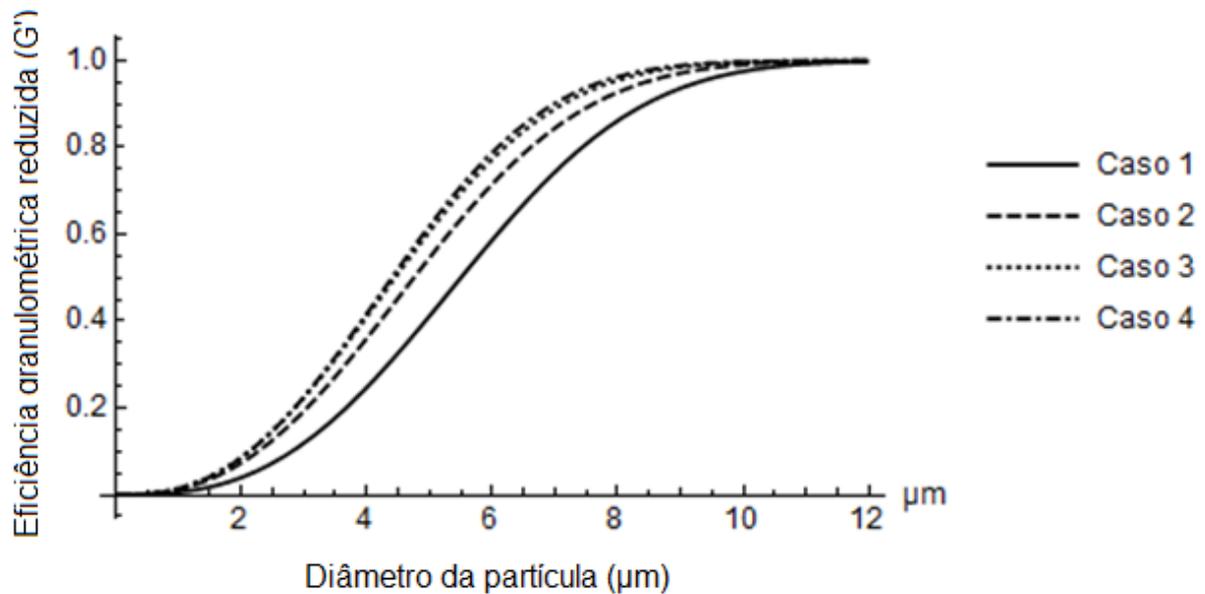
A Figura (4.24) mostra uma comparação das curvas de eficiência granulométrica reduzida entre os casos (1) a (4). Observando as curvas verificou-se que o aumento da

diferença de pressão proporcional a um aumento na eficiência de separação. Contudo para valores de $\Delta P \geq 147$ kPa, esse aumento é insignificante. A Tabela (4.3) mostra o valor do parâmetro (m) da equação (2.3)

Tabela 4.3 – Parâmetro m da equação (2.3)

Expoente	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
m	2,80	2,55	2,55	2,60
d'_{50}	5,50	4,75	4,40	4,40

Figura 4.24 – Comparação entre as eficiências granulométrica reduzida predita em função do diâmetro de partícula.



CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

Dos resultados desta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser citadas:

- a) A resolução da malha e escolha do modelo de turbulência RSM se mostrou fundamental na precisão dos resultados.
- b) A análise via CFD se mostrou capaz de capturar os fenômenos físicos pertinentes ao problema como; região de inversão do vórtice, decréscimo de pressão em direção ao eixo longitudinal do equipamento, regiões de velocidade máxima próximas ao eixo central, e formação do núcleo de ar nas saídas do equipamento.
- c) Os resultados numéricos dos valores de queda de pressão, razão de líquido e eficiência total reduzida se mostraram razoavelmente próximos aos resultados experimentais. Os resultados simulados tendem a seguir o mesmo comportamento dos resultados experimentais nessas variáveis.
- d) As curvas de distribuição de eficiência granulométrica reduzida apresentaram bom ajuste à equação proposta, para diâmetros iguais ou maiores que 4 μm . Para diâmetros menores o modelo apresenta predição muito distante dos valores experimentais.
- e) Em termos gerais, a análise de CFD com base na abordagem Euleriana-Lagrangeana se mostrou como uma poderosa ferramenta de predição do desempenho de hidrociclones, apresentando grande sensibilidade à variação dos parâmetros operacionais.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Como sugestão para futuros trabalhos pode – se citar:

- a) Analisar via CFD a separação de sólidos em hidrociclones para diferentes concentrações de sólidos através da abordagem Euler-Lagrange.
- b) Estudar o modelo LES nas mesmas condições de contorno e operações, desta pesquisa e comparar com o modelo de turbulência RSM.
- c) Estudar o efeito *Fish hook* considerando diâmetros de partículas menores que 4 μm através de uma abordagem Euler – Euler.
- d) Verificar o efeito da variação da geometria no hidrociclone para diferentes diâmetros de *apex*.

REFERÊNCIAS

AKW. **Separadores Hidrociclones**. Disponível em: <http://www.akwauv.com/Hidrociclones-AKA-VORTEX-e-distribuidores-radiais-AKA-SPIDER.htm>> acesso em: 27 de agosto de 2017.

ALMEIDA, L. C. **Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo**. Projeto de Final de Curso: Escola de Química / UFRJ. Rio de Janeiro, 2009

ALVES, J. V. B. **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola de Química/UFRJ/EQ, Universidade federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://186.202.79.107/download/separacao-do-oleo-residual-de-agua-em-refinarias.pdf>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2018.

ANSYS 18.0. **Manual do usuário**, 2017.

BOURGEOIS, F.; MAJUMDER, A. K. Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon? **Powder Technology**, v. 237, p. 367–375, 2013.

CHU, K. W.; Wang, B.; Yu, A. B.; Vince, A.. Particle scale modelling of the multiphase flow in a dense medium cyclone: Effect of vortex finder outlet pressure. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 46–58, 2012.

CUI; Zhang, C.; Wei, D.; Lu, S.; Feng, Y. Effects of feed size distribution on separation performance of hydrocyclones with different vortex finder diameters. **Powder Technology**, v. 322, p. 114–123, 2017.

DUBEY, R. K.; Climent, E. ; Banerjee, C.; Majumder, A.K.. Performance monitoring of a hydrocyclone based on underflow discharge angle. **International Journal of Mineral Processing**, v. 154, p. 41–52, 2016.

ESSS. ENGENHARIA ASSISTIDA POR COMPUTADOR: **O QUE É E COMO FUNCIONA?** Disponível em :< <http://www.esss.com.br/blog/2014/08/engenharia-assistida-por-computador-o-que-e-e-como-funciona/>> acesso em 28 de agosto de 2017.

FU, S.; Fang, Y.; Yuan, H.; Tan, W.; Dong, Y.. Effect of the medium's density on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different densities. **Waste Management**, v. 67, p. 27–31, 2017.

GHADIRIAN, M.; Hayes, R.E.;Mmbaga, J.; Afacan, A.; Xu Z.. On the simulation of hydrocyclones using CFD. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 91, n. 5, p. 950–958, 2013.

GHODRAT, M.; Kuang, S.B.; Yu, A.B; Vince, A.; Barnett, G.D.; Barnett, P.J. .Numerical analysis of hydrocyclones with different conical section designs. **Minerals Engineering**, v. 62, p. 74–84, 2014a.

GHODRAT, M. Kuang, S.B.; Yu A.B.; Vince, A.; Barnett, G.D.; Barnett, P.J..Numerical analysis of hydrocyclones with different vortex finder configurations. **Minerals Engineering**, v. 63, p. 125–138, 2014b.

GONÇALVES, S. M. **Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade De Engenharia Química, Universidade Federal De Uberlândia, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17803/1/EfeitoConcentra%C3%A7%C3%A3oSolidos.pdf>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2018.

GONÇALVES, S. M.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. Effects of Solids Concentration and Underflow Diameter on the Performance of a Newly Designed Hydrocyclone. **Chemical Engineering and Technology**, v. 40, n. 10, p. 1750–1757, 2017.

HE, F.; Zhang, Y.; Wang, J.; Yang,Q.; Wang, H.; Tan, Y.. Flow patterns in mini-hydrocyclones with different vortex finder depths. **Chemical Engineering and Technology**, v. 36, n. 11, p. 1935–1942, 2013.

HWANG, K. J.; CHOU, S. P. Designing vortex finder structure for improving the particle separation efficiency of a hydrocyclone. **Separation and Purification Technology**, v. 172, p. 76–84, 2017.

HEISKANEN, K. **Particle Classification**. Chapman & Hall, Londres, 1993.

KUANG, S. B.; Chu, K.W.; Yu, A.B.; Vince, A.. Numerical study of liquid-gas-solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 17–31, 2012.

HWUANG, K.; HWUANG, Y.; YOSHIDA, H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. **Chemical Engineering Science**, volume 85, 14 de janeiro 2013, p. 62-68. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.12.046>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2018.

L. EVANS, **Setor de mineração espera expansão de 5% em 2017, apesar da crise**. Disponível em:<http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2016/08/09/internas_economia,792216/setor-de-mineracao-espera-expansao-de-5-em-2017-apesar-da-crise.shtml> . Acesso em 28 de agosto de 2017.

MALISKA C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Editora LTC, 1995, 474 p.

MORAES, C. A. C. et al. **Desenvolvimento de hidrociclones para altos, médios e baixos teores de óleo**. Boletim técnico da Produção de Petróleo, volume 3, nº 2, p. 259-287. Rio de Janeiro. 2009. Disponível em <: http://www.esss.com.br/blog/wp-content/uploads/2009/05/2009.05.15_hidrociclones.pdf>: 25 de janeiro de 2018.

NARASIMHA, M. et al. Air-core modelling for hydrocyclones operating with solids. **International Journal of Mineral Processing**, v. 102–103, p. 19–24, 2012.

NASCIMENTO, J. T. **Uso de CFD na Otimização de Proporções Geométricas de um Hidrociclone para Separação Óleo/Água**. 61 p. Projeto de Final de Curso: Escola de Química / UFRJ. Rio de Janeiro, 2008

NI, L.; TIAN, J.; ZHAO, J. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. **Separation and Purification Technology**, v. 171, p. 270–279, 2016.

PENNA, Carlos G.. **Efeitos da mineração no meio ambiente**. O eco, 26 de janeiro de 2009. Disponível em: < <http://www.oeco.org.br/colunas/carlos-gabaglia-penna/20837-efeitos-da-mineracao-no-meio-ambiente/>>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2015.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**, Chemical Engineering Series, 4^o ed., Butterworths, London (2000).

TONIN, P. C. **Otimização computacional de hidrociclone na irrigação pressurizada**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 92 p. (Tese, Doutorado, Engenharia Agrícola), 2012

VAKAMALLA, T. R.; Kumbhar, K. S.; Gujjula, R.; Mangadoddy, N.. Computational and experimental study of the effect of inclination on hydrocyclone performance. **Separation and Purification Technology**, v. 138, p. 104–117, 2014.

VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrante**. (Tese De Doutorado) PPG-EQ/UFU, Urbelândia-MG, 297p. 2006.

VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator. **Minerals Engineering**, v. 57, p. 50–56, 2014.

XU, Y. ; Song, X.; Sun,Z.; Lu, G.; Li,P.; Yu, J.. Simulation analysis of multiphase flow and performance of hydrocyclones at different atmospheric pressures. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 1, p. 443–453, 2012.

XU, Y. ; Song, X.; Sun, Z.;Tang, B.; Yu, J.. Steady-state distribution of air-core in a hydrocyclone. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 95, n. 4, p. 757–766, 2017.

ZHANG, L.; Wei, L.; Chang, B. H.; Xing, J. L.; Jia, K.. **CFD numerical simulation of Archimedes spiral inlet hydrocyclone**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais**.2013

ZHANG, C.; Wei, D.; Cui, B.; Li, T.; Na Luo. Effects of curvature radius on separation behaviors of the hydrocyclone with a tangent-circle inlet. **Powder Technology**, v. 305, p. 156–165, 2017.