



ALEXANDRE GARCIA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONE
PARA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS
NÃO-NEWTONIANOS**

**LAVRAS – MG
2020**

ALEXANDRE GARCIA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONE
PARA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS
NÃO-NEWTONIANOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Graduação em Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

ALEXANDRE GARCIA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONE
PARA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS
NÃO-NEWTONIANOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Graduação em Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel

APROVADO em 21 de agosto de 2020

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
DEG/UFLA

Prof.^a Dr.^a Suellen Mendonça Nascimento
DEG/UFLA

Prof. Dr. Tiago Pires de Oliveira
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG
2020**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele eu não seria capaz de ter entrado na Universidade e nem ter concluído as disciplinas, Ele me deu forças para prosseguir mesmo nos momentos mais difíceis. Sem Ele não somos nada.

Agradeço a minha família, em especial minha mãe, Liege Junqueira, e meu pai, Roberto Maciel. Pois eles sempre serão minha base e sempre me proporcionaram tudo para que eu pudesse chegar a esse momento.

Agradeço a minha namorada Ana Carolina, que está comigo praticamente desde o início da graduação, em vários momentos pensei em desistir, mas ela estava lá para me apoiar.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Irineu Petri por cada disciplina ministrada com louvor, cada ensinamento que levarei para vida e por ter me ensinado praticamente tudo que sei em CFD.

RESUMO

A operação de hidrociclonagem é utilizada principalmente na separação de misturas sólido-líquido e líquido-líquido, operação esta que emprega aceleração centrífuga. Na indústria petroquímica, faz-se uso da hidrociclonagem na separação de material particulado, advindo da perfuração do poço, juntamente com fluido de perfuração, visto que a não retirada desse cascalho, gerado pelo processo, pode ocasionar o desgaste prematuro da broca ou entupimento do poço. Isso geraria um grande prejuízo financeiro para a indústria, pois causaria uma parada obrigatória dessa operação. Entender como funciona esta operação unitária quando se utiliza o fluido de perfuração, considerado como um fluido não-newtoniano pseudoplástico, é de extrema importância para este tipo aplicação. Este estudo tem como objetivo realizar a simulação numérica, em 3 dimensões, de um hidrociclone operando com fluido não-newtoniano, avaliando os parâmetros de eficiência total e razão de líquido. Para isso, foram construídas cinco geometrias com diferentes diâmetros de underflow e, após a simulação das mesmas, obteve-se resultados de perfil de velocidade tangencial e axial dentro do hidrociclone, perfil de pressão confirmando a formação do air-core e foi efetuada a injeção de partículas para obtenção dos valores de eficiência total e razão de líquido. Os valores de eficiência total e razão de líquido foram comparados com a literatura. De forma geral, para eficiência total, os resultados dos erros relativos obtidos, quando comparados com o trabalho de referência, apresentaram valores satisfatórios, com desvios menores ou iguais a 10%. Já para os valores de razão de líquido, foi possível obter dois resultados satisfatórios, no caso a geometria 4 e 5, que apresentaram erros relativos de 2,89% e 15,07%. Os resultados encontrados permitiram concluir que a análise CFD comprovou ser eficaz para prever o escoamento de fluido não-newtonianos em hidrociclones, se mostrando uma boa ferramenta para realização de projetos ou otimização de hidrociclones da indústria petroquímica.

Palavras-chave: Eficiência Total, Razão de Líquido, fluido pseudoplástico, fluido de perfuração.

ABSTRACT

The hydrocycloning operation is mainly used to separate solid-liquid and liquid-liquid mixtures, an operation that employs centrifugal acceleration. In the petrochemical industry, hydrocycloning is used to separate particulate material from the well, together with drilling fluid, since not removing the gravel generated by the process can cause premature wear of the drill bit or blockage of the well. This would generate a great financial loss for the industry, as it would cause an obligatory shutdown of this operation. Understanding how this unitary operation works when using the drilling fluid, considered as a pseudoplastic non-newtonian fluid, is extremely important for this type of application. This study aims to perform a numerical simulation, in 3 dimensions, of a hydrocyclone operating with non-Newtonian fluid, evaluating the parameters of total efficiency and liquid ratio. For this, five geometries with different underflow diameters were constructed and, after their simulation, results of tangential and axial velocity profile were obtained inside the hydrocyclone, pressure profile confirming the formation of the air-core and the injection of particles was performed to obtain the values of total efficiency and liquid ratio. The values of total efficiency and liquid ratio were compared with the literature. In general, for total efficiency, the results of the relative errors obtained, when compared with the reference work, presented satisfactory values, with deviations less than or equal to 10%. For the values of liquid ratio, it was possible to obtain two satisfactory results, in the case of geometry 4 and 5, which presented relative errors of 2,89% and 15,07%. The results found allowed the conclusion that the CFD analysis proved to be effective in predicting the flow of non-newtonian fluid in hydrocyclones, proving to be a good tool for projects or optimization of hydrocyclones in the petrochemical industry.

Keywords: Total Efficiency, Fluid Ratio, pseudoplastic fluid, drilling fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Geometria básica de um hidrociclone.....	4
Figura 2.2 – Dimensões de um Hidrociclone.....	6
Figura 2.3 – Exemplo de hidrociclones clarificador (a) e concentrador (b).	8
Figura 2.4 – Classificação dos fluidos de acordo com comportamento reológico.13	
Figura 2.5 – Geometria criada pelo <i>software SpaceClaim</i>	16
Figura 2.6 – Malha gerada pelo <i>software Meshing</i>	17
Figura 2.7 – Divisão das escalas proposta pelo modelo LES.	20
Figura 2.8 – <i>Air-core</i> formado dentro de um hidrociclone	22
Figura 3.1 – Geometrias em 3 dimensões utilizadas neste trabalho: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5.....	26
Figura 3.2 – Malha em 3 dimensões utilizadas neste trabalho: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5.....	27
Figura 4.1 –Perfil de velocidade tangencial do fluido para as geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.....	32
Figura 4.2 –Perfil de velocidade axial das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.33	
Figura 4.3 –Perfil de viscosidade das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.....	34
Figura 4.4 –Perfil de pressão das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.....	35
Figura 4.5 –Perfil de entrada de ar das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.....	36
Figura 4.6 –Injeção de partículas nas geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.....	39
Figura 4.7 –Perfil de magnitude de velocidade da geometria 2 a) fluido não- newtoniano; b) água.....	41
Figura 4.8 –Perfil de viscosidade da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água.	42
Figura 4.9 –Perfil de pressão da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água. 43	
Figura 4.10 –Perfil de entrada de ar na geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água.....	44
Figura 4.11 – Gráfico de vazão por tempo para simulação da geometria 2 utilizando fluido não-newtoniano.....	47
Figura 4.12 – Gráfico de vazão por tempo para simulação da geometria 2 utilizando água.....	47
Figura A.1 – <i>Aspect Ratio</i> das geometrias: a) geometria 1, b) geometria 2, c) geometria 3, d) geometria 4, e) geometria 5.....	52

Figura A.2 – Skewness das geometrias: a) geometria 1, b) geometria 2, c) geometria 3, d) geometria 4, e) geometria 5..... 54

Figura A.3 – Jacobian das geometrias: a) geometria 1, b) geometria 2, c) geometria 3, d) geometria 4, e) geometria 5..... 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações geométricas para hidrociclones.....	6
Tabela 3.1 – Dimensões em comum das 5 geometrias simuladas.	25
Tabela 3.2 – Dimensões específicas de cada uma das 5 geometrias.....	25
Tabela 3.3 - Número de células em cada amostra simulada.	26
Tabela 3.4 – Valores médio, mínimo e máximo de <i>Aspect Ratio</i> , <i>Skewness</i> e <i>Jacobian</i> para cada uma das geometrias.....	28
Tabela 3.5 – Tempo gasto em simulação.	31
Tabela 4.1 – Valores médios de viscosidade para cada geometria.	34
Tabela 4.2 – Dados de vazão mássica de todas as geometrias simuladas.....	37
Tabela 4.3 – Comparação dos valores de Razão de Líquido de todas as geometrias simuladas com o trabalho de Mognon (2015).	38
Tabela 4.4 – Valores de taxa mássica na Alimentação, <i>Overflow</i> e <i>Underflow</i> para cada uma das geometrias simuladas.	39
Tabela 4.5 – Comparação dos valores de Eficiência total de todas as geometrias simuladas com o trabalho de Mognon (2015).	40
Tabela 4.6 – Valores médios de viscosidade e desvio padrão para os fluidos utilizados.....	42
Tabela 4.7 – Dados de vazão mássica da geometria 2 com fluidos diferentes.	45
Tabela 4.8 – Comparação dos valores de Razão de Líquido para os dois fluidos.	45
Tabela 4.9 – Valores de taxa mássica na Alimentação, <i>Overflow</i> e <i>Underflow</i> para a geometria 2 com fluidos diferentes.....	46
Tabela 4.10 – Comparação dos valores de Eficiência total para os dois fluidos. .	46

LISTA DE SÍMBOLOS

C_v	Concentração de Sólidos	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
C_{wa}	Concentração mássica na alimentação	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
C_{wu}	Concentração mássica na alimentação	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone	[m]
D_i	Diâmetro da alimentação do hidrociclone	[m]
D_o	Diâmetro do <i>overflow</i> do hidrociclone	[m]
D_u	Diâmetro do <i>underflow</i> do hidrociclone	[m]
d'_{50}	Diâmetro de corte	[m]
Eu	Número de Euler	[-]
K	Parâmetro dependente da configuração do hidrociclone	[-]
k	Índice de consistência do fluido	[Pa.s ⁿ]
l	Comprimento do <i>vortex finder</i> do hidrociclone	[m]
L	Comprimento total do hidrociclone	[m]
L_l	Comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone	[m]
n	Inclinação da curva do fluido	[-]
Q	Vazão do fluido na alimentação do hidrociclone	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
Re	Número de Reynolds	[-]
R_L	Razão de líquido	[-]
St_{50}	Número de Stokes	[-]
W_a	Vazão mássica na alimentação do hidrociclone	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
W_u	Vazão mássica no <i>underflow</i> do hidrociclone	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
W_{sa}	Taxa mássica de sólidos na alimentação do hidrociclone	$\left[\frac{Kg}{s}\right]$
W_{su}	Taxa mássica de sólidos na alimentação do hidrociclone	$\left[\frac{Kg}{s}\right]$

γ	Taxa de deformação do fluido	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$
η	Eficiência Total	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[Pa.s]
ρ	Massa específica do fluido	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
ρ_s	Massa específica do sólido	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
τ	Tensão cisalhante aplicada	[Pa]
τ_o	Limite de escoamento real	[Pa]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Hidrociclones	4
2.1.1 Famílias de hidrociclones.....	5
2.1.2 – Utilização de hidrociclones na indústria do petróleo	8
2.1.3 - Equacionamento matemático de hidrociclones.....	9
2.1.4 Grupos adimensionais em hidrociclones.....	10
2.1.5 Desempenho de hidrociclones.....	11
2.1.5.1 Eficiência total	11
2.1.5.2 Razão de líquido.....	11
2.1.6 Perfis de escoamento.....	12
2.1.6.1 Perfil de velocidade tangencial	12
2.1.6.2 Perfil de velocidade axial	12
2.2 Fluidos não-newtonianos	12
2.2.1 Fluido pseudoplástico.....	14
2.3 Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	14
2.3.1 Geração da geometria.....	15
2.3.2 Geração da malha.....	16
2.3.3 Simulação.....	17
2.3.4 Modelo de turbulência	19
2.3.4.1 Modelo LES Smagorinsky	19
2.3.5 Modelo de Volume de Fluido	22
2.3.6 Função Definida pelo Usuário (<i>User Defined-Function</i>)	23
2.3.7 Injeção de partículas.....	23
2.4 Trabalhos de simulação em hidrociclones	23
3 METODOLOGIA NUMÉRICA.....	25

3.1 Geometria e malha computacional.....	25
3.2 Modelos e condições de contorno.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 Perfis de velocidade.....	32
4.2 Perfis de pressão.....	35
4.3 Perfis de fases.....	36
4.4 Comparação de resultados experimentais e simulados com fluido não-newtoniano.....	37
4.4.1 Razão de líquido.....	37
4.4.1 Eficiência total.....	38
4.5 Comparação entre simulações com fluido newtoniano e não-newtoniano utilizando a geometria 2.....	40
4.5.1 Perfis de velocidade para comparação dos fluidos.....	40
4.5.2 Perfis de pressão para comparação dos fluidos.....	43
4.5.3 Perfis de fase para comparação dos fluidos.....	44
4.5.4 Razão de líquido para comparação dos fluidos.....	45
4.5.5 Eficiência total para comparação dos fluidos.....	45
4.5.6 Curvas de entrada e saída ao longo do tempo para comparação dos fluidos.....	46
5 CONCLUSÕES.....	49
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	49
REFERÊNCIAS.....	51
APÊNDICE A.....	52
APÊNDICE B.....	60
APÊNDICE C.....	61

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de separar partículas de fluidos, sejam eles gasosos ou líquidos, ocorre principalmente devido às exigências de cada processo (separar ou recuperar o material particulado). Entre os equipamentos utilizados na limpeza de correntes líquidas, destaca-se o hidrociclone, pois é um equipamento de baixo custo de operação, baixo custo de construção, confiabilidade no uso e adequação em condições extremas de pressão e temperatura.

Os hidrociclones são equipamentos simples e de fácil construção, sendo basicamente feitos de uma parte cilíndrica acoplada a uma região cônica. O princípio de funcionamento é determinado pela aceleração centrífuga que atua sobre as partículas sólidas, fazendo com que essas se separem do fluido, onde as dimensões geométricas de cada parte são importantes no processo de separação.

A indústria do petróleo é um dos segmentos onde, em seu processo, se faz necessária a separação sólido-líquido (material particulado do fluido de perfuração) do material que é gerado durante a perfuração do poço pela broca rotativa. Para que a perfuração possa ocorrer de maneira eficiente, o cascalho gerado deve ser removido de dentro do poço, tal remoção é feita pelo bombeamento do fluido de perfuração que arrasta cascalho até a superfície, conhecido como limpeza de poço.

Os fluidos de perfuração consistem em uma mistura de diversos componentes e sua estrutura química varia dependendo do tipo de fluido em questão, podendo ser do tipo não-newtoniano. A composição de um fluido é bastante complexa, o que resulta em um valor agregado médio de R\$300,00 o barril (PANISSET, 2014). Esses fluidos têm o objetivo primordial de promover a limpeza do interior do poço, exercer pressão hidrostática sobre as formações, selar as formações, lubrificar a coluna, resfriar a broca e transmitir energia hidráulica a broca.

Como o fluido é responsável por diversos fatores importantes durante o processo de separação, o acúmulo de cascalho gera muitos problemas, pois o cascalho presente no fluido altera suas propriedades. Pensando em uma alternativa para diminuir os gastos com a compra de fluido de perfuração, a indústria do petróleo buscou tecnologias para a separação de fluido e cascalho, como ocorre na indústria de mineração.

Dessa forma, a indústria do petróleo desenvolveu um sistema de separação de cascalhos, que é composta de uma série de operações unitárias visando a separação entre as duas fases.

Dentre as operações unitárias presentes nesse sistema, está a hidrociclonagem, que consiste na utilização de um hidrociclone para a separação do fluido de perfuração e do cascalho. Como a perfuração de um poço envolve milhares de metros cúbicos de fluido, é de extrema necessidade entender como a operação de hidrociclonagem acontece na presença de um fluido não-newtoniano para que se possa otimizar o processo de separação e diminuir os custos de operação.

Para facilitar e reduzir os custos dos estudos práticos para avaliação do comportamento e da eficiência de separação, pode-se utilizar a fluidodinâmica computacional (CFD) para prever o comportamento do escoamento interno do fluido. A fluidodinâmica utiliza técnicas matemáticas, computacionais e numéricas, para que se possa prever o comportamento do equipamento, no caso um hidrociclone, quando aplicado às condições reais de funcionamento.

A utilização de CFD para simulação da operação de hidrociclonagem é encontrada em alguns estudos, como por exemplo Alves (2012), no entanto, não há muitos trabalhos utilizando essa técnica para simulação de fluidos não-newtonianos em hidrociclones. Esse tipo de escoamento é muito importante para a indústria petroquímica, assim, faz-se necessário o estudo dessa área para previsões do comportamento desse fluido em hidrociclones.

Em vista disso, o objetivo deste trabalho consiste em modelar um hidrociclone em 3D, realizar a simulação fluidodinâmica computacional do equipamento, utilizando um fluido não-Newtoniano do tipo pseudoplástico, e comparar os resultados da simulação com o trabalho de Mognon (2015). Para alcançar esses objetivos, foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- Comparar os resultados obtidos na simulação de razão de líquido e eficiência total com os resultados experimentais obtidos por Mognon (2015).
- Gerar os perfis de velocidade tangencial, velocidade axial, viscosidade, pressão e fases.
- Comparar o escoamento no interior do hidrociclone operando com fluido newtoniano (água) e fluido não-newtoniano (fluido de perfuração), analisando a

diferença da razão de líquido, eficiência total, perfis de velocidade, viscosidade e pressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

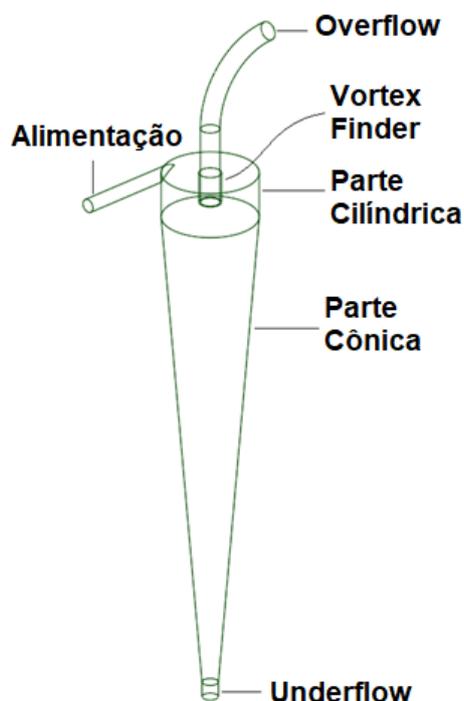
2.1 Hidrociclones

O hidrociclone, também denominado de ciclone hidráulico, é um equipamento antigo utilizado nas indústrias de particulados. A primeira patente encontrada data do século XIX, onde os hidrociclones eram empregados na separação areia-água (ARRUDA, 2008). O princípio de separação destes equipamentos é a aceleração centrífuga que atua sobre as partículas sólidas, fazendo com que essas se separem do fluido (SVAROVSKY, 2000).

É um equipamento que apresenta alta eficiência, fácil construção e instalação, tem grande versatilidade, pois pode ser usado em diversos setores industriais, além de ter seu tamanho bastante reduzido quando comparado com outros equipamentos de separação. No entanto, são suscetíveis à abrasão dos sólidos e são de certa forma inflexíveis depois de instalados (SVAROVSKY, 2000).

A configuração geométrica do hidrociclone é simples, constituída basicamente de uma seção cilíndrica, na parte superior, acoplada a uma parte cônica, na parte inferior, como pode ser visto na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Geometria básica de um hidrociclone.



Fonte: Do Autor.

A alimentação é tangencial à parede da parte cilíndrica próxima ao topo. A separação é realizada por meio da força centrífuga que forma um *vortex* primário ao longo da superfície interna das paredes cilíndricas e pela formação de um *vortex* secundário formado em torno de seu eixo, direcionando as partículas menores e mais leves para a saída na parte superior (*overflow*) e as partículas maiores e mais pesadas para a saída na parte inferior (*underflow*) (VIEIRA, 2006).

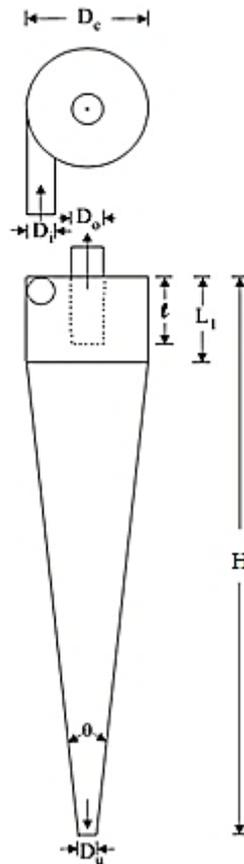
2.1.1 Famílias de hidrociclones

Os hidrociclones estão agrupados em famílias e sua classificação é feita pela relação entre a geometria de suas principais dimensões, sendo a principal característica da família a relação constante entre suas medidas e o diâmetro da parte cilíndrica (ARRUDA, 2008). Essa proporcionalidade entre as dimensões de cada família é de extrema importância no processo de separação, porque está relacionada com a capacidade de processamento deste equipamento (VIEIRA, 2006).

Existem duas famílias bem conhecidas de hidrociclones, Rietema e de Bradley, sendo os dois geometricamente semelhantes (CASTILHO, MEDRONHO, 2000). As principais dimensões são: diâmetro da parte cilíndrica (D_c), diâmetro do *overflow* (D_o), diâmetro do *underflow* (D_u), diâmetro de alimentação (D_i), comprimento da parte cilíndrica (L_l), comprimento do *vortex finder* (l), comprimento total (H) e ângulo do cone (θ).

A Tabela 2.1 apresenta as principais relações geométricas referentes a essas famílias e a Figura 2.2 apresenta as principais dimensões dos hidrociclones.

Figura 2.2 – Dimensões de um Hidrociclone.



Fonte: (MASSARANI, 2001a).

Tabela 2.1 – Relações geométricas para hidrociclones.

Relações Geométricas	Rietema	Bradley
D_i/D_c	0,28	1/7
D_o/D_c	0,34	1/5
L/D_c	5	-
L_1/D_c	-	1/2
l/D_c	0,40	1/3
Θ	10° - 20°	9°

Fonte: (MASSARANI, 2001)

A variável diâmetro da parte cilíndrica (D_c) é um parâmetro definido pelo projetista, devido ao fato de que é um diâmetro projetado com base no diâmetro de corte obtido modelo matemático de distribuição granulométrica.

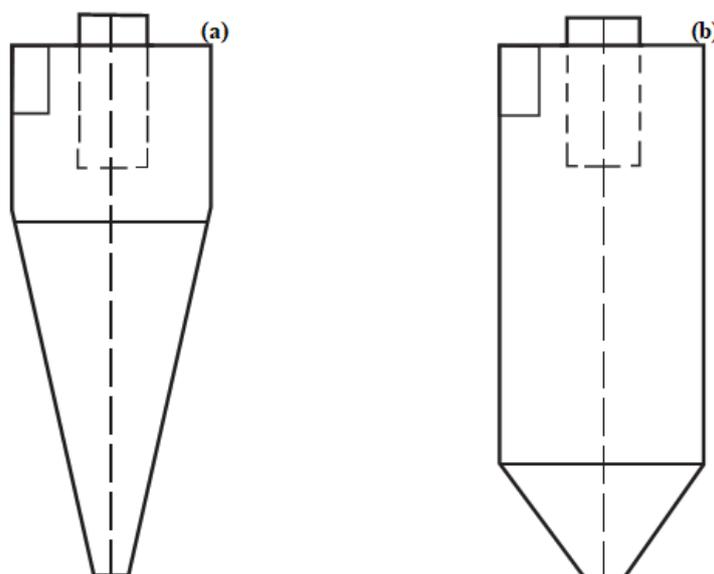
Além da classificação das famílias, pode-se classificar esses equipamentos em concentradores e clarificadores (SVAROVSKY, 2000). Hidrociclones concentradores são equipamentos desenvolvidos a fim de separar a maior quantidade de líquido da corrente concentrada (*underflow*), com isso, é um equipamento que apresenta eficiência de separação baixa, o que traz maior quantidade de sólidos na corrente clarificada (*overflow*). Já os hidrociclones clarificadores são feitos com o intuito de produzir correntes de *overflow* mais límpidas, ou seja, faz-se necessário redirecionar a maior parte do fluxo para o *underflow* (MOGNON, 2015).

Equipamentos que possuem a região cilíndrica relativamente grande, possuem maior capacidade de processamento, ou seja, hidrociclones concentradores são projetados para eliminar a maior quantidade de líquido no *underflow*. Já aqueles que possuem a parte cônica sendo a maior dimensão, são equipamentos que induzem uma maior eficiência de coleta, isto é, hidrociclones clarificadores, projetados para obter correntes mais límpidas no *overflow* (QUINTINO, 2019).

Os hidrociclones concentradores possuem grandes ângulos na parte cônica, o que propicia um rápido acúmulo de sólidos nas paredes e assim as partículas são direcionadas para cima, favorecendo a concentração de sólidos. Já os hidrociclones clarificadores, possuem pequenos ângulos na parte cônica, o que não gera uma zona de recirculação e assim diminui a quantidade de sólidos no *overflow* (GONÇALVES, 2016). A Figura 2.3 exemplifica estes dois tipos de equipamentos.

Os hidrociclones podem ser construídos de maneira modular, assim como feito por Mognon (2015), o que possibilita a variação de suas proporções, podendo alterar o *vortex finder*, a região cilíndrica, a região cônica e o *underflow*.

Figura 2.3 – Exemplo de hidrociclones clarificador (a) e concentrador (b).



Fonte: (SVAROVSKY, 2000).

2.1.2 – Utilização de hidrociclones na indústria do petróleo

Um fator que afeta consideravelmente as propriedades do fluido de perfuração é a quantidade de cascalho gerado pela perfuração do poço presente nele. Uma série de problemas que ocorrem durante a perfuração está relacionada com a incorporação deste cascalho ao fluido (PANISSET, 2014):

- Redução da taxa de penetração;
- Invasão do fluido de perfuração nos reservatórios;
- Redução da vida útil dos equipamentos;
- Redução da lubrificação da coluna e broca de perfuração, resultando em maior torque requerido.

O custo diário de uma sonda de perfuração marítima é superior a US\$ 1.000.000,00, por isso faz-se necessário uma retirada eficiente dos cascalhos presentes no fluido de perfuração antes que o mesmo seja reutilizado (PANISSET, 2014). O sistema responsável por esta retirada é denominado sistema de controle de sólidos, e é normalmente composto por operações unitárias como: tanques de decantação, peneiramento, centrifugação, centrifugação filtrante e hidrociclonagem.

Amaral (2008) avaliou experimentalmente um hidrociclone projetado para maximizar a eficiência de separação de partículas sólidas leves (PSL). Ao final dos experimentos, conclui-se que a eficiência de separação depende significativamente da

queda de pressão no hidrociclone, da concentração de PSL na alimentação e da celulose de carboximetil (CMC), além disso, concluiu-se que para altas concentrações de PSL ($C_v > 8\%$) é necessário o emprego de dois hidrociclones em série.

Alves (2019) estudou as variáveis geométricas de diâmetro de *underflow*, comprimento da região cilíndrica e ângulo da região cônica para selecionar a geometria de um mini-hidrociclone com região cilíndrica de 30mm de diâmetro e operando com fluido pseudoplástico. O mini-hidrociclone foi testado para recuperar esferas de vidro usadas para ajustar a pressão e peso de um fluido utilizado na perfuração em águas profundas. Após encontrar as dimensões ideais da geometria, esta apresentou alta eficiência de separação. No entanto, altas concentrações de areia na alimentação diminuíam a eficiência de separação da areia mantendo a eficiência de separação das esferas constante.

Para projetar o equipamento com as dimensões necessárias, deve-se então aplicar um equacionamento matemático para a classe desejada de hidrociclone e assim encontrar todos os parâmetros, para que se possa avançar para a fase de testes.

2.1.3 - Equacionamento matemático de hidrociclones

O modelo que melhor se adapta aos princípios teóricos da separação das partículas no interior de um hidrociclone, é a teoria do tempo de residência. O modelo de tempo de residência foi proposto inicialmente por Rietema (1961), que se baseia na hipótese de que uma partícula será coletada se o tempo de permanência da mesma no interior do hidrociclone for maior ou igual ao tempo necessário de deslocamento radial até a parede do equipamento.

Rietema (1961) também considerou as hipóteses:

- Distribuição homogênea das partículas na alimentação;
- Validade do regime de Stokes para a velocidade terminal;
- Negligência dos efeitos de concentração e turbulência durante o processo.

Dessa forma, Massarani (2001) partiu da proposta de outros pesquisadores que partiram de Rietema (1961) para o Modelo de Tempo de Residência e apresentou as mesmas variáveis para o processo de separação sólido-líquido, mas com uma organização distinta, que pode ser vista na Equação 2.1:

$$\frac{d_{50}}{D_c} = K \left(\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Onde d_{50} é o diâmetro de corte, K é um parâmetro que depende da configuração, Q é vazão de fluido na alimentação, μ é a viscosidade do fluido, ρ_s é a massa específica do sólido e ρ é a massa específica do fluido.

Através da Equação 2.1, foi possível estabelecer uma relação direta entre as características geométricas e operacionais dos hidrociclones com as propriedades físico-químicas do sistema (MASSARANI, 2001).

No entanto, a Equação 2.1 é válida somente para suspensões consideradas diluídas, onde desconsidera-se os efeitos da concentração de sólidos e a razão de líquido na predição do diâmetro de corte. Dessa maneira, Massarani (2001) incorporou funções de efeito da concentração de sólidos e da razão de líquido, obtidas em estudos experimentais, para a predição do diâmetro de corte reduzido (d'_{50}), resultando na Equação 2.2:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = K \left(\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + 1,73R_L} e^{(4,5C_v)} \quad (2.2)$$

Onde d'_{50} é o diâmetro de corte reduzido, R_L é a razão de líquido e C_v é a concentração de sólidos.

As equações apresentadas consideram a viscosidade dinâmica do fluido constante, porém fluidos não-newtonianos sofrem oscilações na viscosidade devido a tensão de cisalhamento sofrida. Dessa maneira, as equações acabam se tornando inválidas, pois seria necessário avaliar o diâmetro de corte a cada momento da simulação já que a viscosidade do fluido se alteraria a cada momento.

2.1.4 Grupos adimensionais em hidrociclones

A descrição matemática para a operação de hidrociclones é complexa. Uma forma de abordar esse fenômeno é utilizando equações empíricas ou semi-empíricas com auxílio de grupos adimensionais (ALMEIDA, 2008).

Pelo teorema π de Buckingham pode-se obter grupos adimensionais que, quando combinados, obtêm outros grupos adimensionais que são os mais importantes segundo SVAROVSKY (2000), sendo eles os números de Stokes (Stk_{50}), Euler (Eu) e Reynolds (Re), cujas expressões são mostradas nas Equações 2.3, 2.4 e 2.5.

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho)u_c(d'_{50})^2}{18\mu D_c} \quad (2.3)$$

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho u_c} \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{\rho D_c u_c}{\mu} = \frac{D_c u_c}{\nu} \quad (2.5)$$

Onde ΔP é a queda de pressão do hidrociclone e u_c é a velocidade da suspensão tendo como base a parte cilíndrica do hidrociclone e pode ser descrita pela Equação 2.6:

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (2.6)$$

Após utilizar e resolver todo o equacionamento matemático com os dados do fluido e do sólido, necessita-se avaliar se o equipamento construído com os parâmetros calculados é realmente eficiente para aquilo que foi proposto. Para isso existem equações que mostram o desempenho do equipamento.

2.1.5 Desempenho de hidrociclones

2.1.5.1 Eficiência total

A eficiência total (η) é definida como a razão entre a quantidade mássica de sólidos coletados no *underflow* e a quantidade mássica de sólidos alimentados (MASSARANI, 2001). Assim, a eficiência total é definida pela Equação 2.7:

$$\eta = \frac{cw_u W_u}{cw_a W_a} = \frac{W_{su}}{W_{sa}} \quad (2.7)$$

Onde cw_u e cw_a são as concentrações mássicas de sólidos no *underflow* e na alimentação, respectivamente, W_u e W_a são as vazões mássicas da mistura sólido-líquido no *underflow* e na alimentação, respectivamente, e W_{su} e W_{sa} são as taxas mássicas de sólido no *underflow* e na alimentação, respectivamente.

Normalmente a maximização da eficiência total é de grande interesse, no entanto, quando é necessária uma operação de concentração de sólidos, esse parâmetro se torna secundário, devido ao fato de que a maior quantidade de sólidos sairá na corrente clarificada (*overflow*), diminuindo assim a vazão mássica do *underflow*.

2.1.5.2 Razão de líquido

Razão de líquido (R_L) é a razão entre a quantidade de líquido no *underflow* e a quantidade total de líquido alimentado (MASSARANI, 2001). Dessa forma, a razão de líquido pode ser definida pela Equação 2.8:

$$R_L = \frac{W_u(1-cw_u)}{W_a(1-cw_a)} \quad (2.8)$$

Onde W_u e W_a são as vazões volumétricas da mistura no *underflow* e na alimentação, respectivamente, cw_u e cw_a são as concentrações mássicas de sólidos no *underflow* e na alimentação, respectivamente.

Uma baixa razão de líquido e uma alta eficiência total são desejáveis na maioria dos processos. No entanto, as operações de clarificação exigem baixas concentrações de sólidos no clarificado, efeito esse que dificilmente é atingido quando se opera com baixa razão de líquido (MOGNON, 2015).

2.1.6 Perfis de escoamento

2.1.6.1 Perfil de velocidade tangencial

A velocidade tangencial é relacionada com o campo centrífugo dentro do equipamento, pois é a responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento atuantes em hidrociclones (ALMEIDA, 2008). Além disso, esta velocidade separa a região interna e externa do escoamento de maneira abrupta (ARAÚJO, SCHEID, *et al.*, 2020).

2.1.6.2 Perfil de velocidade axial

A velocidade axial é responsável pela ascendência ou descendência das correntes de fluido. Os valores positivos indicam a ascendência das correntes e valores negativos indicam a descendência das correntes (ALMEIDA, 2008).

2.2 Fluidos não-newtonianos

O conhecimento da reologia de um fluido é essencial para as operações unitárias, visto que as mesmas geralmente envolvem o transporte de fluidos. O comportamento reológico, que influencia diretamente nas perdas causadas pelo atrito, definirá qual a potência e o tipo de bomba ou compressor requerido pelo sistema (GOTSCHLICH, 2011).

Fox (2014) define um fluido sendo uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento e que não pode sustentar uma tensão de cisalhamento quando em repouso.

Dessa forma, os fluidos são classificados com base na relação de tensão de cisalhamento e na taxa de cisalhamento ou de deformação gerada (LEAL, 2005). A Equação 2.9 apresenta a tensão de cisalhamento.

$$\tau_{yx} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} = \frac{dF_x}{dA_y} \quad (2.9)$$

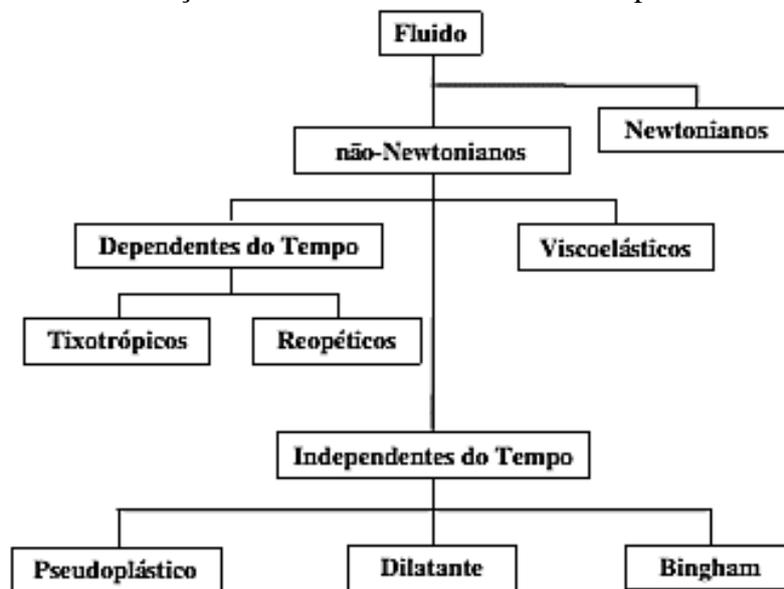
Onde δF_x é a força exercida pela placa sobre o elemento e δA_y é a área de contato do fluido com a placa. A Equação 2.10 apresenta a taxa de cisalhamento.

$$\omega \text{ (taxa de cisalhamento)} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (2.10)$$

Fluidos não-newtonianos são aqueles nos quais a curva de escoamento não segue uma tendência linear, ou seja, a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação é não linear (MOREIRA, 2014). Estes fluidos podem ser divididos em três grupos:

- Fluidos independentes do tempo ou puramente viscosos: fluidos que apresentam taxas de deformação dependendo apenas da tensão cisalhante instantânea, por exemplo, fluidos pseudoplásticos, dilatantes e de Bingham.
- Fluidos dependentes do tempo: fluidos que apresentam viscosidade aparente dependente do tempo de aplicação da taxa de cisalhamento, por exemplo, fluidos tixotrópicos e reopéticos.
- Fluidos viscoelásticos: fluidos que apresentam propriedades viscosas e elásticas ao mesmo tempo.

Figura 2.4 – Classificação dos fluidos de acordo com comportamento reológico.



Fonte: (LEAL, 2005).

Tendo o intuito de averiguar o que os fluidos não-newtonianos, como por exemplo o fluido de perfuração da indústria petrolífera, causam dentro do hidrociclone, necessita-se entender como estes fluidos se apresentam e se comportam. No caso em estudo, os fluidos de perfuração são fluidos considerados pseudoplásticos.

2.2.1 Fluido pseudoplástico

Os fluidos pseudoplásticos apresentam suas moléculas em estado desordenado e, quando as mesmas são submetidas a tensão de cisalhamento, tendem a se orientar na direção da força. Quanto maior for a força aplicada, maior será a orientação e menor será a sua viscosidade aparente.

Este tipo de fluido pode ser descrito por diversos modelos propostos na literatura, mas o modelo aplicado para realização deste trabalho será o de Herschel-Buckley, também conhecido como fluido de potência com limite de escoamento ou fluido de potência modificado, pois é o mais adequado para estudar os fluidos de perfuração (LEAL, 2005).

O modelo de Herschel-Bulkley é considerado o mais completo modelo reológico, é uma modificação do modelo de Ostwald Waale e sua equação engloba três parâmetros: k é o índice de consistência que indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento, n é o índice de comportamento e indica o afastamento do modelo do fluido newtoniano, τ_0 é o limite de escoamento real (MELO, 2008).

A tensão cisalhante deste modelo é representada pela Equação 2.11:

$$\tau = k\gamma^n + \tau_0 \quad (2.11)$$

Na qual τ é a tensão cisalhante aplicada, γ é a taxa de deformação, k é o índice de consistência do fluido e n é a inclinação da curva ($n < 1$).

Uma das formas de se entender melhor como esse tipo de fluido se comporta dentro de um hidrociclone e obter resultados confiáveis, é realizando experimentos práticos. No entanto, esses testes práticos geram grandes gastos para serem conduzidos, pois é necessário construir vários equipamentos com diferentes configurações e testá-los analisando qual seria o melhor. Para evitar esse tipo de gasto, pode-se utilizar a fluidodinâmica computacional (CFD), que também gera resultados confiáveis e diminui o custo de análise de viabilidade, pois os testes são feitos em computador e podem sofrer modificações ao longo da simulação.

2.3 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Fluidodinâmica computacional é o termo dado às técnicas matemáticas, computacionais e numéricas, que são usadas para obter e interpretar soluções computacionais de um escoamento. Dessa forma, pode-se concluir que fluidodinâmica

computacional é usada para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos, como difusão, convecção, turbulência, entre outros (BICALHO, 2011).

As técnicas de CFD são utilizadas para a solução de diversos problemas nas áreas de engenharia. Elas são utilizadas tanto para prever o comportamento do escoamento externo (aerodinâmica de naves e aviões), quanto interno (transferência de calor e massa e transporte de fluidos em tubulações) (VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

Os principais parâmetros de interesse obtidos por CFD são velocidade, pressão e temperatura. Além disso, o grande avanço na capacidade de processamento computacional está permitindo a predição de problemas complexos na área industrial e acadêmica. No entanto, vale ressaltar que as simulações ainda possuem limitações em algumas áreas, por isso, faz-se necessário comparar os resultados obtidos com a literatura, a fim de verificar os dados (BICALHO, 2015).

Algumas das vantagens de se utilizar a ferramenta de CFD são: eliminação dos riscos físicos em experimentos com condições de alto risco e redução dos custos dos experimentos práticos, visto que em alguns casos é necessário montar vários equipamentos com diferentes dimensões e condições operacionais (ALVES, 2012). Além do mais, esta ferramenta permite que se possa entender detalhes operacionais que não podem ser notados ao realizar os experimentos práticos.

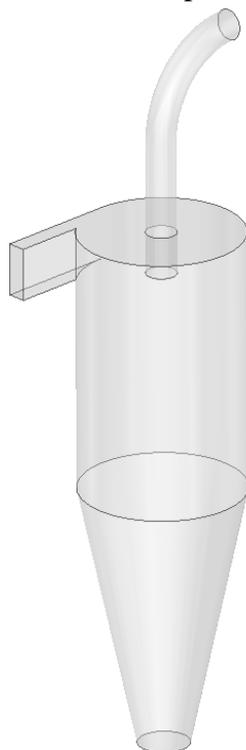
Para dar início a utilização da ferramenta de CFD, o primeiro passo é a montagem da geometria em 2D ou 3D, que deve ser uma representação fiel do equipamento real ou descrito na literatura, para que os resultados possam ser considerados fidedignos.

2.3.1 Geração da geometria

Com o auxílio do *software SpaceClaim*, que é uma ferramenta incluída no *software ANSYS*, é possível gerar geometrias CAD em 2D ou 3D de equipamentos da indústria em geral. A partir da geometria, pode-se delimitar quais serão as paredes, as entradas e saídas do equipamento e também definir as formas geométricas.

A Figura 2.5 demonstra um exemplo de geometria criada pelo *SpaceClaim*.

Figura 2.5 – Geometria criada pelo *software SpaceClaim*.



Fonte: Do Autor.

Após gerar a geometria, faz-se necessário gerar uma malha que divide a geometria em diversas partições, o que possibilita trabalhar com o equacionamento em cada um desses pedaços, melhorando assim a precisão dos resultados.

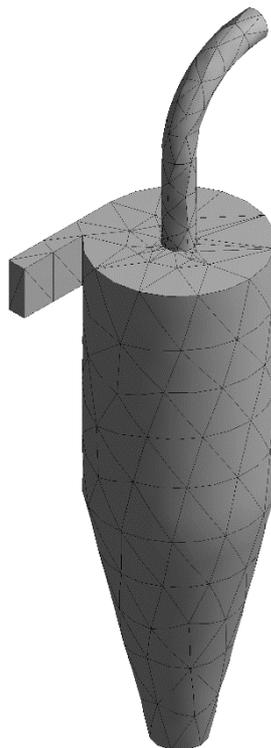
2.3.2 Geração da malha

Após a geração das geometrias 2D ou 3D, passa-se para a geração da malha, realizada por um *software* de discretização da geometria por volumes de controle, como exemplo o *Meshing*, que também está incluso no *software* ANSYS. A malha consiste na divisão da geometria em pequenos volumes de controle, onde em cada um, serão resolvidas todas as equações do problema em estudo.

Isso significa que quanto maior for a divisão dessa geometria, mais precisa será a solução do problema, em contrapartida, mais será exigido do computador, fazendo com que a solução demore mais para convergir. Assim, faz-se necessário encontrar um ponto limite entre a quantidade de volumes e a qualidade dos mesmos, para que não haja interferência na qualidade dos resultados. Para isso, deve-se fazer o teste de independência de malha, que mostra qual o número mínimo de elementos para que os resultados não sofram interferência.

A Figura 2.6 exemplifica uma malha aplicada a geometria da Figura 2.5.

Figura 2.6 – Malha gerada pelo *software Meshing*.



Fonte: Do Autor

Após aplicar a malha e avaliar a qualidade da mesma, salva-se um arquivo do tipo .msh, para que possa ser carregado no *software* que irá realizar a simulação.

2.3.3 Simulação

Após gerar a malha, exporta-se o arquivo para o *software Fluent*, onde é possível definir os parâmetros para a simulação, tais como: modelagem do problema, condições de contorno e propriedades do fluido envolvido. Também pode-se definir as características do escoamento, quantas iterações, qual o resíduo permitido e qual o módulo de turbulência (BICALHO, 2011).

O *software Fluent* realiza a simulação utilizando a modelagem matemática com base nas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, tendo como base fluido não-newtoniano. Ao decorrer da simulação ocorre a resolução dessas equações e, ao final do processamento, pode-se visualizar os resultados, obtendo os valores de grandezas físicas dentro da região do volume de controle, tais como perfil de velocidade, perfil de pressão e perfil de concentração. As equações de conservação estão descritas nas Equações 2.12, 2.13, 2.14 e 2.15.

Equação da Continuidade (Conservação da massa):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(v_y)}{\partial y} = 0 \quad (2.12)$$

Equação do movimento (Conservação da quantidade de movimento):

Direção radial:

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_r \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{\theta r})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\tau_{yr})}{\partial y} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right) + \rho g_r \quad (2.13)$$

Direção tangencial:

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial y} + \frac{v_\theta v_r}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{\theta\theta})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\tau_{y\theta})}{\partial y} + \frac{\tau_{\theta r} - \tau_{r\theta}}{r} \right) + \rho g_\theta \quad (2.14)$$

Direção axial:

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_y}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_y}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_r}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{ry})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{\theta y})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \rho g_y \quad (2.15)$$

Como as equações apresentadas não possuem solução analítica para casos em 3D, é necessário aplicar métodos numéricos para que se possa resolvê-las. Assim, a metodologia de volumes finitos é aplicada para obtenção da solução numérica.

No modelo de volumes finitos, primeiro ocorre a discretização no espaço físico, por isso é necessário a geração da malha, depois ocorre a discretização no espaço temporal, onde o espaço é subdividido de forma finita e com auxílio de passos de tempo. Dessa maneira, pode-se gerar um sistema de equações algébricas para resolução a partir das equações diferenciais (ANJOS, 2016).

Uma observação necessária é a questão do acoplamento pressão-velocidade, pois é fruto dos problemas de CFD que tratam de escoamento incompressível. Nele, a velocidade e pressão não são dependentes. Como trata-se de um problema iterativo, a equação da continuidade é utilizada como restrição para o campo de velocidade obtido a partir do valor de pressão fornecido pelo algoritmo do acoplamento (VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

Outro parâmetro bastante importante para a simulação é a turbulência, que é caracterizada por flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outros escalares. Conseqüentemente, este estado de turbulência contribui para mudanças no transporte de movimento, calor e massa, o que influencia nas distribuições destas propriedades no campo (SOUZA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Existem três classes de modelos de turbulência: DNS (*Direct Numeric Simulation*), LES (*Large-eddy Simulation*) e RANS (*Reynolds Avarage Numeric Simulation*). Neste trabalho será utilizado o modelo LES que é intermediário entre os modelos DNS e o RANS. Esta metodologia trabalha dividindo o fenômeno de turbulência em grandes e pequenas estruturas.

2.3.4 Modelo de turbulência

Durante escoamentos turbulentos, gera-se instabilidade, o que acaba produzindo vórtices turbulentos. Esses vórtices vão se desfazendo em estruturas cada vez menores até que sejam dissipados pelas forças viscosas do fluido (FREITAS, 2009).

A escolha de qual modelo de turbulência será usado, irá depender de algumas considerações (BICALHO, 2011):

- Física em torno do fluxo;
- Prática estabelecida para uma classe específica de problema;
- Nível de precisão;
- Recursos computacionais disponíveis;
- Tempo para simulação.

2.3.4.1 Modelo LES Smagorinsky

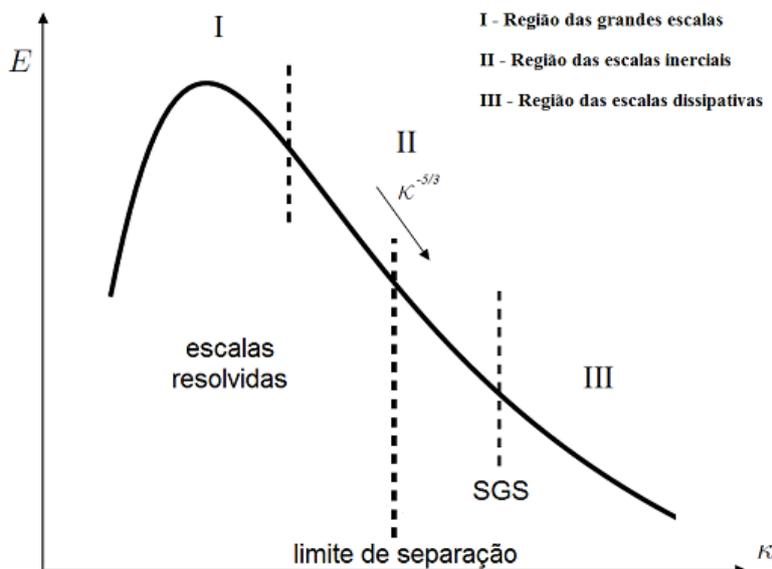
A ideia básica da modelagem LES é resolver diretamente as grandes escalas de turbulência (filtradas) que transportam energia e quantidade de movimento por meio de um método numérico com discretização espacial e temporal, e modelar as menores escalas de turbulência (residuais) por meio dos modelos de sub malha ou SGS (*sub-grid scale*), no entanto, estas são pobremente resolvidas (COSTA, 2018).

Como este modelo realiza a separação das escalas de turbulência, utiliza a energia das grandes escalas e forma uma cascata de energia para a resolução das mesmas, ele exige recursos computacionais mais singelos que o modelo DNS, o que traz resultados mais tratados. Além do mais, as menores escalas tendem a ser mais homogêneas, o que

as deixa menos suscetíveis às condições de contorno, o que faz com que o modelos LES seja mais independente dos tipos de escoamento (FERREIRA, 2006).

O limite de separação entre as escalas filtradas e as residuais está posicionado na região das escalas inerciais. Essa separação de escalas é feita por uma operação de filtragem espacial das equações de Navier-Stokes (DAVIDSON, 2019). A Figura 2.7 ilustra a divisão das escalas anteriormente citadas.

Figura 2.7 – Divisão das escalas proposta pelo modelo LES.



Fonte: (DAVIDSON, 2019).

O modelo LES apresenta algumas etapas para o desenvolvimento da metodologia e aplicação nos métodos numéricos empregados. A primeira etapa é a filtragem espacial, onde o campo de velocidade é decomposto na componente filtrada $\bar{u}(x, t)$ e na componente residual $u'(x, t)$, expressas pela Equação 2.16:

$$u(x, t) = \bar{u}(x, t) + u'(x, t) \quad (2.16)$$

Essa operação de filtragem estabelece o limite de separação entre a região filtrada e residual, expressa pela Equação 2.17 (CORRÊA, 2016):

$$\bar{u}(x, t) = \int_V u(x', t) G(x, x') dx' \quad (2.17)$$

Onde $u(x', t)$ é o campo filtrado, V é o volume de controle do elemento na malha, $G(x, x')$ é a função filtro e x' é a posição do elemento de volume dx' .

A segunda etapa apresenta a equação da continuidade e a equação de Navier-Stokes após a operação de filtragem e introduz o tensor de tensão residual τ_{ij} , expressas pelas Equações 2.18 e 2.19:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \left(v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \tau_{ij} \right)}{\partial x_j} \quad (2.19)$$

A terceira etapa considera a solução do fechamento da turbulência, onde o tensor residual τ_{ij} é modelado em função da viscosidade turbulenta e definido pela Equação 2.20:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (2.20)$$

Onde ν_t é a viscosidade turbulenta, \bar{S}_{ij} é o tensor das taxas de deformação no campo filtrado e δ_{ij} é o delta de Kronecker. \bar{S}_{ij} e δ_{ij} são expressos nas Equações 2.21 e 2.22, respectivamente:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.21)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (2.22)$$

O modelo de Smagorinsky, baseia-se na noção do comprimento de mistura, onde a viscosidade turbulenta é proporcional a um comprimento característico da escala residual l_s e ao módulo do tensor das taxas de deformação nas grandes escalas $|\bar{S}|$, que é determinado pela Equação 2.23 (COSTA, 2018):

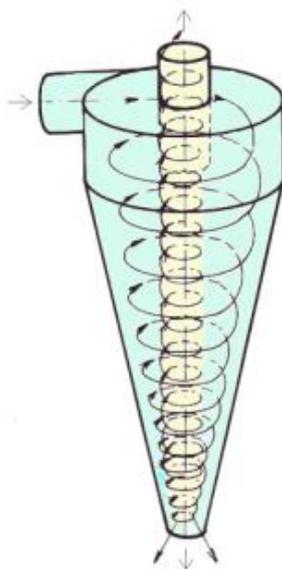
$$\nu_t = (C_s \cdot \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (2.23)$$

Onde C_s é a constante de Smagorinsky, Δ é a largura do filtro e o termo $|\bar{S}|$ pode ser expresso pela Equação 2.24:

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (2.24)$$

Para este trabalho, além de modelar a turbulência foi preciso estudar a interface do ar atmosférico nas saídas do hidrociclone, dado que este evento causa a formação de um *air-core*, que está representado pela Figura 2.8.

Figura 2.8 – *Air-core* formado dentro de um hidrociclone



Fonte: (BRAVIM, PEREIRA, 2007).

2.3.5 Modelo de Volume de Fluido

O modelo de *Volume of Fluid* (VOF) pode ser aplicado a problemas com fluidos de diferentes densidades, por isso pode ser considerado adequado para prever o movimento da superfície livre. Conforme o hidrociclone é operado, o movimento do fluido em seu interior forma o *air-core* e, para que a simulação consiga reproduzir este acontecimento, utiliza-se o modelo VOF (MOGNON, 2015).

Este modelo é utilizado para escoamentos nos quais existe uma interface bem definida entre 2 ou mais fluidos imiscíveis (BICALHO, 2011). O movimento de todas as fases é modelado a partir das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, a fração volumétrica de cada fase é calculada em cada uma das células computacionais da malha (MORA, 2018).

Mora (2018) propôs o estudo numérico da dinâmica de uma bolha de gás ascendendo em um fluido estacionário e de uma gota escoando em um microcanal por meio das metodologias VOF. As simulações CFD foram realizadas pelo *software OpenFOAM* e os resultados obtidos permitiram comparar as vantagens e desvantagens das duas metodologias. Tanto as simulações de bolhas ascendentes em meios líquidos quanto as de gotas em microcanais tiveram boa concordância com a literatura.

Como este trabalho utilizará fluido não-newtoniano no qual a viscosidade não é bem definida, além de habilitar o modelo VOF, precisa-se entrar com uma função definida

pelo próprio usuário para calcular a viscosidade a cada momento, visto que o *software* não tem uma função própria para tal necessidade.

2.3.6 Função Definida pelo Usuário (*User Defined-Function*)

A *User Defined-Function* (UDF) é uma função programada pelo próprio usuário e que pode ser carregada dinamicamente para o *software Fluent* para aprimorar os recursos de solução do problema em questão. Esta função é escrita em linguagem de programação C e utiliza as bibliotecas disponíveis no próprio *software*.

Para simular um hidrociclone que é alimentado por um fluido não-newtoniano a uma lenta vazão, é necessário definir uma função para o cálculo da viscosidade, visto que esta variável não é constante e pode chegar a zero quando o fluido se encontra em contato com a parede do equipamento.

2.3.7 Injeção de partículas

Para simular a fase discreta juntamente com a fase fluida, é necessário uma alta potência computacional, para facilitar esta parte da simulação, pode-se utilizar a injeção de partículas pelo método multifásico Euler-Lagrange (PETRI, VIEIRA, 2012a). Neste método é possível injetar partículas seguindo a granulometria do material desejado, dessa maneira, é possível analisar o comportamento que a partícula terá dentro do equipamento, assim como o comportamento da partícula no fluido.

2.4 Trabalhos de simulação em hidrociclones

Freitas (2009) avaliou a separação óleo-água por meio da simulação fluidodinâmica computacional do hidrociclone, levando em consideração a influência da geometria na eficiência de separação. O trabalho teve o objetivo de calcular a razão de líquido e a eficiência granulométrica reduzida para cada geometria, foram realizados no total 19 experimentos computacionais utilizando o modelo de turbulência k- ϵ e depois o modelo de turbulência SSG, pois este último é o que melhor representa o escoamento de hidrociclones. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios para a autora, devido ao fato de que os resultados foram bastante condizentes com o que é encontrado na literatura.

Alves (2012) estudou, com o auxílio de CFD, a otimização das proporções geométricas de um hidrociclone para minimizar a fração volumétrica de óleo, presente em águas oleosas oriundas de refinarias, na corrente diluída, com altos valores de

eficiência de separação água/óleo. O sistema de estudo foi multifásico, composto por pequenas gotas de óleo residual oriundas dos processos de separação. Três distribuições de tamanhos de gotas de óleo foram utilizadas e os resultados obtidos mostraram que o maior tamanho de gota foi o que apresentou a maior eficiência total de separação, mostrando que o hidrociclone possui bom potencial para separação de dispersões óleo/água.

Anjos (2016) propôs a avaliação de diversos modelos de turbulência em simulações CFD em hidrociclones a fim de verificar se algum modelo diferente do de seis equações é capaz de representar a física do equipamento de forma adequada. Esta avaliação foi feita comparando dados experimentais de velocidade tangencial, que é o componente do vetor velocidade, associado ao campo centrífugo, que é o principal responsável pela separação em hidrociclones. Ao final, cada modelo apresentou uma conclusão diferente, mas foi possível perceber que a modelagem na região próxima à parede é importante para a caracterização da velocidade tangencial dentro do hidrociclone. O mesmo vale para a modelagem na região próxima ao centro do equipamento, onde é formado o *air-core*, porém, os modelos de turbulência não foram eficazes na predição da velocidade tangencial dessas áreas.

Araújo (2015) propôs medir os perfis de velocidade de um hidrociclone para separação de dispersões óleo-água a partir da fluidodinâmica computacional (CFD) e por velocimetria por imagens de partículas (PIV). Durante o estudo, obteve-se a geometria ótima do hidrociclone e foram medidos os perfis de velocidade tangencial e axial da água utilizando o PIV e comparou-se os resultados com simulações CFD. Ao final dos experimentos, concluiu-se que, para misturas 40% óleo e 60% água, foi obtida eficiência superior a 93% e, além disso, os experimentos mostraram uma relação linear entre a eficiência total e a razão de fluido total.

Visto que muitos trabalhos simulam hidrociclones, tem-se conhecimento de como é a funcionalidade deste equipamento, no entanto, poucos trabalhos simulam escoamento turbulento utilizando fluido não-newtoniano para separação de sólidos, o que faz com que ainda haja algumas dúvidas sobre a ação deste tipo de fluido no equipamento.

3 METODOLOGIA NUMÉRICA

3.1 Geometria e malha computacional

Para construir as geometrias deste trabalho, utilizou-se como base o trabalho de Mognon (2015), no qual foi feito um estudo a fim de encontrar os parâmetros geométricos com melhor desempenho. Os parâmetros ótimos selecionados foram l , L_l e θ , e os parâmetros de D_u e H foram alterados a fim de determinar qual seria a geometria com os melhores resultados. Dessa maneira, construiu-se as 5 geometrias que se diferenciam apenas na altura da parte cônica e no diâmetro do *underflow*. A Tabela 3.1 apresenta as dimensões em comum das 5 geometrias e a Tabela 3.2 apresenta as dimensões específicas de cada uma das 5 geometrias construídas.

Tabela 3.1 – Dimensões em comum das 5 geometrias simuladas.

Di (mm)	Do (mm)	Dc (mm)	l (mm)	L_l (mm)	Θ (°)
9,1	10,5	30	20,85	32,1	6

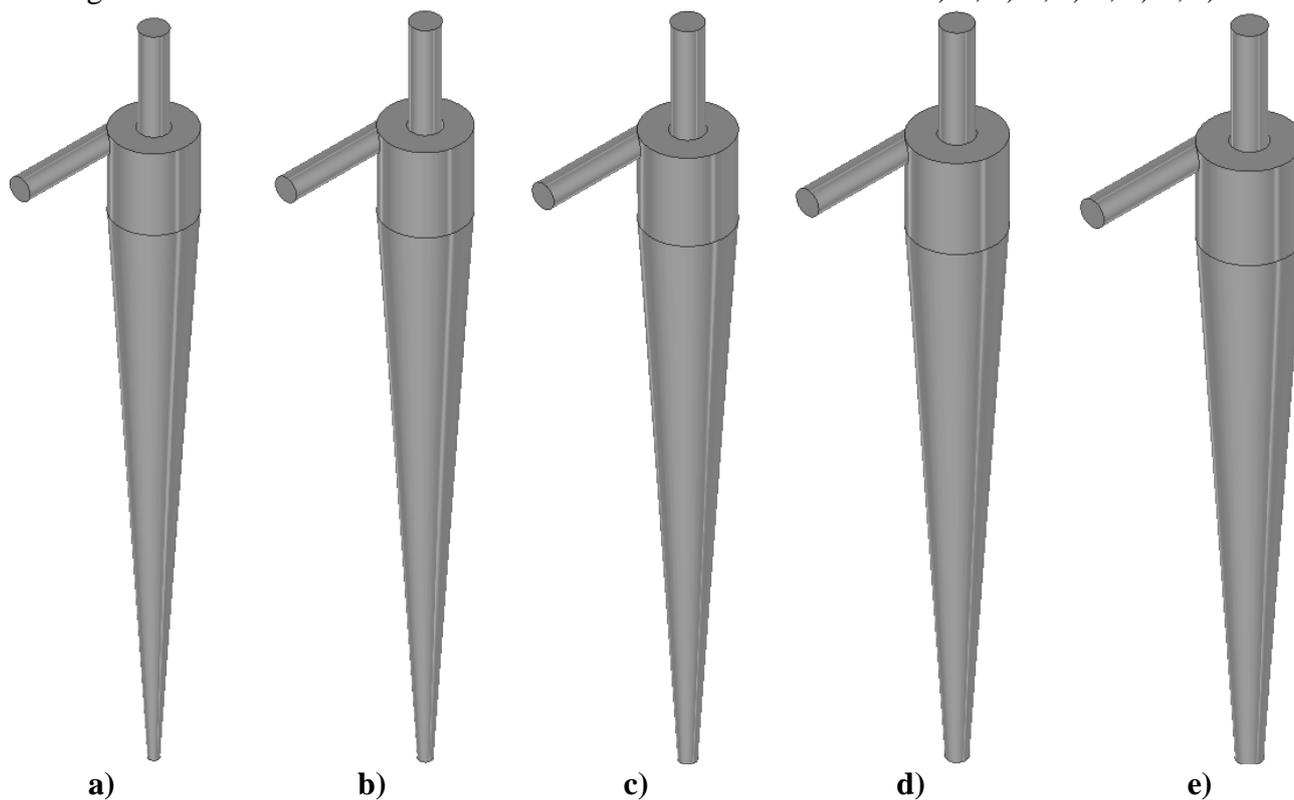
Tabela 3.2 – Dimensões específicas de cada uma das 5 geometrias.

Geometrias	D_u (mm)	H (mm)
1	4	248,05
2	5	238,5
3	6	229
4	7	219,4
5	8	210

Após montar as geometrias em 3D no *software SpaceClaim 19.2*, pôde-se gerar as malhas pelo *software Meshing 19.2*, preocupando-se com o número de células e a qualidade da malha, pois estas são medidas essenciais para um bom resultado da simulação. As malhas foram geradas mantendo-se um número de células alto o suficiente para um bom resultado, mas com ressalva, pois a potência computacional disponível para a simulação não era muito elevada.

A Figura 3.1 mostra todas as geometrias testadas nesse trabalho e que foram construídas por meio do *software SpaceClaim 19.2*.

Figura 3.1 – Geometrias em 3 dimensões utilizadas neste trabalho: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5.



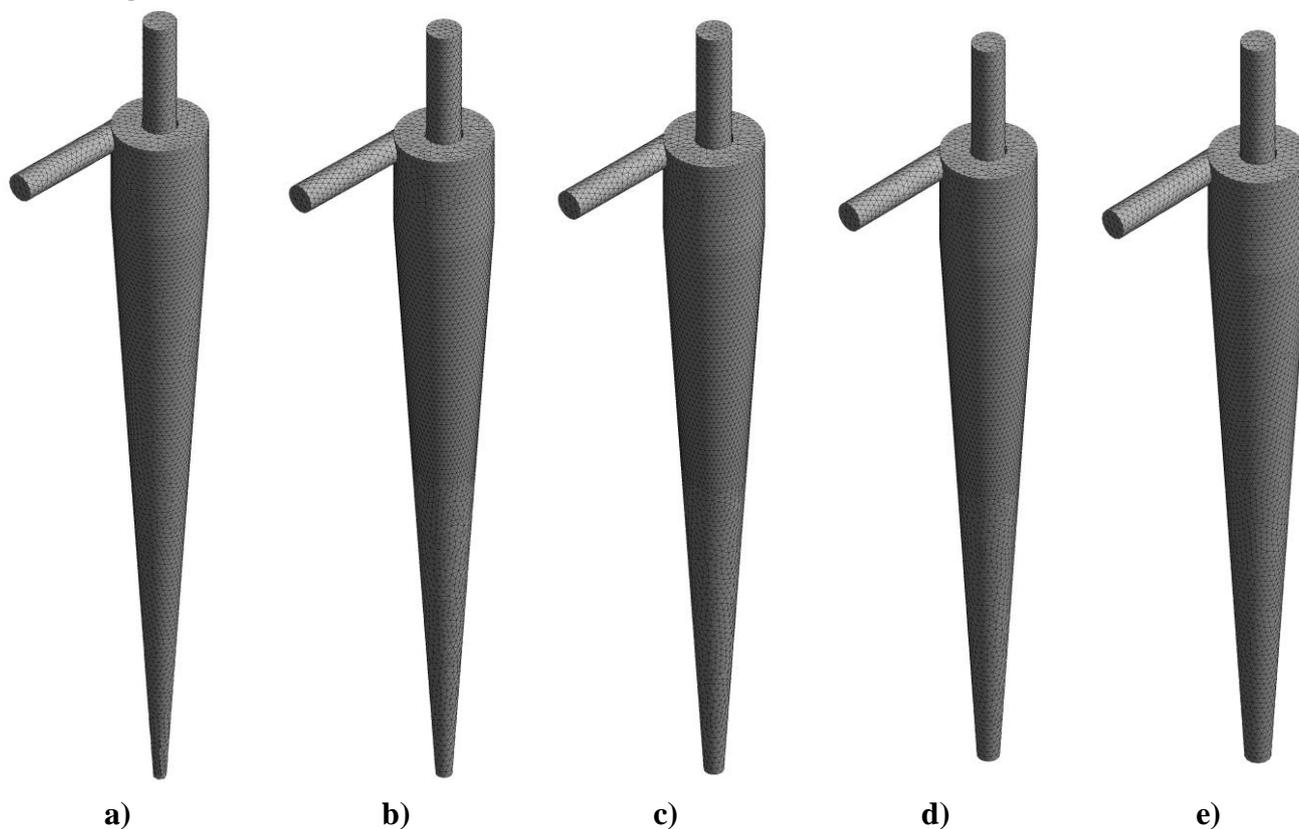
Após a montagem das malhas, não foi feito o teste de independência de malha, o que pode ter ocasionado erros nos resultados. No entanto, o número de células das malhas foi baseado em Cavalcante *et al.* (2019), onde foram realizadas três simulações com o número de células semelhante a deste trabalho. A Tabela 3.3 mostra os números de células totais de cada geometria construída.

Tabela 3.3 - Número de células em cada amostra simulada.

Geometrias	Nº de Células
1	638.274
2	655.472
3	677.280
4	651.429
5	648.921

A Figura 3.2 mostra todas as malhas testadas nesse trabalho e que foram geradas pelo *software Meshing 19.2*.

Figura 3.2 – Malha em 3 dimensões utilizadas neste trabalho: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5.



Para avaliar a qualidade das malhas, analisou-se os parâmetros de *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Jacobian*. O *Aspect Ratio* é a razão entre a maior e a menor aresta do elemento e idealmente, o valor da razão deve ser 1 para garantir melhores resultados. Já o *Skewness* representa o desvio entre o vetor que conecta o centro dos volumes vizinhos e o vetor normal à face, assim, afeta diretamente a acurácia da aproximação numérica dos fluxos. Altos valores de *Skewness* podem degradar a solução, por isso, quanto mais próximos de 0 melhor. O *Jacobian* indica a proporção entre o formato real e o formato ideal do elemento. Quanto mais próximo de 1, mais o elemento se aproxima do elemento ideal.

Os gráficos desses parâmetros estão presentes no Apêndice A: o resultado de *Aspect Ratio* para cada uma das geometrias é apresentado na Figura A.1, a Figura A.2 apresenta os gráficos de *Skewness* e a Figura A.3 apresenta os gráficos de *Jacobian*.

A Tabela 3.4 apresenta um resumo dos valores médio, mínimo e máximo de *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Jacobian* das 5 geometrias, obtidos a partir do *software Meshing*.

Tabela 3.4 – Valores médio, mínimo e máximo de *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Jacobian* para cada uma das geometrias.

Teste de qualidade	Geometrias	Média	Mínimo	Máximo
<i>Aspect Ratio</i>	1	1,90	1,83	14,80
	2	1,91	1,75	12,00
	3	1,80	1,75	9,00
	4	1,92	1,75	10,50
	5	1,87	1,75	9,00
<i>Skewness</i>	1	0,20	0,052	0,80
	2	0,22	0,050	0,90
	3	0,22	0,050	0,90
	4	0,21	0,050	0,95
	5	0,20	0,053	0,89
<i>Jacobian</i>	1	1,00	1,00	1,00
	2	1,00	1,00	1,00
	3	1,08	1,08	2,30
	4	1,16	1,16	3,80
	5	1,06	1,06	2,20

Os valores de *Aspect Ratio* apresentados foram maiores do que 1, contudo, os valores médios apresentaram uma proximidade com o ideal, mostrando que as malhas geradas apresentam qualidade aceitável para simulação. Os valores de *Skewness* apresentados foram maiores do que o ideal que é 0, contudo, os valores médios apresentaram uma proximidade, o que mostra que as malhas geradas não irão degradar a solução numérica. Os valores de *Jacobian* apresentados foram iguais ou pouco maiores que 1 e os valores médios apresentaram uma proximidade com o ideal, mostrando que as malhas geradas em formato tetraédrico possuem alta proximidade com o formato do elemento real.

3.2 Modelos e condições de contorno

Feita a montagem das malhas, as mesmas foram carregadas no *software Fluent 19.2* para simulação, no *software* foi aplicada a gravidade no eixo axial com valor igual a $9,81\text{m/s}^2$ e a referência de pressão atmosférica na saída do *overflow* igual a 101.325 Pa . Além disso, para simulação, foram usados os seguintes métodos de solução, tendo como base o trabalho de Petri e Vieira (2012b):

- Acoplamento Pressão-Velocidade: SIMPLE
- Discretização Espacial:
 - Gradiente: Least Squares Cell Based;
 - Pressão: PRESTO!;
 - Momento: Bounded Central Differencing;
 - Fração Volumétrica: *Compressive*.
- Formulação transitória: *Second Order Implicit*.

Feitas estas configurações, declarou-se a função que calcularia a viscosidade do fluido não-newtoniano, devido ao fato de que para qualquer modelo de turbulência, o *software* não apresentava a função desejada. Para isso, utilizou-se uma UDF, presente no Apêndice B, que foi adicionada ao *software* contendo os valores dos parâmetros do modelo obtidos no trabalho de Mognon (2015), sendo eles: $K = 1,16943$, $n = 0,50638$ e $\tau_0 = 4,1000$.

Para a simulação, o tempo total real foi ajustado para 3 segundos e, para isso, utilizou-se um passo de tempo de 1×10^{-6} , um número total de passo de tempo igual a 3×10^6 e o máximo de iterações por passo de tempo igual a 2000.

Em seguida, selecionou-se o modelo de turbulência LES com os parâmetros *default* do *software*. Também foi utilizado o Modelo VOF, que foi habilitado após 2 segundos de simulação, ou seja, ficou habilitado durante 1 segundo de simulação, para que pudesse representar a formação do *air-core* formado pela entrada de ar no *overflow* e *underflow*. O modelo LES foi utilizado seguindo como referência o trabalho de Anjos (2016), enquanto o modelo de VOF foi utilizado seguindo como referência o trabalho de Petri e Vieira (2012b).

Antes de iniciar a simulação, definiu-se o modo de inicialização híbrida e os parâmetros de relaxação como:

- *Pressure* = 0,3;
- *Density* = 1;
- *Body Forces* = 1;
- *Momentum* = 0,1 (depois de 2 segundos de simulação, este fator foi alterado para 0,05),
- *Volume Fraction* = 0,5.

A alteração do *momentum* foi feita pois a simulação estava muito lenta e o *software* não estava conseguindo encontrar o valor de continuidade, devido ao fato de que o fluido poderia estar muito viscoso em determinados locais. O risco de alterar este valor é a possibilidade de geração de valores inconsistentes.

Outros parâmetros importantes foram os de alimentação e operação do equipamento, que foram os mesmos para as 5 geometrias e foram seguidos com base no trabalho de Petri e Vieira (2012b). São eles:

- Pressão de entrada: $1,03322745 \frac{Kgf}{cm^2}$.
- Densidade do fluido: $998,2 \frac{Kg}{m^3}$.

Pensando no poder de processamento disponível, considerou-se que a simulação seria com suspensão diluída, devido ao fato de que quando o *software* simula 2 fases, a simulação se torna muito pesada. Dessa forma, para analisar a eficiência total, que é calculada a partir da taxa mássica de sólidos na alimentação e no *underflow*, se faz necessário a injeção de partículas, que neste trabalho foi representada pelo modelo RRB com base na granulometria do trabalho de Mognon (2015). Os dados de diâmetro médio estão apresentados no Apêndice C e o modelo RRB ajustado é mostrado na Equação 3.1.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{28,47}\right)^{1,0206}} \quad (3.1)$$

Outros parâmetros importantes para injeção de partícula são:

- Vazão mássica $\left(\frac{g}{min}\right)$: 60;
- Menor diâmetro (μm): 0,262;
- Maior diâmetro (μm): 262;
- Número de diâmetros: 39.

Estes parâmetros são implementados no modelo de injeção de partículas a fim de se aproximar da granulometria de rochas usadas no trabalho de Mognon (2015).

Para a realização deste trabalho, foram usados 3 computadores diferentes, sendo dois deles computadores do laboratório de modelagem da Universidade Federal de Lavras e o terceiro um *notebook* próprio. As configurações de cada computador e quais geometrias simularam são:

- Computador 1 (Geometrias 1, 2 e 3): Tipo *desktop* com processador Intel® Core™ i5 7500, memória RAM de 16 Gb e placa gráfica Intel® HD Graphics 630.
- Computador 2 (Geometria 4): Tipo *desktop* com processador Intel® Core™ i7 7700, memória RAM de 16 Gb e placa gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1050ti.
- Computador 3 (Geometria 5): Tipo *notebook* com processador Intel® Core™ i7 3630QM, memória RAM de 8 Gb, placa gráfica NVIDIA GEFORCE GT 360M.

Levando em consideração as configurações de cada máquina usada, tem-se o tempo gasto para simulação:

Tabela 3.5 – Tempo gasto em simulação.

Geometrias	Tempo (aproximadamente)
1	23 dias
2	23 dias
3	25 dias
4	20 dias
5	4 meses

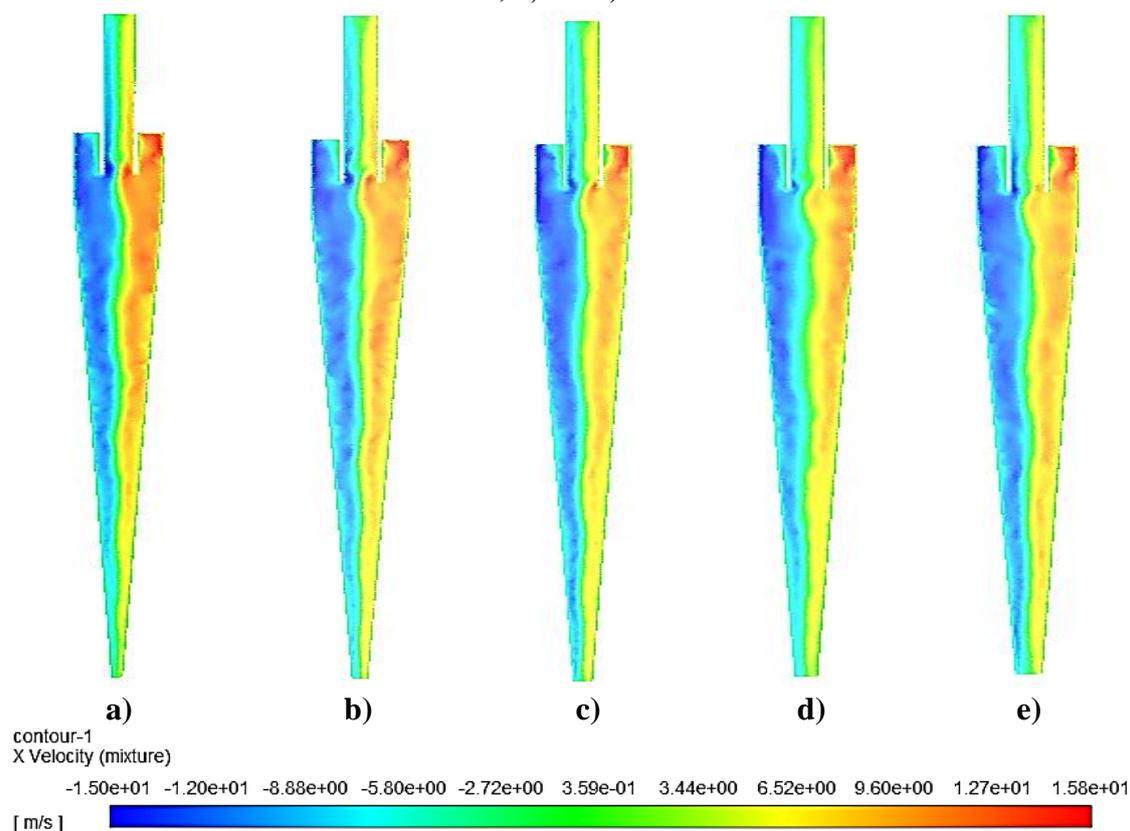
Durante as simulações houve algumas quedas de energia, por isso o tempo de simulação é aproximado. No caso da geometria 5, o tempo de simulação é justificado pelo fato de ter sido utilizado um notebook próprio, com memória RAM com metade da capacidade dos outros dois computadores e no qual eram realizadas outras atividades concomitantemente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Perfis de velocidade

Sabe-se que a velocidade tangencial é essencial pois determina de forma direta a força do campo centrífugo, responsável pela separação das partículas sólidas. A Figura 4.1 mostra os perfis e valores de velocidade tangencial obtidas pelas simulações.

Figura 4.1 –Perfil de velocidade tangencial do fluido para as geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.



A Figura 4.1 mostra que, considerando-se o módulo das velocidades, tem-se os maiores valores nas regiões das paredes, enquanto na região de fronteira, centro do equipamento, tem-se o menor valor. O valor positivo e negativo indicam a orientação da velocidade.

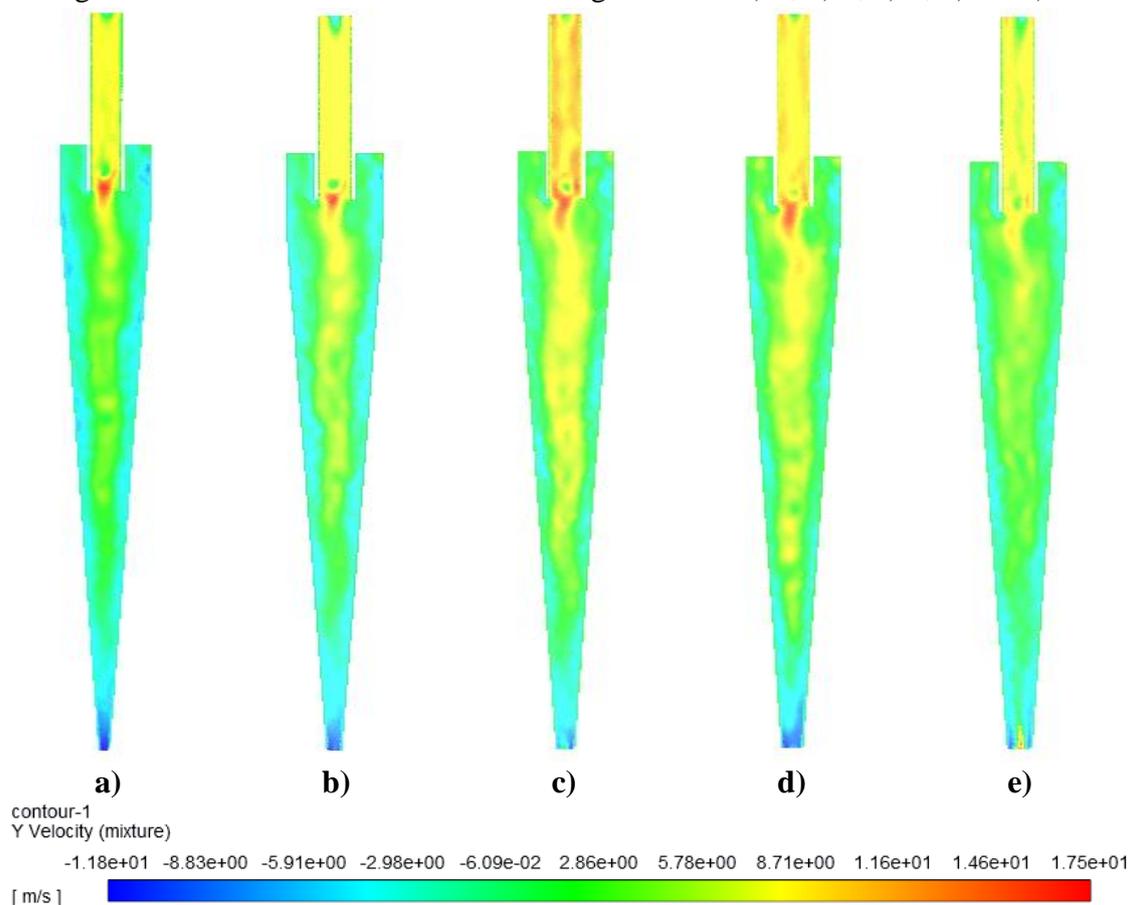
Este perfil é um importante indicativo de que houve a formação dos *vortex* primário e secundário, parâmetro este que é responsável pela formação do campo centrífugo.

Além disso, pode-se observar que todas as geometrias apresentaram o mesmo perfil de velocidade tangencial, o que revela que a alteração do parâmetro Du não modificou

este perfil de velocidade e que não houve grandes diferenças na formação do campo centrífugo.

Outro perfil a ser analisado é o de velocidade axial, com o qual é possível verificar a ascendência e descendência do fluido. A Figura 4.2 mostra o perfil de velocidade axial para cada uma das geometrias.

Figura 4.2 –Perfil de velocidade axial das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.



Os resultados da Figura 4.2 apresentaram valores negativos de velocidade axial perto das paredes, o que mostra a descendência das correntes do fluido. Com a diminuição do raio houve o aumento da velocidade, o que confirma a ascendência das correntes, mostrando que houve a formação do *vortex* secundário, responsável pela ascensão das partículas para o *overflow*. A Figura 4.2c, que apresenta um valor intermediário de diâmetro de *underflow*, foi a simulação que apresentou a maior velocidade no centro do equipamento, mostrando que houve uma maior ascendência de fluido nesta geometria.

A Figura 4.3 apresenta o perfil de viscosidade molecular para cada uma das geometrias simuladas. A Tabela 4.1 mostra os valores médios de viscosidade e desvio padrão de cada geometria simulada.

Figura 4.3 –Perfil de viscosidade das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.

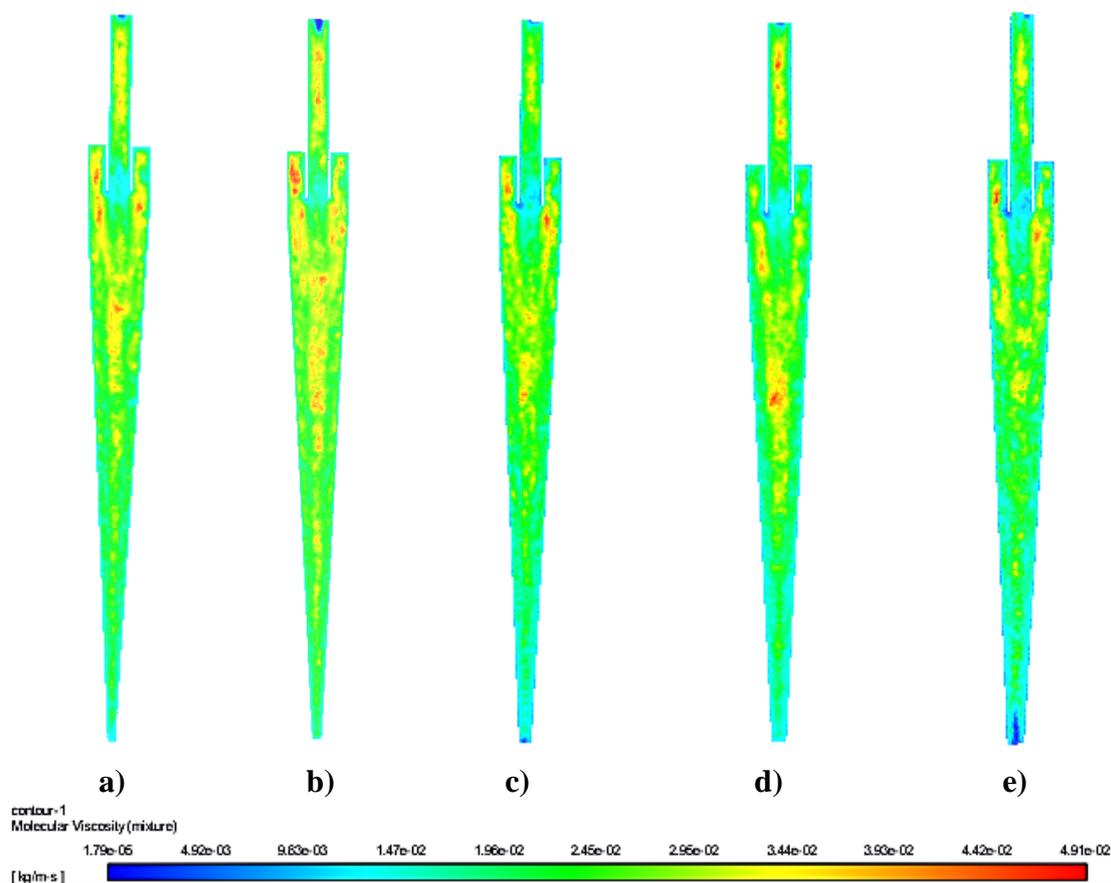


Tabela 4.1 – Valores médios de viscosidade para cada geometria.

Geometrias	Viscosidade média $\left(\frac{Kg}{m.s}\right)$	Desvio Padrão
1	0,02655	0,01408
2	0,02644	0,01441
3	0,02613	0,01401
4	0,02746	0,01474
5	0,02608	0,01312

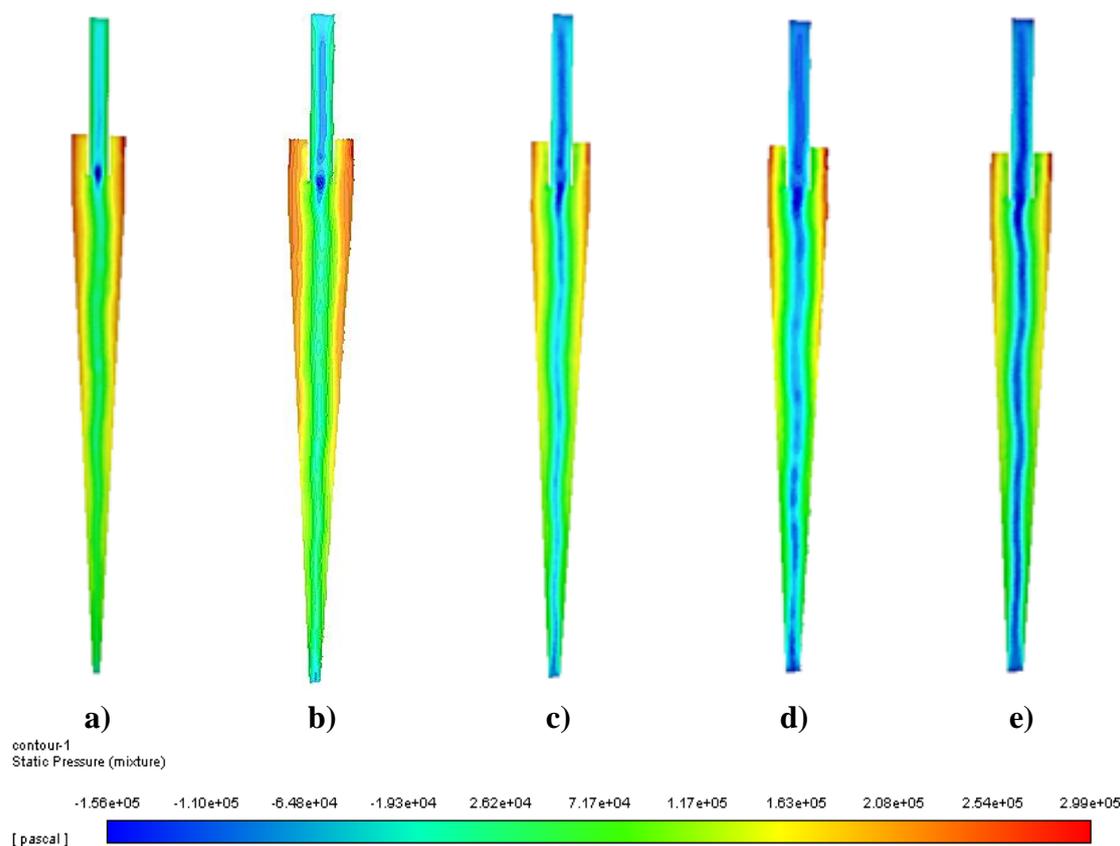
Os resultados da Figura 4.3 mostram a variação da viscosidade do fluido dentro do equipamento, devido a utilização de um fluido não-newtoniano nas simulações, mostrando a ocorrência das turbulências e de diferentes tensões cisalhantes dentro do

equipamento. Pode-se observar que os maiores valores de viscosidade foram nas regiões de menor velocidade axial, pois é onde há as menores tensões. Maior viscosidade acarreta o arraste das partículas sólidas para o *underflow*, produzindo correntes mais limpas no *overflow*.

4.2 Perfis de pressão

Como acontece com o perfil de velocidade, pode-se verificar que a pressão dentro do hidrociclone diminui com o decréscimo do raio, e é este gradiente de pressão que é responsável pela separação das fases em um hidrociclone, pois a menor pressão no centro arrasta a fase menos densa para essa região (CAVALCANTE, STORTI, *et al.*, 2019). A Figura 4.4 mostra o perfil de pressão em cada uma das geometrias.

Figura 4.4 –Perfil de pressão das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.



A Figura 4.4 mostra que houve maiores pressões nas paredes da parte cilíndrica, o que ocorre porque a alimentação do equipamento acontece na parte superior direita da parte cilíndrica. Conforme o fluido percorre o equipamento de forma descendente, tem-se a diminuição da pressão nas paredes, decorrente da perda de velocidade do fluido durante a operação, corroborando os resultados de Silva *et al.* (2012).

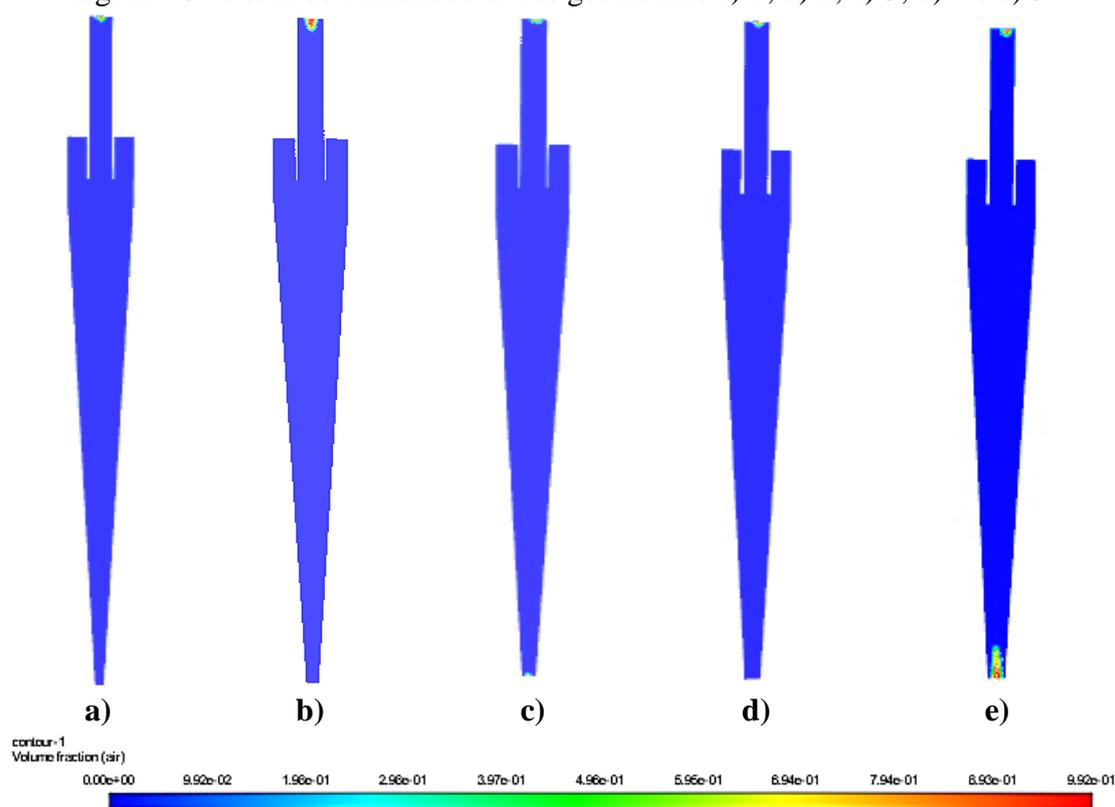
O centro do equipamento apresentou pressões negativas, ocasionadas pela entrada de ar nas regiões do *overflow* e *underflow*. Estas pressões negativas são responsáveis pela formação do *air-core*, e quanto menor for essa pressão no interior maior será o *air-core* (PETRI *et al.*, 2011).

A geometria 5, representada pela Figura 4.4e, foi a que apresentou a menor pressão dentro do equipamento, o que ocasiona a maior formação do *air-core*, que terá maior influência nos resultados de razão de líquido.

4.3 Perfis de fases

Ao analisar os perfis de pressão, pode-se notar uma zona de pressão negativa no centro do equipamento, o que demonstra a formação do *air-core*. A formação real deste núcleo de ar formado pela entrada de ar no *overflow* e *underflow*. A Figura 4.5 apresenta o perfil de entrada de ar dentro das 5 geometrias.

Figura 4.5 –Perfil de entrada de ar das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.



Relacionando a Figura 4.4 com a Figura 4.5, pode-se concluir que a geometria 5 foi a simulação que teve a maior formação de *air-core*, pois foi a que apresentou a menor pressão dentro do equipamento e, conseqüentemente, a maior entrada de ar.

Esse valor de pressão não foi suficiente para acarretar a formação de um *air-core* que ligasse o *overflow* ao *underflow*, mas foi suficiente para que houvesse uma entrada de ar no *underflow* e, assim, ter efeito no resultado de valor de líquido.

As demais geometrias não apresentaram uma entrada de ar relevante, como visto na Figura 4.5. Assim, a formação do *air-core* nestas simulações terá efeito praticamente nulo na razão de líquidos.

4.4 Comparação de resultados experimentais e simulados com fluido não-newtoniano

4.4.1 Razão de líquido

Ao final das simulações, pode-se obter os dados de vazão mássica na alimentação, *overflow* e *underflow*. Dessa maneira, pode-se calcular os valores de razão de líquido e comparar os resultados com o trabalho base de Mognon (2015). Os valores de vazão estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados de vazão mássica de todas as geometrias simuladas.

Geometrias	Alimentação $\left(\frac{Kg}{s}\right)$		Overflow $\left(\frac{Kg}{s}\right)$		Underflow $\left(\frac{Kg}{s}\right)$	
	média	desvio	média	desvio	média	desvio
1	0,8275	0,0011	0,6928	0,0008	0,1347	0,0002
2	0,8359	0,0005	0,6349	0,0004	0,1989	0,0001
3	0,8374	0,0004	0,5952	0,0003	0,2420	0,0001
4	0,8944	0,0004	0,4877	0,0003	0,2422	0,0002
5	0,8706	0,0007	0,4917	0,0004	0,3789	0,0003

Para todas as geometrias foi usado o mesmo valor de pressão na alimentação, mas, justamente por usar a pressão como parâmetro de entrada, houve uma sutil diferença nas médias de vazão mássica na alimentação.

Os valores de razão de líquido simulados e os experimentais obtidos por Mognon (2015) estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Comparação dos valores de Razão de Líquido de todas as geometrias simuladas com o trabalho de Mognon (2015).

Geometrias	R_L Mognon (%)	R_L Simulado (%)	Erro Relativo (%)
1	7,35	16,27	121,36
2	11,76	23,79	102,30
3	20,86	28,90	38,54
4	26,32	27,08	2,89
5	37,82	43,52	15,07

Como pode ser visto na Tabela 4.3, os valores de R_L seguiram a mesma tendência apresentada pelo trabalho base. A geometria 4 apresentou um bom resultado quando analisado o erro relativo, pois apresentou um valor menor do que 3%. Já a geometria 5 apresentou um resultado aceitável pois tem o erro relativo em torno de 15%.

No entanto, as geometrias 1, 2 e 3, mesmo considerando as flutuações existentes no escoamento de um hidrociclone, apresentaram valores de R_L que não podem ser considerados válidos, pois os erros relativos foram maiores do que 30%.

O fato de os valores das simulações 1, 2 e 3 serem maiores do que do trabalho base, mostra que, mesmo aplicando alguns modelos no *software* para fugir da idealidade e se aproximar da realidade, não foi suficiente para predizer os dados com exatidão. Dada a potência computacional disponível, não foi possível aplicar outros para que os dados se aproximassem mais dos resultados experimentais de Mognon (2015), mas os dados são suficientes para mostrar o que ocorre neste tipo de experimento.

4.4.1 Eficiência total

Para cálculo da eficiência total, faz-se necessário a injeção de partículas no equipamento para obter os dados de taxa mássica. Porém, antes da injeção é necessário calcular o modelo RRB da granulometria das rochas usadas nos experimentos práticos.

Com os dados do modelo RRB, pode-se acrescentar as configurações da injeção de partículas no *software* e, então, obter os dados de taxa mássica para cada geometria. A Figura 4.6 apresenta como ficou a injeção de partículas nas 5 geometrias.

Analisando a Figura 4.6, pode-se concluir que a eficiência teve um alto valor, dado que a eficiência total leva em consideração a taxa mássica de sólidos que entram pela alimentação e que saem pelo *underflow*.

Além disso, hidrociclones utilizados na indústria petrolífera devem obter correntes o mais limpas possível no *overflow* para que se possa reutilizar o fluido na perfuração do poço.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de taxas mássicas na alimentação, *overflow* e *underflow* de cada geometria obtidas a partir da injeção de partículas.

Figura 4.6 – Injeção de partículas nas geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5.

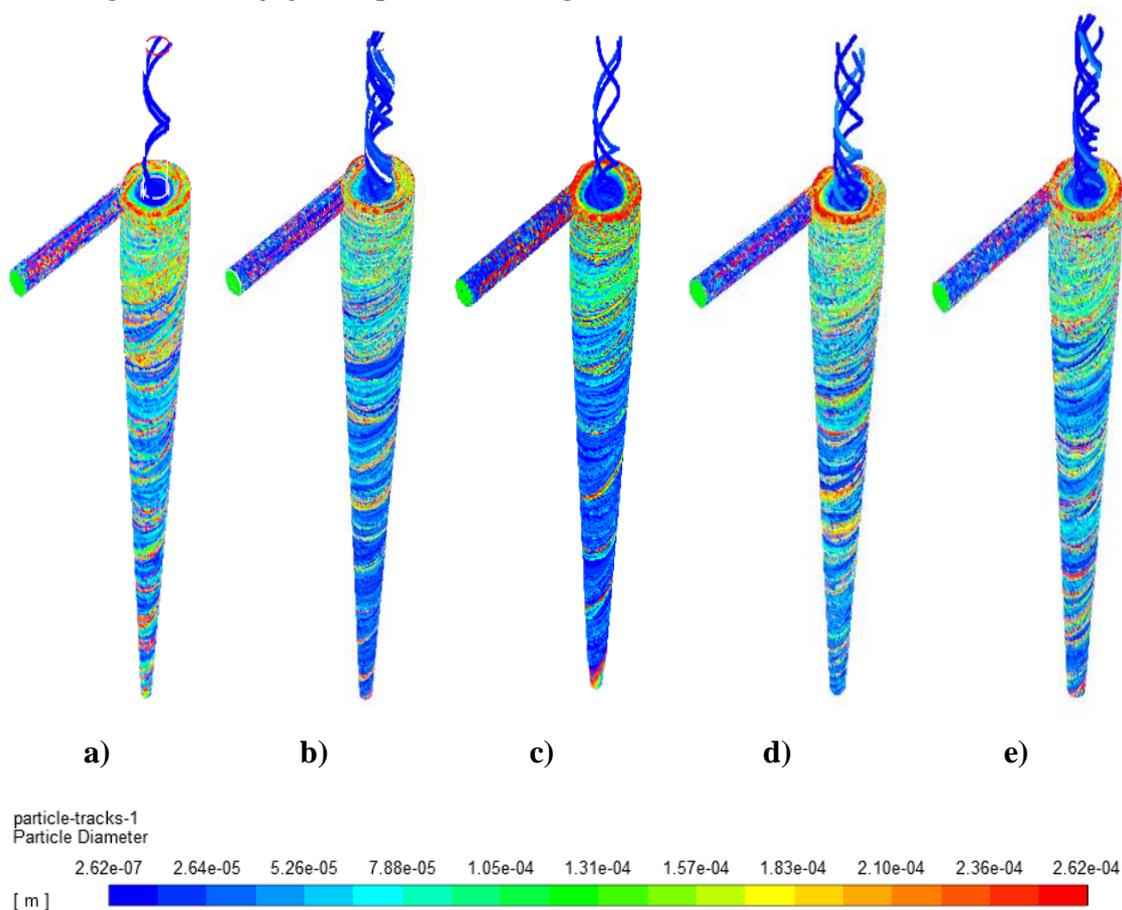


Tabela 4.4 – Valores de taxa mássica na Alimentação, *Overflow* e *Underflow* para cada uma das geometrias simuladas.

Geometrias	Alimentação $\left(\frac{g}{min}\right)$	<i>Overflow</i> $\left(\frac{g}{min}\right)$	<i>Underflow</i> $\left(\frac{g}{min}\right)$
1	60	0,115	52,44
2	60	1,609	54,78
3	60	0,291	56,28
4	60	0,192	56,76
5	60	0,814	58,2

Os valores de eficiência total calculados e os dados experimentais estão apresentados na Tabela 4.5.

Assim como observado experimentalmente, o aumento do diâmetro de *underflow* levou ao aumento da eficiência total, o que mostra que a simulação apresentou uma ótima aproximação. Além disso, todas as simulações tiveram ótimos valores de eficiência quando comparados com o trabalho base, visto que o erro relativo apresentado foi menor ou igual a 10%.

Tabela 4.5 – Comparação dos valores de Eficiência total de todas as geometrias simuladas com o trabalho de Mognon (2015).

Geometrias	η Mognon (%)	η Trabalho (%)	Erro Relativo (%)
1	81,23	87,38	7,57
2	82,52	91,30	10,64
3	85,08	93,85	10,31
4	86,49	94,64	9,42
5	89,33	97,03	6,62

Além do mais, a eficiência apresentada mostra que este tipo de geometria simulada tem alto potencial de uso para as indústrias petrolíferas, dado que o *underflow* sai com correntes bastante concentradas.

As pequenas diferenças apresentadas podem ser explicadas devido ao fato de que na injeção de partículas foram consideradas partículas esféricas, já que o trabalho de Mognon (2015) não apresentou nenhum valor para tal parâmetro.

4.5 Comparação entre simulações com fluido newtoniano e não-newtoniano utilizando a geometria 2

4.5.1 Perfis de velocidade para comparação dos fluidos

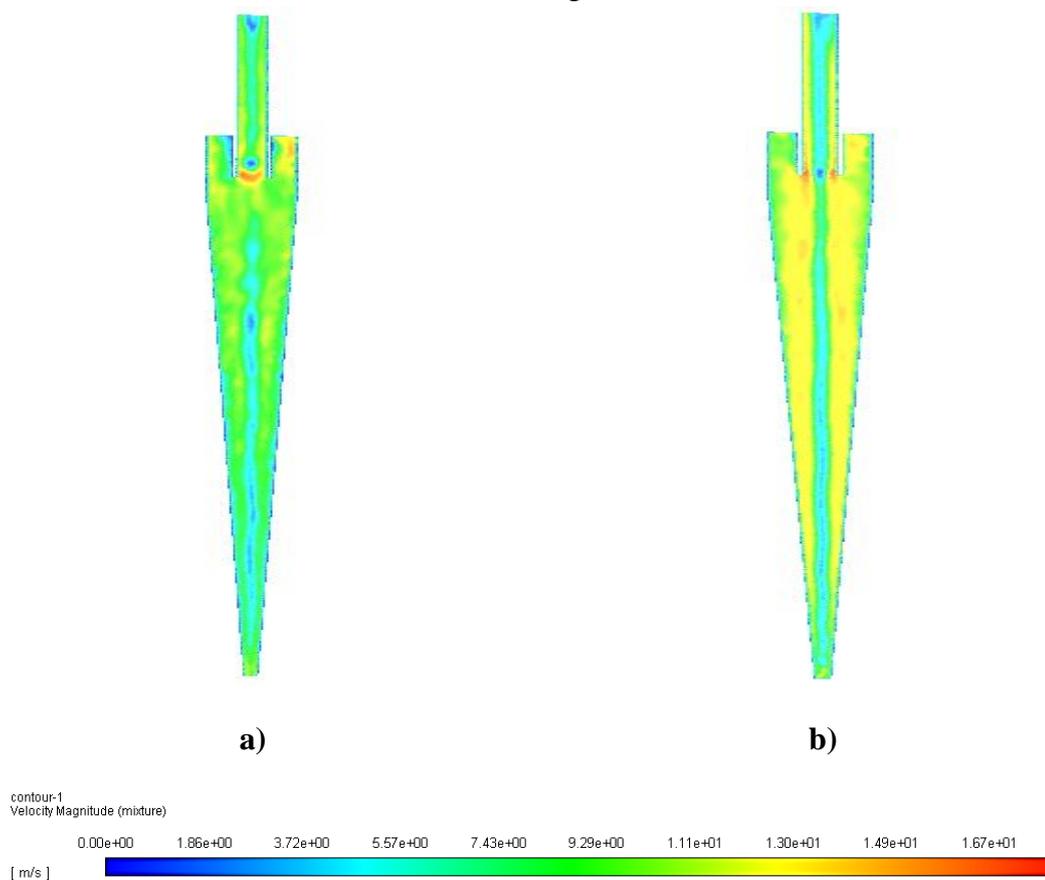
Para comparar os efeitos da utilização de fluidos diferentes na operação de hidrociclonagem, simulou-se a geometria 2 com fluido não-newtoniano e com água como fluidos de operação. Como a comparação é entre fluidos diferentes, o perfil de velocidade a ser analisado deve ser o de magnitude de velocidade. A Figura 4.7 apresenta o perfil de cada simulação.

A Figura 4.7 apresentou um valor de zero nas paredes do equipamento nas duas simulações, isso devido a condição de não deslizamento. Pode-se também observar que

quanto mais longe das paredes, ou seja, em direção ao centro do equipamento, maior a velocidade.

No entanto, no centro do equipamento percebe-se a diminuição da velocidade e o aparecimento de um rastro que praticamente liga o *overflow* ao *underflow*, isso ocorre em consequência da formação do *vortex* secundário responsável pela ascensão e separação das partículas.

Figura 4.7 –Perfil de magnitude de velocidade da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água.



As principais diferenças entre os perfis são a maior velocidade e o rastro mais visível da formação do *vortex* secundário na Figura 4.7 b), que ocorrem porque a água tem menor viscosidade, sendo assim, é mais fácil este fluido atingir velocidades mais altas.

Para confirmar essas observações, a Figura 4.8 apresenta os perfis de viscosidade para cada um dos fluidos.

A Figura 4.8 mostra a variação da viscosidade do fluido não-newtoniano, causada pelas diferentes tensões dentro do equipamento, o que é confirmado pela Tabela 4.6, onde o desvio padrão mostra a alta variação do valor médio de viscosidade.

Já no perfil da água, pode-se observar que, dentro do equipamento, a viscosidade predominante é de aproximadamente $1 \times 10^{-3} \left(\frac{Kg}{m.s} \right)$, exatamente o valor de viscosidade da água definida nas condições de contorno. A variação apresentada na Figura 4.8 b) é ocasionada pela entrada de ar, mas como pode ser visto na Tabela 4.6, a variação do valor médio da viscosidade é mínima.

Figura 4.8 –Perfil de viscosidade da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água.

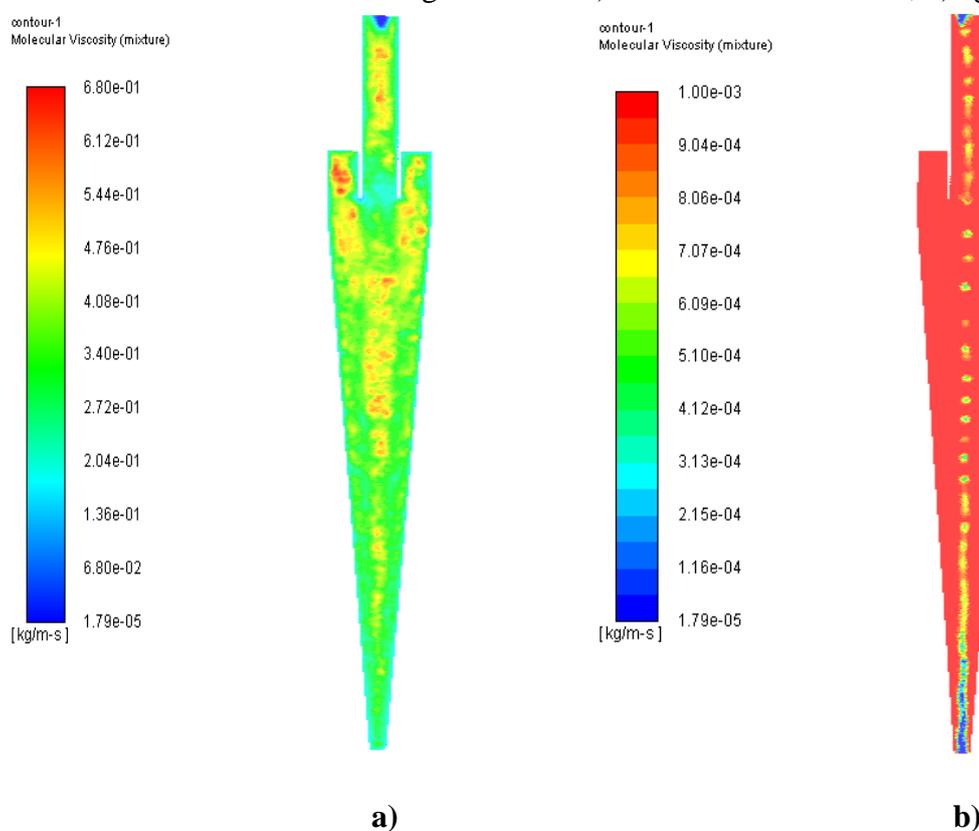


Tabela 4.6 – Valores médios de viscosidade e desvio padrão para os fluidos utilizados.

Simulação	Viscosidade média $\left(\frac{Kg}{m.s} \right)$	Desvio Padrão
Fluido não-newtoniano	0,02644	0,01441
Água	0,00099	0,00004

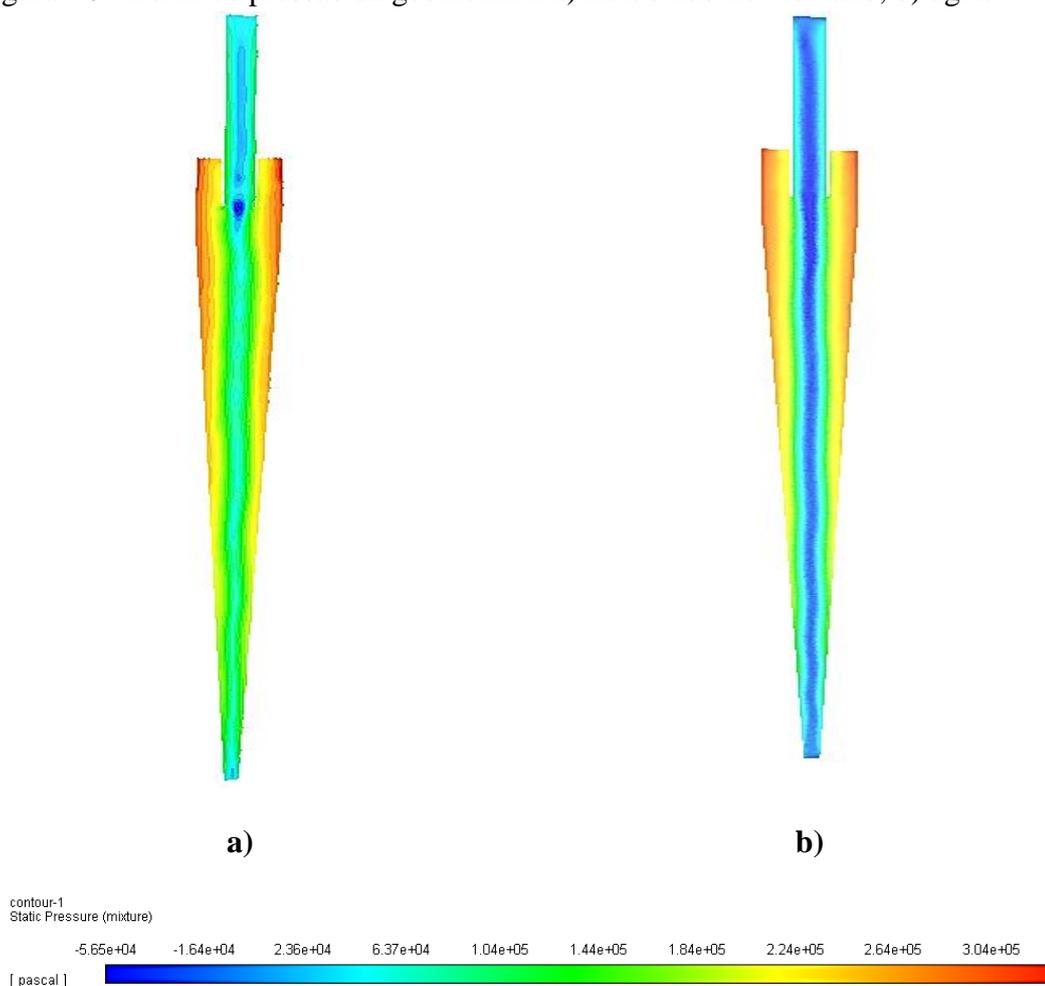
4.5.2 Perfis de pressão para comparação dos fluidos

Os perfis de pressão são importantes para mostrar se há diferença de pressão dentro do equipamento, pois tal diferença é responsável pela separação das fases. A Figura 4.9 apresenta o perfil da geometria 2 simulada com fluidos diferentes.

A Figura 4.9 apresentou os maiores valores de pressão nas paredes do equipamento, assim como uma diminuição da mesma no sentido de dentro do equipamento.

Na Figura 4.9a, pode-se observar que na entrada do *vortex finder* e no *overflow* foram apresentadas pressões negativas, o que caracteriza a formação do *air-core*. Entretanto, a Figura 4.9b apresentou uma pressão negativa bem maior no centro do equipamento, assim como uma pressão negativa que liga o *overflow* ao *underflow*, o que confirma a formação de um *air-core* bem maior quando comparado ao da simulação com fluido não-newtoniano.

Figura 4.9 –Perfil de pressão da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água.



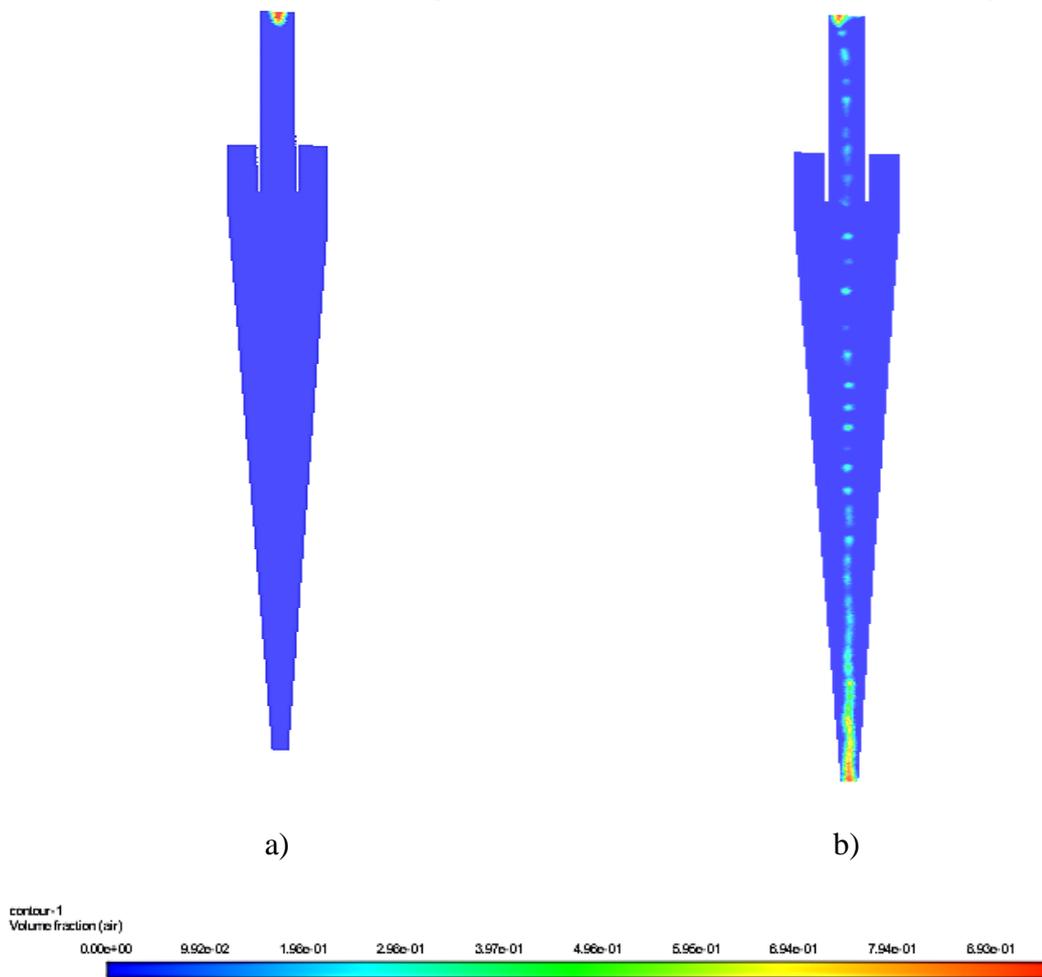
4.5.3 Perfis de fase para comparação dos fluidos

Para confirmar a presença do *air-core*, pode-se analisar o perfil de fase do equipamento. A Figura 4.10 apresenta este perfil para a geometria 2 com fluidos diferentes.

Confirmando a predição da Figura 4.9, a Figura 4.10 mostra uma maior entrada de ar dentro da geometria simulada com água, o que confirma a presença de um maior *air-core* quando comparado ao da simulação com fluido não-newtoniano.

O menor *air-core* formado na simulação com fluido não-newtoniano pode ser explicado devido a maior viscosidade deste fluido, o que dificulta a entrada de ar pelas saídas do equipamento.

Figura 4.10 –Perfil de entrada de ar na geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água.



4.5.4 Razão de líquido para comparação dos fluidos

Ao final das duas simulações, obteve-se os valores de vazão mássica na *Alimentação*, *Overflow* e *Underflow* e, assim, pode-se comparar os valores de razão de líquido. Os valores de cada uma das simulações estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Dados de vazão mássica da geometria 2 com fluidos diferentes.

Simulação	Alimentação ($\frac{Kg}{s}$)		Overflow ($\frac{Kg}{s}$)		Underflow ($\frac{Kg}{s}$)	
	média	desvio	média	desvio	média	desvio
Fluido não-newtoniano	0,8359	0,0005	0,6349	0,0004	0,1989	0,0001
Água	0,6005	0,0006	0,5136	0,0004	0,0818	0,0003

A comparação do valor de razão de líquido entre os dois fluidos está apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Comparação dos valores de Razão de Líquido para os dois fluidos.

Simulação	R_L (%)
Fluido não-newtoniano	23,79
Água	13,61
Mognon (2015)	11,76

A Tabela 4.8 mostra uma diferença de 42,8% entre os resultados de razão de líquido, que é ocasionada pela viscosidade dos fluidos. Como o fluido não-newtoniano apresenta uma maior viscosidade média, a ascensão desse fluido se torna mais difícil e, conseqüentemente, acaba aumentando o valor de razão de líquido para esta simulação.

Comparando o resultado obtido na simulação com água com o resultado de Mognon (2015), pode-se perceber que, mesmo a água tendo uma viscosidade menor do que o fluido utilizado pelo autor, a simulação apresentou um valor maior de razão de líquido, reforçando a necessidade de aplicar mais modelos dentro do *software* para melhorar a precisão de resposta.

4.5.5 Eficiência total para comparação dos fluidos

Para comparar a eficiência total do hidrociclone operando com diferentes fluidos, foram injetadas partículas nas simulações utilizando os mesmos parâmetros em ambos os casos. Os valores de taxa mássica obtidos na alimentação, *overflow* e *underflow* estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores de taxa mássica na Alimentação, *Overflow* e *Underflow* para a geometria 2 com fluidos diferentes.

Simulações	Alimentação $\left(\frac{g}{min}\right)$	<i>Overflow</i> $\left(\frac{g}{min}\right)$	<i>Underflow</i> $\left(\frac{g}{min}\right)$
Fluido não-newtoniano	60	1,609	54,78
Água	60	0,214	51,67

A comparação do valor de eficiência total entre os dois fluidos está apresentada na Tabela 4.10.

A Tabela 4.10 apresenta uma diferença de 6% entre os valores de eficiência, o que já era esperado pelo que foi visto na Tabela 4.8. Dada a maior viscosidade média do fluido não-newtoniano, este acabou carregando uma maior quantidade de partículas para o *underflow*, acarretando em uma maior eficiência.

Tabela 4.10 – Comparação dos valores de Eficiência total para os dois fluidos.

Simulações	η (%)
Fluido não-newtoniano	91,30
Água	86,11
Mognon (2015)	82,52

Como já era previsto pelos dados de razão de líquido, a eficiência da operação utilizando água foi maior que o resultado de Mognon (2015).

4.5.6 Curvas de entrada e saída ao longo do tempo para comparação dos fluidos

Para avaliar as alterações na vazão de alimentação e de *underflow* entre os dois tipos de fluido, construiu-se curvas de vazão mássica por tempo de simulação. A Figura 4.11 apresenta o gráfico de vazão por tempo de simulação da geometria 2 utilizando fluido não-newtoniano e a Figura 4.12 apresenta o gráfico de vazão por tempo de simulação da geometria 2 utilizando água.

Figura 4.11 – Gráfico de vazão por tempo para simulação da geometria 2 utilizando fluido não-newtoniano.

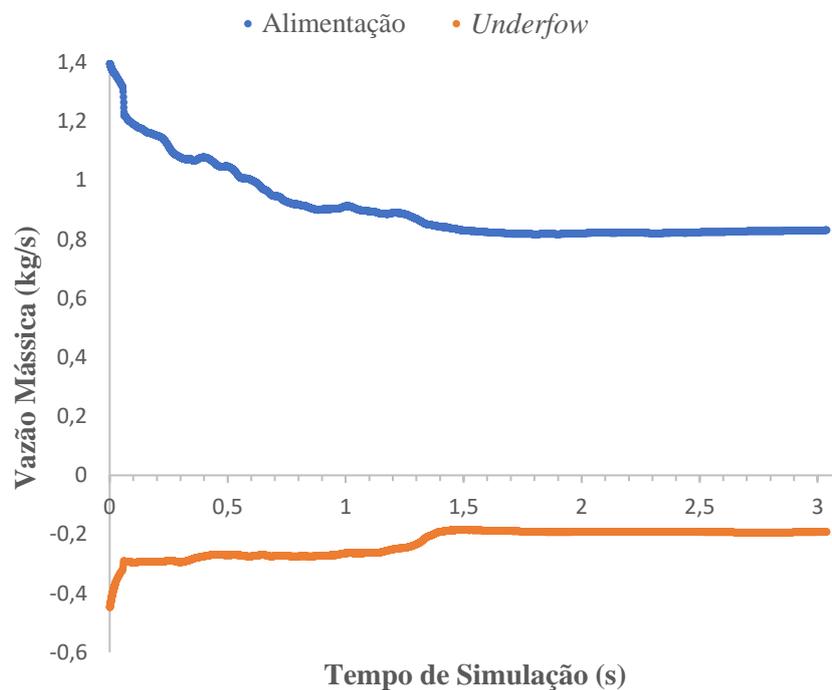
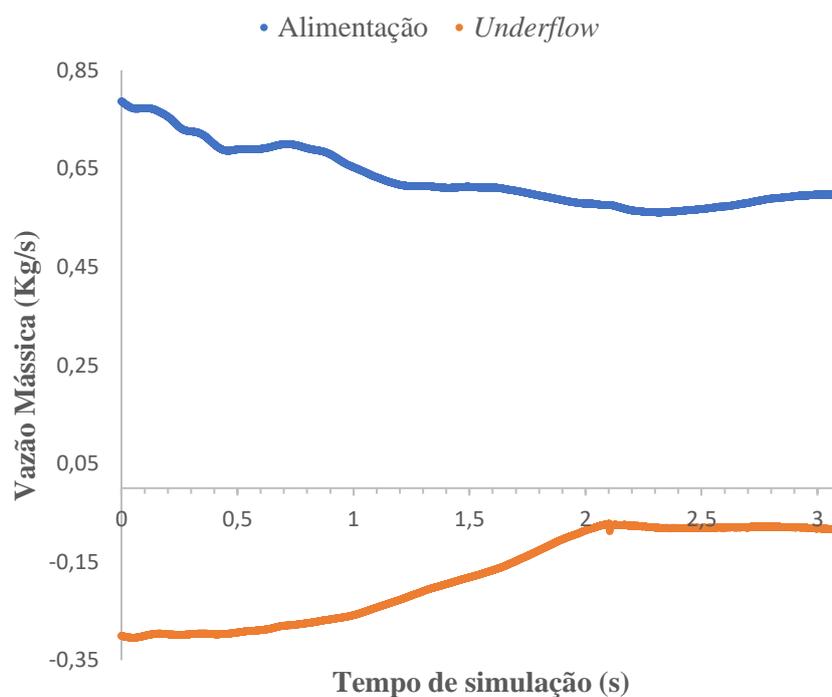


Figura 4.12 – Gráfico de vazão por tempo para simulação da geometria 2 utilizando água.



Nas Figuras 4.11 e 4.12 pode-se observar que os valores de vazão tanto na alimentação quanto no *underflow* sofrem oscilações durante a simulação, mas tendem a se estabilizar após um tempo: na Figura 4.11, o tempo foi de 1,6s, e na Figura 4.12 foi de 2,1s.

Nos dois casos, a estabilização das curvas ocorreu após a habilitação do modelo VOF, visto que este modelo acarreta a formação do *air core*, mas em seguida estabiliza a simulação.

5 CONCLUSÕES

Os resultados gerados pelas simulações serviram para demonstrar vários fenômenos que ocorrem dentro de um hidrociclone. Pode-se observar os perfis de velocidade tangencial e axial das geometrias, o que comprovou as informações obtidas na literatura sobre o comportamento da velocidade e das correntes do fluido dentro do equipamento. Além destes perfis, foi possível analisar a reologia do fluido não-newtoniano e o seu comportamento na presença de turbulência no equipamento.

Com o perfil de pressão, pode-se confirmar que, com a utilização do modelo VOF, todos os equipamentos apresentaram uma região de pressão negativa no centro de seu raio, o que confirmou a formação do *air-core*, essencial para a separação das fases nesta operação unitária.

Pôde-se comparar os resultados de eficiência total e razão de líquidos simulados com os resultados práticos do trabalho de Mognon (2015). Para razão de líquido, a geometria 4 apresentou um bom resultado e a geometria 5 apresentou um resultado aceitável quando comparados com os resultados experimentais de Mognon (2015). As demais simulações tiveram valores que não podem ser considerados condizentes com a prática devido ao alto erro relativo apresentado.

No entanto, após a injeção de partículas e o cálculo da eficiência total, as simulações apresentaram ótimos valores quando comparados com o trabalho base, isso porque todas elas tiveram um erro relativo abaixo ou igual a 10%.

Desta forma, pode-se concluir que este trabalho apresentou resultados satisfatórios em relação ao funcionamento de um hidrociclone e comprovou a eficácia do uso de CFD para previsão de resultados preliminares para a operação de hidrociclonagem. Apesar dos resultados promissores, ainda existem pontos a serem melhorados de forma a encontrar razões de líquido mais próximas do experimental para hidrociclones com menores diâmetros de *underflow*.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, há a necessidade de se trabalhar em simulações onde a concentração de sólidos não seja considerada diluída, ou seja, será necessário simular as duas fases, sólida e líquida, ao mesmo tempo. No entanto, a simulação ficará muito mais pesada, então, faz-se necessária a utilização de computadores com processadores com mais núcleos e *threads* e mais memória RAM disponível.

Além disso, para obtenção de resultados realmente precisos, é necessário a utilização de mais modelos dentro do *software*, como, por exemplo, a especificação da granulometria das partículas para uma maior precisão de eficiência, e isso só é possível quando há a disponibilidade de mais potência computacional.

Outro ponto que pode ser melhorado no futuro é análise mais aprofundada de resultados, como, por exemplo, os perfis de velocidade tangencial, axial e pressão. Esses parâmetros podem demonstrar a existência de fenômenos não apresentados neste trabalho na operação unitária de hidrociclonagem.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A. K. de. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder**. 2008. 89 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- ALVES, J. V. B. **Hidrociclone para separação do óleo residual de água em refinarias**. 2012. 90 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- ANJOS, R. P. dos. **Avaliação do desempenho de modelos de turbulência em hidrociclones utilizando o openfoam**. 2016. 98 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- ARAÚJO, C. A. O. de, SCHEID, C. M., LOUREIRO, J. B. R., *et al.* "Hydrocyclone for oil-water separations with high oil content: Comparison between CFD simulations and experimental data", **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 187, p. 106788, 2020. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106788. .
- ARRUDA, A. A. **Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido**. 2008. 47 f. Universidade Católica de Pernambuco, 2008.
- BICALHO, I. C. **Concentração de leveduras da fermentação alcoólica em hidrociclones**. 2011. 135 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- BICALHO, I. C. **Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna**. 2015. 210 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- BRAVIM, E. C., PEREIRA, R. A. **Mapeamento de zonas de desgaste em hidrociclones na classificação de polpa de minério**. 2007. 54 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.
- CASTILHO, L. R., MEDRONHO, R. A. "A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones", **Minerals Engineering**, v. 13, n. 2, p. 183–191, 2000. DOI: 10.1016/S0892-6875(99)00164-8. .
- CAVALCANTE, I. R. M., STORTI, F. C., FILHO, J. A. C., *et al.* "Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone via CFD", **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 15362–15378, 2019. .
- CORRÊA, L. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos com filtragem temporal via método de volumes finitos**. 2016. 99 f. Universidade de São Paulo, 2016.
- COSTA, L. M. F. **Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento do vento em pontes suspensas** **Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento do vento em pontes suspensas**. 2018. Universidade de São Paulo, 2018.
- DAVIDSON, L. **Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling**. Goteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 2019.
- FERREIRA, R. L. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos usando modelagem dinâmica**. 2006. 150 f. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.
- FREITAS, A. G. B. **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones**. 2009. 114 f. Universidade Federal de Sergipe, 2009.

GONÇALVES, S. M. **Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador**. 2016. 91 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

GOTSCHLICH, M. F. L. **Escoamento de fluidos não newtonianos revisão da literatura e análise de correlações para o fator de atrito e coeficientes de perda localizada**. 2011. 91 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

LEAL, A. B. **Estudo do escoamento de fluidos não-newtonianos em dutos**. 2005. 101 f. Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro, 2005.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2 ed ed. Rio de Janeiro, E-papers, 2001.

MELO, K. C. de. **Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água**. 2008. 100 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

MOGNON, J. L. **Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo**. 2015. 98 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

MORA, A. E. M. **Estudo numérico do transporte de bolhas/gotas em fluidos newtonianos através das metodologias VOF e S-CLSVOF utilizando o OpenFOAM**. 2018. 125 f. Universidade Federal de Itajubá, 2018.

MOREIRA, B. A. **Estudo da sedimentação em suspensões de fluidos com características reológicas pseudoplásticas**. 2014. 173 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

PANISSET, C. M. de Á. **Novas Alternativas Para o Sistema de Separação Sólido-Líquido na Perfuração de Poços de Petróleo: teste de uma unidade de VCS; busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclonação; e tratamento da borra de centrifugação por microondas**. 2014. 278 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

PETRI, I. J., ATAIDE, C. H., SILVA, R. B., *et al.* "Estudo da fluidodinâmica de um hidrociclone do tipo desilter operando com fluido de perfuração através de técnicas de CFD". **IX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Maringá, PR, jul. 2011. , p. 6.

PETRI, I. J., VIEIRA, L. G. M. "Influência do tipo e da magnitude do diâmetro de underflow no desempenho de um hidrociclone concentrador". **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Búzios, RJ, set. 2012a. , p. 10.

PETRI, I. J., VIEIRA, L. G. M. "Otimização de um hidrociclone recuperador de líquido a partir da modificação do orifício de underflow e das técnicas de CFD". **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Búzios, RJ, set. 2012b. , p. 10.

QUINTINO, D. B. **Otimização geométrica e análise operacional em hidrociclones modulares utilizando fluidos newtonianos**. 2019. 120 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

SILVA, R. B., PETRI, I. J., PANISSET, C. M. A., *et al.* "Influência dos modelos de viscosidade cinemática na fluidodinâmica de um hidrociclone dessiltadores via CFD". **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Búzios, RJ, set. 2012. , p. 10.

SOUZA, J. F. A. de, OLIVEIRA, L. R. de, AZEVEDO, J. L. L. de, *et al.* "Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem", **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n.

1, p. 21–41, 2011. DOI: 10.1590/S0102-261X2011000100002. .

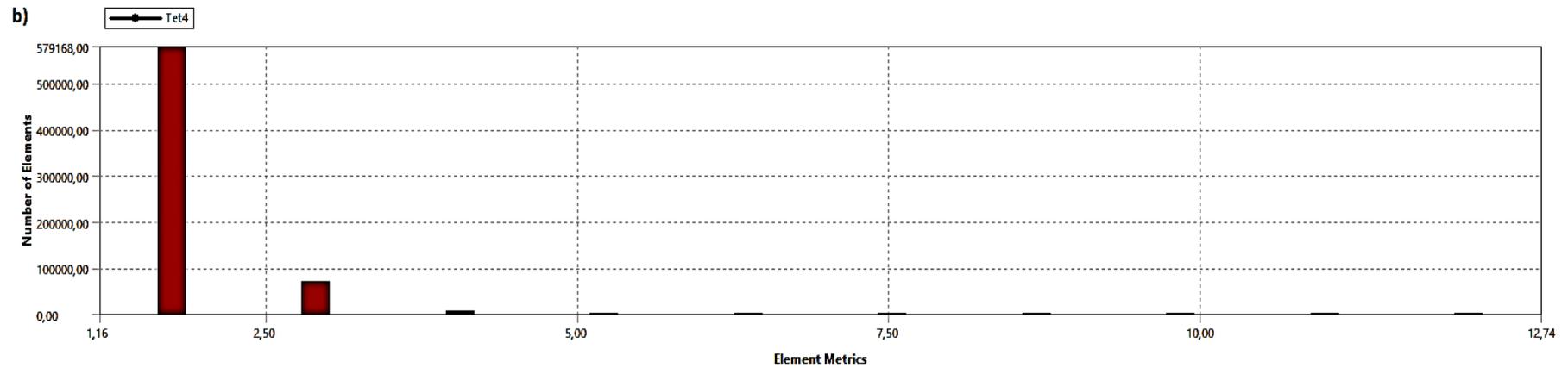
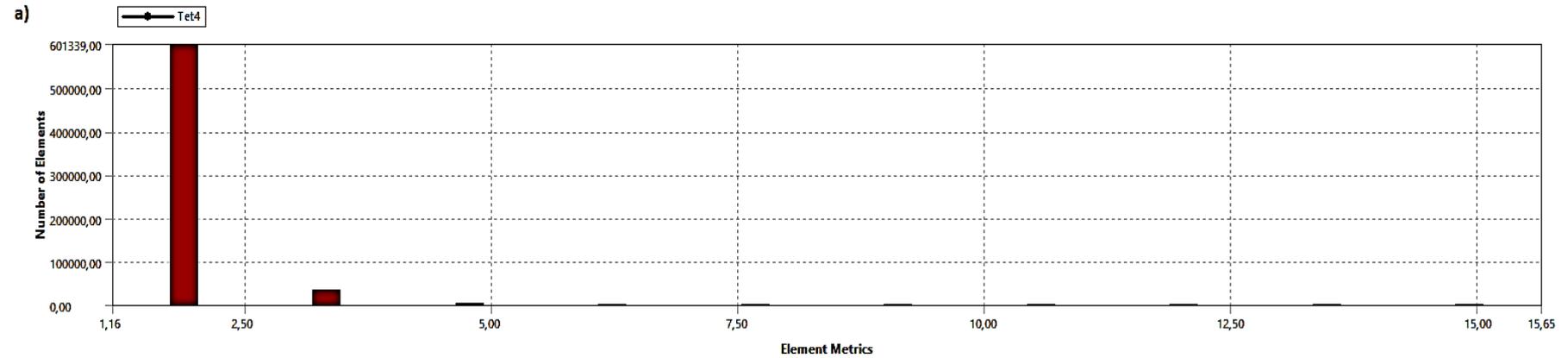
SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 4rd Ed ed. Czech Republic, Butterworth Heinemann, 2000.

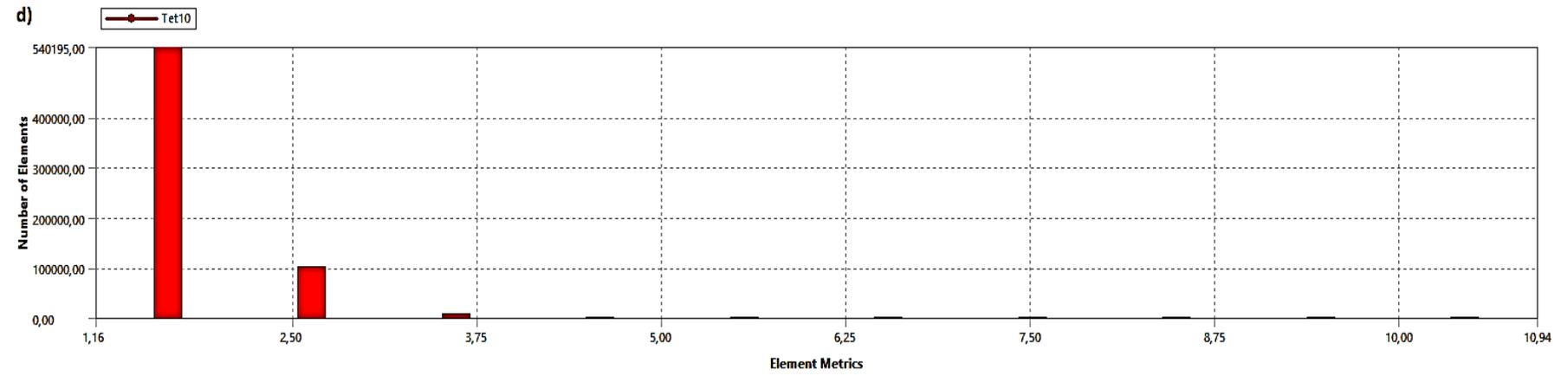
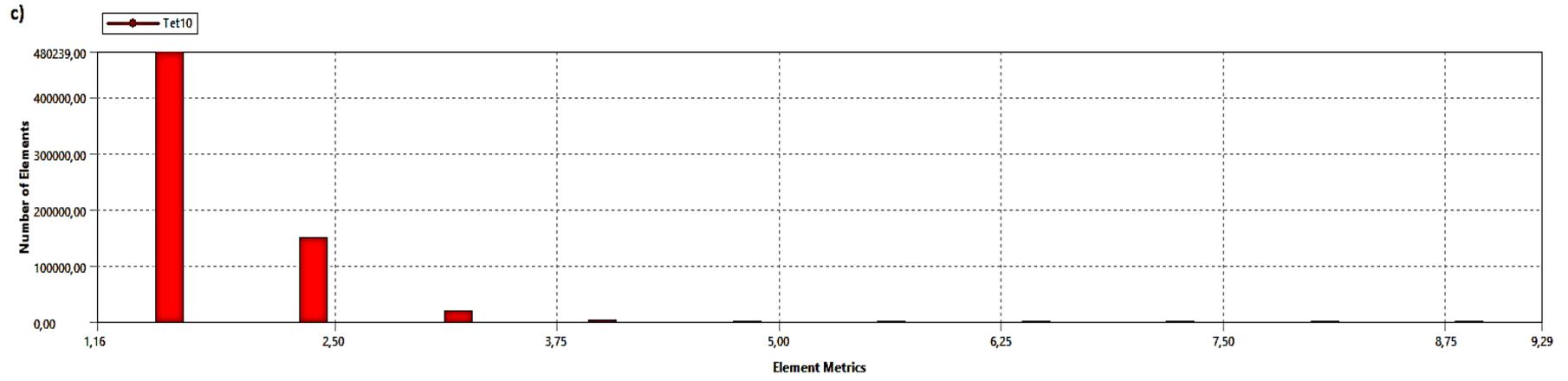
VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method**. 2nd Ed ed. England, Pearson Education Limited, 2007.

VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes**. 2006. 285 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

APÊNDICE A

Figura A.1 – *Aspect Ratio* das geometrias: a) geometria 1, b) geometria 2, c) geometria 3, d) geometria 4, e) geometria 5.





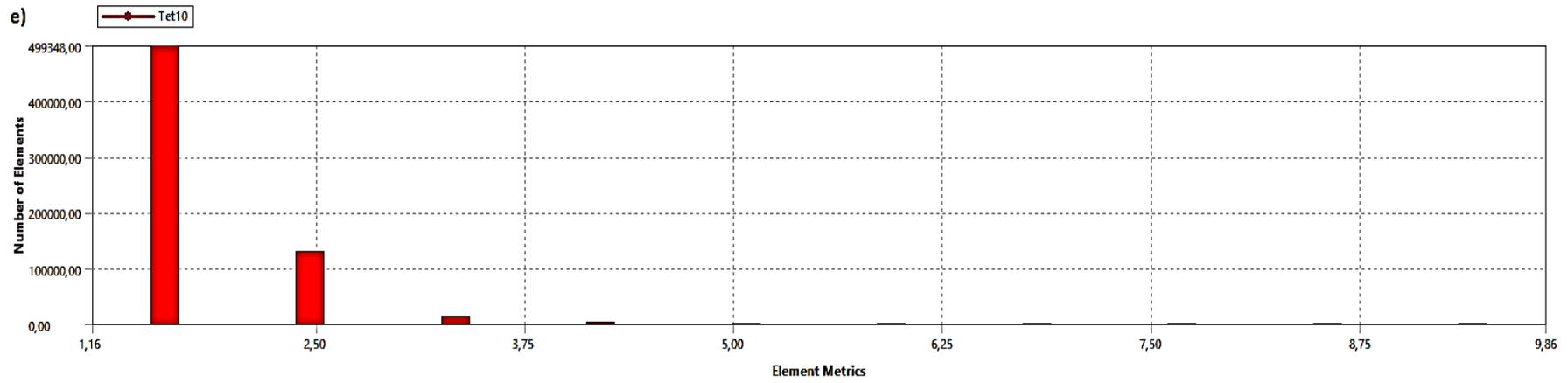
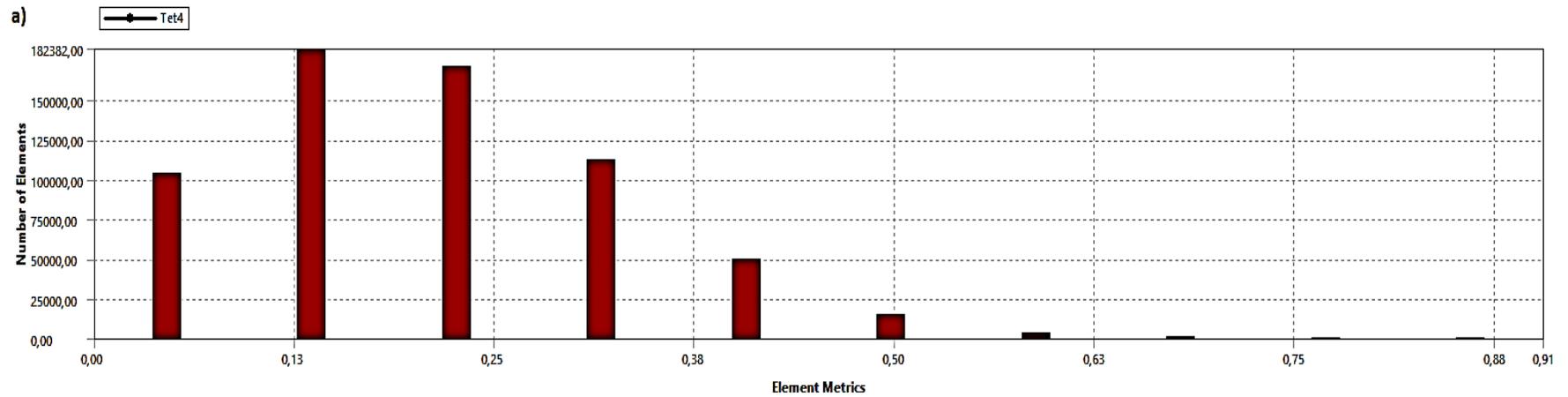
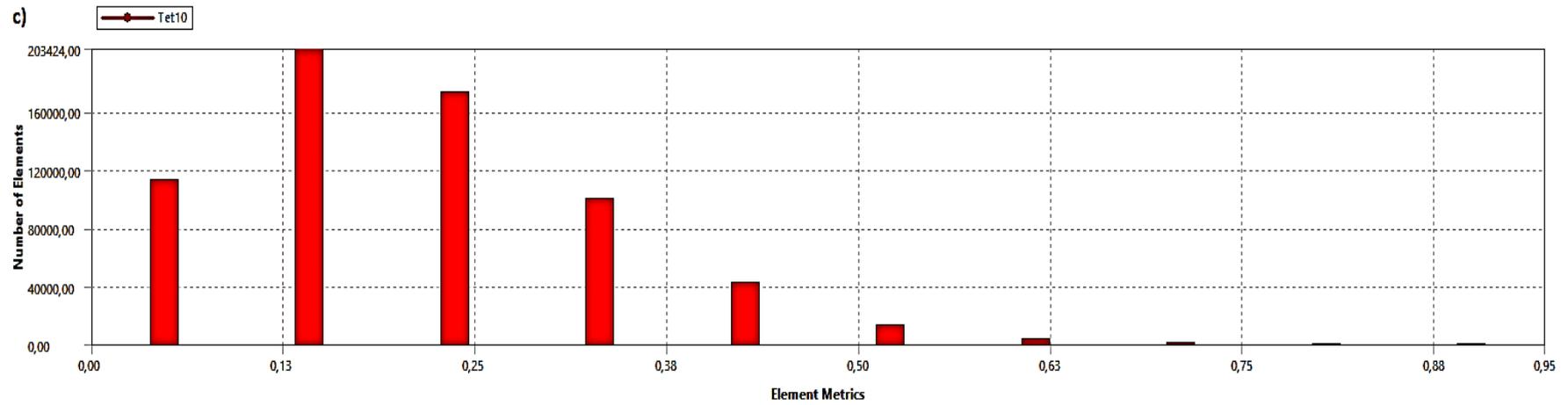
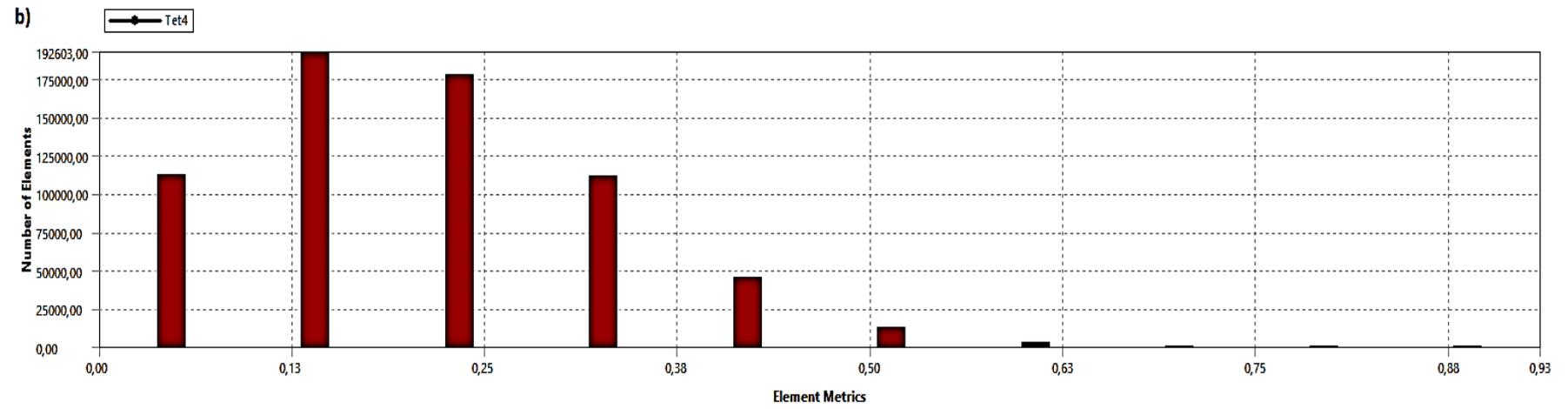
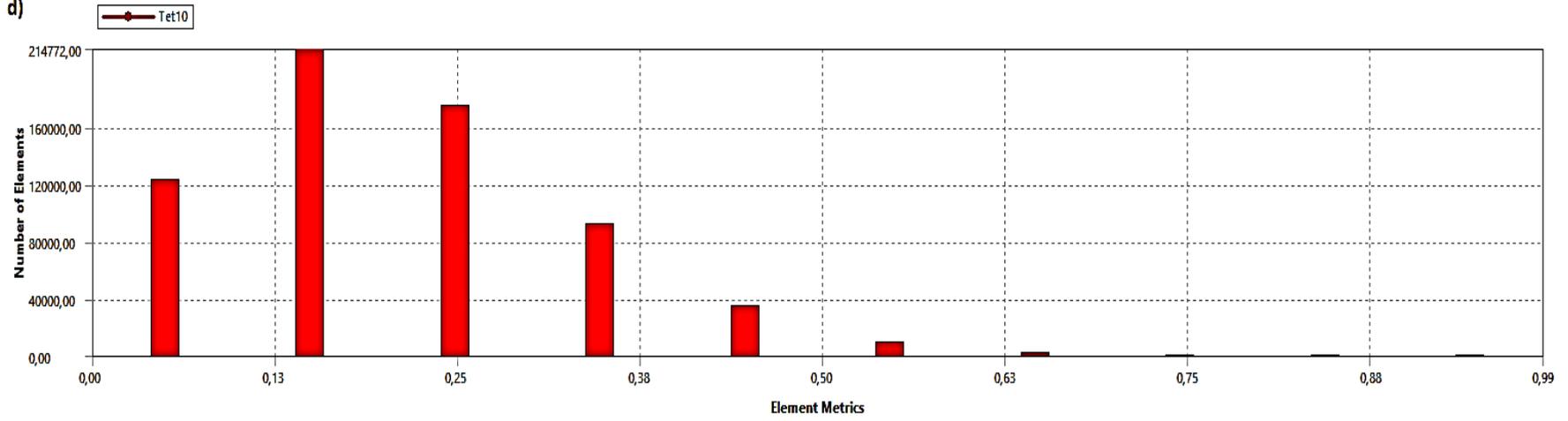


Figura A.2 – Skewness das geometrias: a) geometria 1, b) geometria 2, c) geometria 3, d) geometria 4, e) geometria 5.





d)



e)

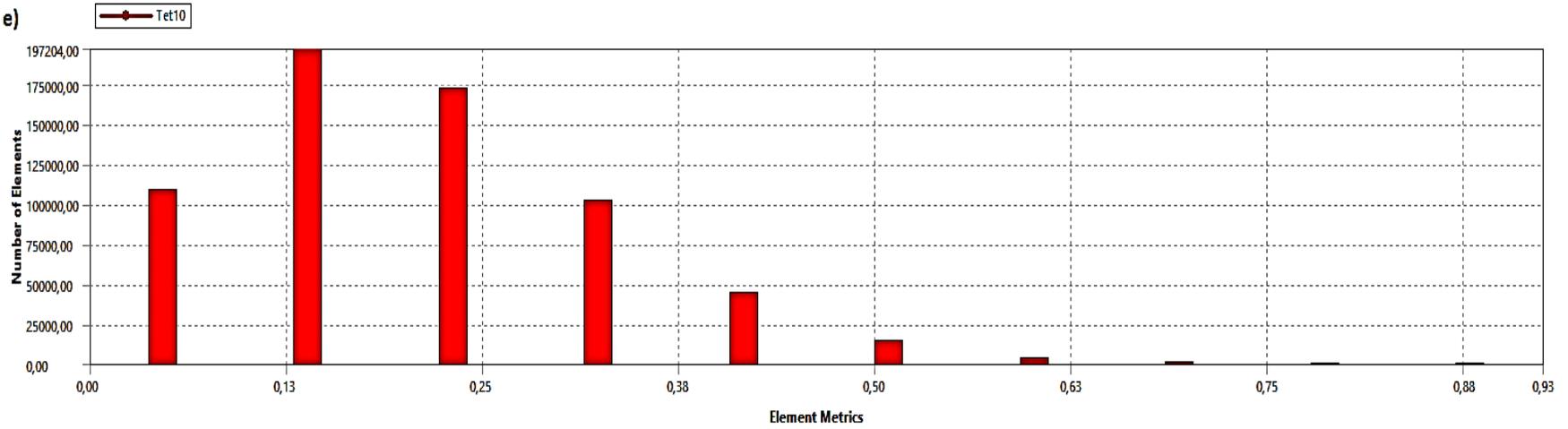
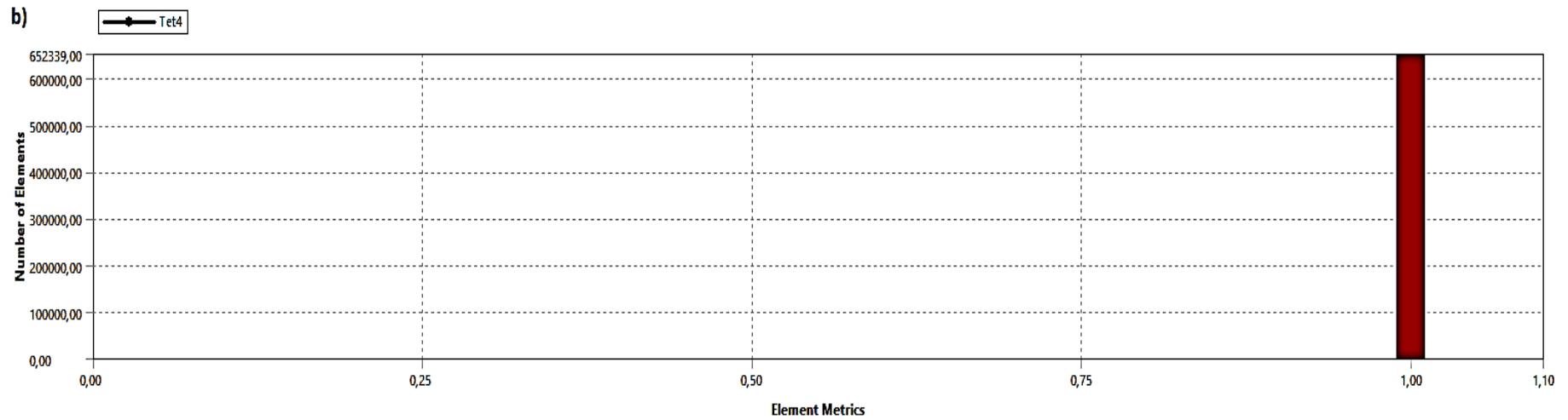
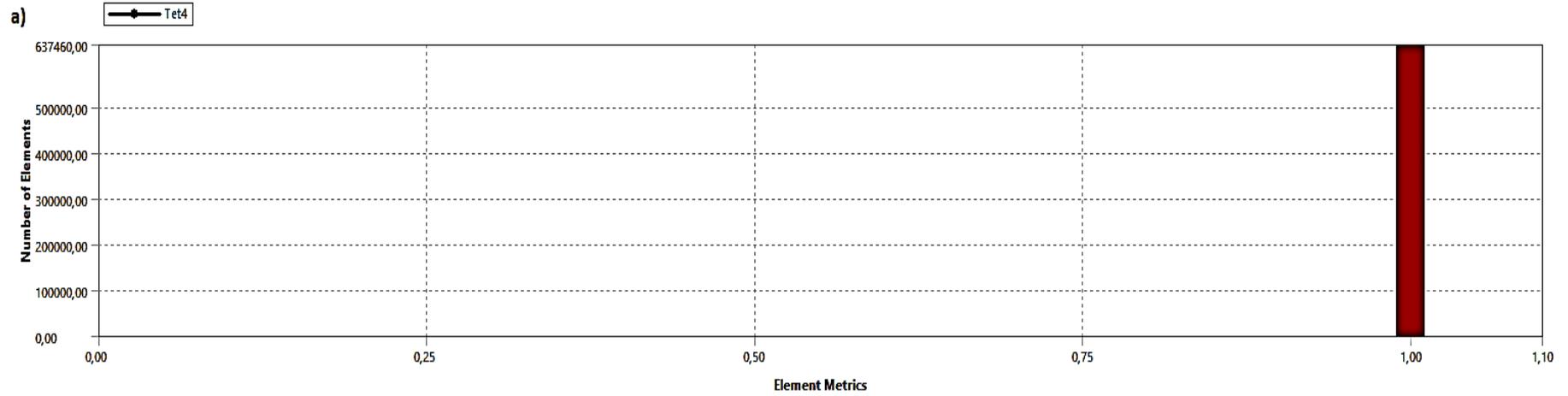
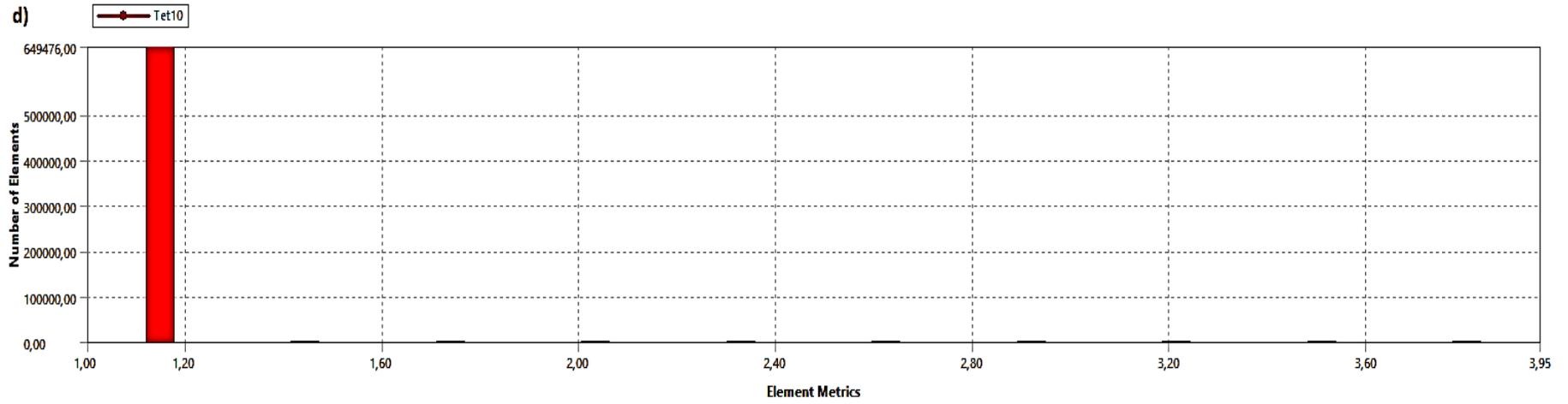
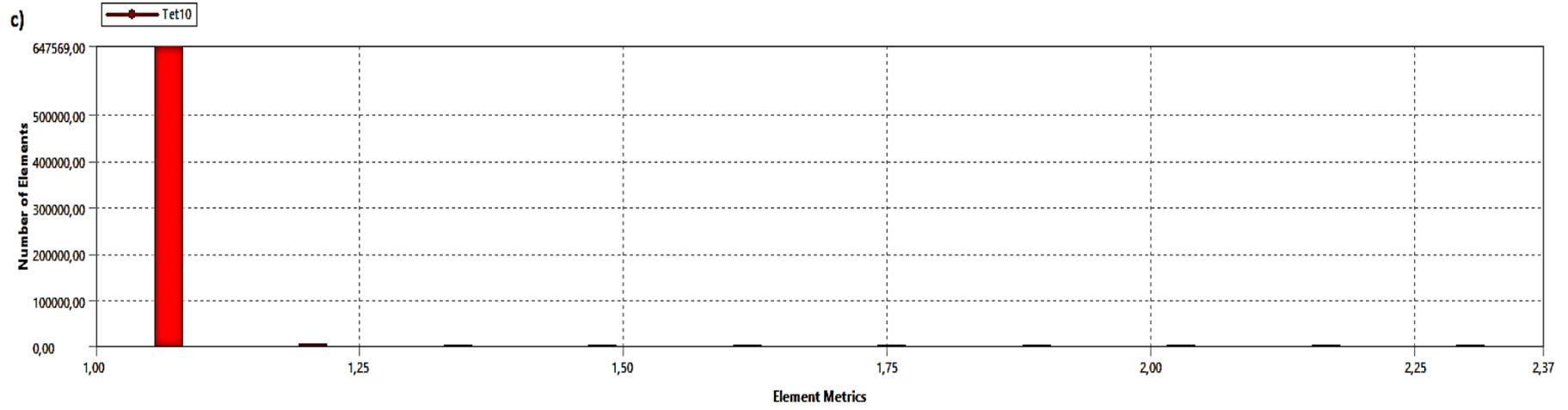
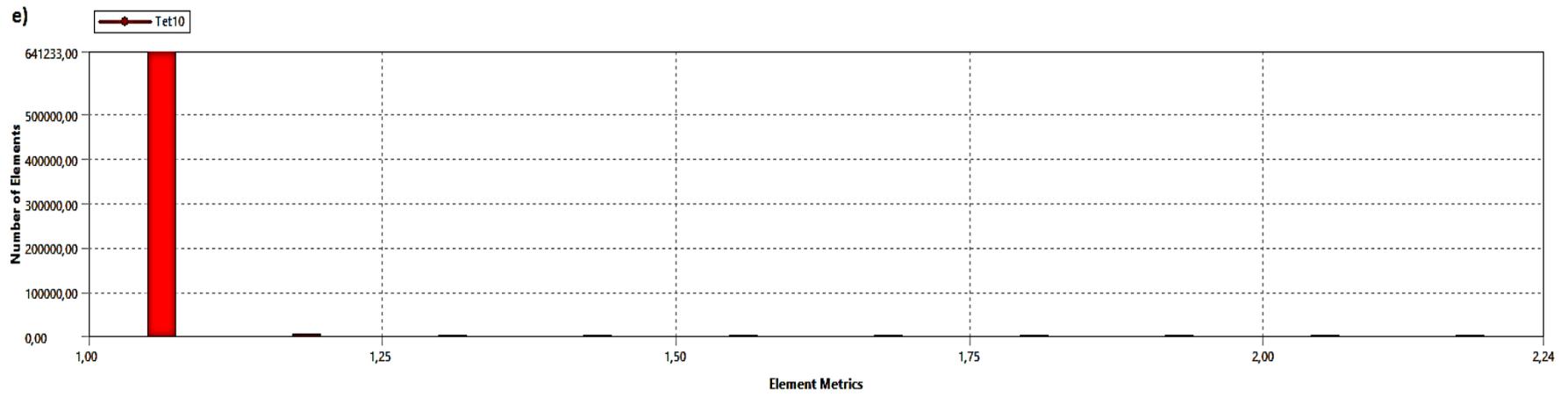


Figura A.3 – Jacobian das geometrias: a) geometria 1, b) geometria 2, c) geometria 3, d) geometria 4, e) geometria 5.







APÊNDICE B

A *User Defined-Function* (UDF) é uma função programada pelo próprio usuário e que pode ser carregada dinamicamente para o *software* Fluent para aprimorar os recursos de solução do problema em questão. Esta função é escrita em linguagem de programação C e pode usar as bibliotecas disponíveis no próprio *software*.

User Defined Function

```
#include "udf.h"
#include "mem.h"
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, cell, thread)
{
    real mu_lam;
    real K=1.16943;
    real n=0.50638;
    real gamma;
    real yield_stress=4.1000;
    real strain=C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);
    if(strain==0)
    {
        gamma=0.0283736; /*mu_lam=151.29*/
    }
    else
    {
        gamma=strain;
    }
    mu_lam=yield_stress/gamma+K*pow(gamma, (n-1));
    return mu_lam;
}
```

APÊNDICE C

Diâmetro médio (µm)	Xr
262,000	0,00035
192,101	0,00004
160,733	0,00351
134,488	0,01652
112,528	0,02924
94,154	0,04094
78,780	0,05031
65,916	0,05678
55,153	0,05961
46,147	0,05913
38,612	0,05608
32,307	0,05139
27,032	0,04636
22,618	0,04144
18,925	0,03719
15,835	0,03372
13,249	0,03095
11,086	0,02871
9,276	0,02680
7,761	0,02508
6,494	0,02347
5,433	0,02208
4,546	0,02106
3,804	0,02049
3,183	0,02037
2,663	0,02059
2,228	0,02106
1,864	0,02155
1,560	0,02177
1,305	0,02145
1,092	0,02038
0,914	0,01856
0,765	0,01608
0,640	0,01318
0,535	0,01010
0,448	0,00708
0,375	0,00438
0,314	0,00187
0,262	0,00035