



**HIDROCICLONES PARA A SEPARAÇÃO DE
ÁGUAS OLEOSAS DE MÉDIO TEOR: UM ESTUDO
COM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Rodrigo Escosteguy Medronho

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Co-orientador

Profa. Tânia Suaiden Klein, Ph.D.


Agosto de 2018

HIDROCICLONES PARA A SEPARAÇÃO DE ÁGUAS OLEOSAS DE MÉDIO TEOR: UM ESTUDO COM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

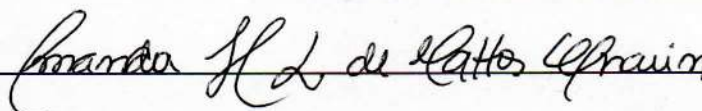
Rodrigo Escosteguy Medronho

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

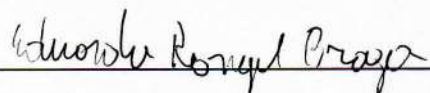
Aprovado por:



Karina Moita de Almeida, D.Sc.

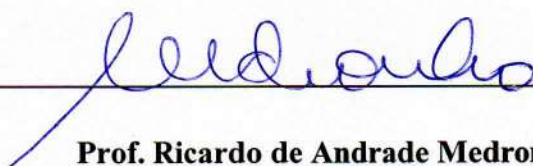


Amanda Henriques Leite de Mattos Charin, D.Sc.




Eduardo Rangel Braga, D.Sc.

Orientado por:



Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.



Profa. Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2018

Medronho, Rodrigo Escosteguy.

Hidrociclones para a Separação de Águas Oleosas de Médio Teor: um Estudo com Fluidodinâmica Computacional/ Rodrigo Escosteguy Medronho. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

XI, 47 p.; il.

Projeto de Final de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018.

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e Tânia Suaiden Klein

1. Hidrociclone. 2. Separação de águas oleosas. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho e Tânia Suaiden Klein. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Claudia e Roberto, por todo amor, apoio e carinho durante todo este trajeto da graduação.

As minhas duas irmãs, Adriana e Renata, por todo amor, apoio, amizade e memes que refrescaram, e continuam a refrescar, as nossas mentes e almas.

Aos meus orientadores, professores Ricardo e Tânia, pela oportunidade de ampliar o meu conhecimento sobre fluidodinâmica computacional durante e por toda a ajuda para tornar possível este projeto.

Ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional e todos os membros deste laboratório pelos momentos de aprendizagem e também pelos momentos de descontração. Especialmente para o João, Marcelo e Rodrigo por sempre estarem dispostos a me ajudar.

A Carol, por ser essa pessoa maravilhosa que, desde que a conheci, sempre me apoiou e me incentivou. Também por todos os DAEQ “breaks” apenas para comer algum salgado e conversar.

A Letícia, por todo o tempo que passamos juntos que foi essencial para eu conseguir acreditar neste sonho e torná-lo realidade.

Aos meus amigos do #EuVoltei, por todos os momentos clássicos deste grupo seleto que tornaram esta etapa da vida muito mais agradável.

Aos meus amigos do League of Rage, por vocês terem acolhido tão bem uma pessoa que mal conheciam e, hoje, terem ser tornados grandes amigos meus.

A todos os meus amigos e professores que estiveram no meu percurso da graduação na Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

HIDROCICLONES PARA A SEPARAÇÃO DE ÁGUAS OLEOSAS DE MÉDIO TEOR: UM ESTUDO COM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Rodrigo Escosteguy Medronho

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

Profa. Tânia Suaiden Klein, PhD

Neste trabalho, projetou-se um hidrociclone para a separação de óleo disperso em água (fração volumétrica de óleo igual a 15%) por meio das técnicas da fluidodinâmica computacional. A geometria do hidrociclone foi estipulada através do uso do planejamento composto central com dois fatores (duas variáveis geométricas, o diâmetro do *overflow* e o diâmetro do *underflow*) e o diâmetro de partícula igual a 100 μm . Com o hidrociclone projetado, foram realizadas diversas simulações variando o diâmetro de partícula para a construção da curva de eficiência granulométrica reduzida do mesmo e determinação do diâmetro de corte reduzido, que foi de 48,1 μm . A análise da eficiência total reduzida do hidrociclone foi feita para duas distribuições de tamanho de partículas diferentes e o resultado de ambas foi superior a 92%.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Hidrociclones	3
2.1.1 Distribuição de Tamanhos de Partículas	6
2.1.2 Razão de fluido (R_f).....	7
2.1.3 Eficiência Granulométrica (G)	7
2.1.4 Eficiência Granulométrica Reduzida (G').....	8
2.1.5 Eficiência Total ou Global (E_T).....	9
2.1.6 Eficiência Total Reduzida (E'_T)	10
2.2 Planejamento de Experimentos	10
2.2.1 Planejamento Composto Central	12
2.3 Fluidodinâmica Computacional	14
2.4 Turbulência	19
2.4.1 Modelos de Tensores de Reynolds	21
2.5 Escoamentos Multifásicos.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 Geração da geometria.....	24
3.2 Geração da malha.....	26
3.3 Definição das simulações	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Teste de malha.....	30

4.2	Planejamento Experimental	33
4.3	Desempenho do hidrociclone 5	35
4.4	Avaliação Fluidodinâmica	38
5.	CONCLUSÃO.....	42
6.	REFERÊNCIAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Desenho esquemático de um hidrociclone.....	5
Figura 2 - Exemplo de curva de eficiência granulométrica com $R_f = 0,30$	8
Figura 3 - Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida, com um diâmetro de corte reduzido de aproximadamente 24 μm , adaptada de Braga (2015).	9
Figura 4 - Pontos experimentais para o planejamento composto central, adaptado de Calado e Montgomery 2003.	13
Figura 5 - Métodos de solução de um problema de fenômenos de transporte. Adaptada de Maliska (2004).....	15
Figura 6 - Esquema de uma solução de um problema físico utilizando métodos numéricos. Adaptada de Maliska (2004).	15
Figura 7 - Discretização no domínio. Adaptada de Maliska (2004).	16
Figura 8 - Mesma geometria com elementos triangulares (esquerda) e elementos quadriláteros (direita).	18
Figura 9 - Exemplo de escoamento turbulento. Fonte: https://hypescience.com/turbulencia-pode-derrubar-um-aviao/ (acessado em 10/08/2018).....	19
Figura 10 – Esquema dos hidrociclones estudados.	24
Figura 11 – Geometria do hidrociclone 5.	26
Figura 12 - Vista lateral da malha do hidrociclone 5.	26
Figura 13 - Vista interna da malha do hidrociclone 5.	27
Figura 14 - Vista do corte no plano XZ entre as duas seções cônicas.....	27
Figura 15 - Alturas onde foram realizadas as análises dos perfis de velocidade tangencial do hidrociclone 5.....	30
Figura 16 – Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 1 da Figura 15.	31
Figura 17 - Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 2 da Figura 15.....	31
Figura 18 - Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 3 da Figura 15.....	32
Figura 19 - Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 4 da Figura 17.....	32
Figura 20 - Eficiência granulométrica reduzida para o hidrociclone 5.	36
Figura 21 - Linearização da eficiência granulométrica reduzida (equação 7) para o hidrociclone 5.	37
Figura 22 - Perfil de velocidade tangencial no plano central do hidrociclone.	39
Figura 23 - Perfil de pressão no plano central do hidrociclone.	39
Figura 24 - Distribuição da fração volumétrica do óleo com os seguintes diâmetros de partículas: (a) 80 μm , (b) 60 μm , (c) 40 μm e (d) 30 μm	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Constantes do modelo de Turbulência de Gibson e Launder (1978).	23
Tabela 2: Faixa de valores das variáveis estudadas.....	25
Tabela 3: Dimensões dos hidrociclones estudados.....	25
Tabela 4: Comprimento e volume dos nove hidrociclones simulados.	25
Tabela 5: Configuração das simulações no Fluent.	29
Tabela 6: Resultado das simulações para um diâmetro de partícula de 100 µm.	34
Tabela 7: Distribuição da eficiência granulométrica reduzida do hidrociclone5.	35
Tabela 8: Distribuições de partículas do modelo RRB.....	38
Tabela 9: Eficiências totais reduzidas.	38

NOMENCLATURA

y	Fração cumulativa menor que dado tamanho
d	Diâmetro da partícula de óleo
m	Parâmetro do modelo de Rosin-Rammler-Bennet
k	Parâmetro do modelo de Rosin-Rammler-Bennet
A	Comprimento da entrada do hidrociclone
B	Altura da entrada do hidrociclone
D _u	Diâmetro do <i>underflow</i>
D	Diâmetro compreendido entre as duas seções cônicas do hidrociclone
D _c	Diâmetro da seção cilíndrica
D _o	Diâmetro do tubo de <i>overflow</i>
VF	Comprimento do <i>vortexfinder</i>
L1	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone
Θ1	Ângulo da primeira seção cônica do hidrociclone
Θ2	Ângulo da segunda seção cônica do hidrociclone
R _f	Razão de fluido
W _{ao}	Vazão mássica de água no <i>overflow</i>
W _{af}	Vazão mássica de água na alimentação
G	Eficiência granulométrica
G'	Eficiência granulométrica reduzida
W _{od}	Vazão mássica no <i>overflow</i> de uma dada partícula de óleo de diâmetro d
W _{fd}	Vazão mássica na alimentação de uma da partícula óleo de diâmetro d
d' ₅₀	Diâmetro de corte reduzido

n	Parâmetro do modelo de eficiência granulométrica reduzida
E_T	Eficiência total
E'_T	Eficiência total reduzida
W_o	Vazão mássica de óleo no <i>overflow</i>
W_f	Vazão mássica de óleo na alimentação
ν_t	Viscosidade cinética turbulenta
ρ	Densidade do líquido
μ	Viscosidade absoluta do líquido
τ	Tensor tensão
δ_{ij}	Delta de Kronecker
k	Energia cinética turbulenta
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
\bar{u}	Média temporal do componente u do vetor velocidade
\bar{v}	Média temporal do componente v do vetor velocidade
\bar{w}	Média temporal do componente w do vetor velocidade
u'	Flutuação do componente u do vetor velocidade
v'	Flutuação do componente v do vetor velocidade
w'	Flutuação do componente w do vetor velocidade
p	Pressão

1. INTRODUÇÃO

Devido ao fato da água ser um recurso cada vez mais escasso e indispensável, a poluição das águas é um assunto de preocupação a nível mundial. Dentro deste contexto, o estudo de novas tecnologias, ou aprimoramento das já existentes, para o tratamento de resíduos e/ou para o reaproveitamento da água são de suma importância.

As águas oleosas provenientes de refinaria apresentam um grande poder poluidor. Na avaliação dos impactos causados pelo descarte desta água em um ecossistema aquático, são considerações críticas: a composição da água oleosa, o volume descartado e a capacidade do corpo d'água receptor (SANTANA, 2007).

Uma técnica utilizada para promover a separação água-óleo é a decantação. A decantação é um processo físico para a separação de misturas heterogêneas podendo ser utilizado em misturas sólido-líquido, por exemplo, uma mistura entre areia e água, e líquido-líquido, que é o caso de uma mistura de óleo e água.

O sedimentador é considerado um equipamento econômico e simples (OLTEANU, 1990). Seu processo é baseado na diferença de densidades entre as fases e, esta separação, se dá através da força gravitacional atuando na mistura, gerando a chamada velocidade terminal das partículas. Por se tratar de um processo simples e puramente físico, estes sedimentadores são utilizados nas plataformas *offshore* e nas refinarias.

Este processo, porém, apresenta desvantagens, como a necessidade de grandes equipamentos para uma separação eficiente, por conta de elevados tempos de residência requeridos, o que significa um uso de grande área física de terreno (*floorspace*), sendo que a minimização da área requerida por equipamentos é muito importante quando se trata, por exemplo, de plataformas *offshore*.

No Brasil, o descarte de água proveniente do processo ou da produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural deve obedecer a uma concentração média mensal limite de óleos e graxas de 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L (CONAMA, 2007). Por isso, é de grande interesse da indústria do petróleo o estudo e/ou aprimoramento de técnicas ou equipamentos que possam promover a

separação água-óleo de maneira mais eficiente. Um equipamento que pode ser empregado neste tipo de separação é o hidrociclone.

Hidrociclones são equipamentos que promovem a separação entre as fases através de um campo centrífugo. Esses equipamentos produzem elevadas eficiências de separação com pequenos tempos de residência e ocupam uma pequena área de terreno, diferentemente dos decantadores. Ainda existe a possibilidade de ser utilizada uma bateria em paralelo e/ou em série de hidrociclones com a finalidade de aumentar a capacidade e/ou a eficiência do processo.

De uma maneira simplificada, o hidrociclone separa a fase dispersa da fase contínua com base na diferença de densidades entre as fases (da mesma forma que o decantador). Porém, o campo centrífugo que atua sobre as partículas presentes no hidrociclone é milhares de vezes mais intenso que a gravidade.

Além de poderem produzir elevadas eficiências com pequenos tempos de residência e um tamanho reduzido em relação a outros separadores. Os hidrociclones apresentam baixo custo de fabricação, facilidade de sua instalação, pouca manutenção requerida, total ausência de partes móveis e simplicidade de operação (SVAROVSKY,2001).

1.1 Motivação

Este trabalho está inserido em um projeto maior que busca uma alternativa para os grandes separadores gravitacionais usados nas plataformas *offshore* de produção de petróleo através do uso de hidrociclones. O uso destes hidrociclones permitiria uma redução da área ocupada nas plataformas, com o conseqüente barateamento destas, alta eficiência de separação e baixo custo de operação.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é desenvolver um hidrociclone capaz de promover elevadas eficiências na separação de águas oleosas com médias concentrações de óleo (fração volumétrica de óleo igual a 15%) através do uso da fluidodinâmica computacional. Tal hidrociclone será desenvolvido através da otimização do diâmetro do *overflow* e do diâmetro do *underflow* utilizando o planejamento composto central com dois parâmetros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Hidrociclones

A primeira patente referente a um hidrociclone data de 1891. Mas, só depois da Segunda Guerra Mundial é que vieram a ter aplicação na indústria, inicialmente no processamento mineral e depois na indústria química, do petróleo, para geração de energia, metalúrgica, têxtil etc.(SVAROVSKY, 1984).

Somente nas últimas décadas o uso de hidrociclones para a separação líquido-líquido tem tido aplicação industrial. Sendo a sua principal aplicação a utilização na indústria do petróleo.

Os equipamentos tradicionais de tratamento de águas oleosas como os decantadores e flutadores convencionais, têm como base a ação da gravidade, e são grandes e pesados, com custos de investimento e operacionais elevados.

A aplicação de hidrociclones para águas oleosas foi iniciada no final da década de setentado século passado, na Inglaterra, pela equipe liderada pelo Prof. Martin Thew, na Universidade de Southampton. O desenvolvimento deste hidrociclone teve como motivação um acidente com um petroleiro que provocou um grande vazamento de óleo nas costas da Cornuália. Por causa deste acidente, o governo britânico incentivou o desenvolvimento de pesquisas com vistas a um aparelho que possibilitasse a coleta da água contaminada e sua rápida limpeza, aparelho esse que deveria ser de fácil transporte e manuseio (Colman e Thew, 1980).

A partir do final da década de noventa do século passado, um novo conceito foi ganhando popularidade, o conceito de DOWS (*Downhole Oil Water Separation*), e o hidrociclone é um candidato ideal para tal aplicação (Delfos, et al. 2004). A ideia por trás do DOWS é a de separar o óleo da água ainda no leito marinho e reinjetá-la no poço. Esta técnica diminui os gastos com o transporte desnecessário de água do poço até a plataforma e da plataforma de volta ao poço, se a opção de descarte é a reinjeção.

Com o avanço dos estudos sobre hidrociclones, novas utilizações foram surgindo, uma delas é o seu uso para separar organismos presentes na água. Segundo Oliveira e Medronho (2004), um navio petroleiro bombeia água do mar para seus tanques de lastro

enquanto descarrega a sua carga com a finalidade de compensar a instabilidade estrutural gerada pela falta de carga podendo controlar seu calado para estabilizar o navio durante a navegação sem carga. Por conseguinte, organismos presentes na água são transferidos de seu habitat natural para um novo, podendo causar graves desequilíbrios ecológicos. Para minimizar esses danos ecológicos, estes autores estudaram a aplicação de hidrociclones para separar os organismos e demais sólidos suspensos na água de lastro.

Existem hidrociclones desenvolvidos com a função de separar células animais, o hidrociclone patenteado por Deckwer (Deckwer et al. 2005) é um exemplo destes hidrociclones e pode ser empregado, por exemplo, na retenção de células CHO (*chinese hamster ovary*) no biorreator, com objetivo de maximizar a produção de importantes biofármacos (Pinto, Medronho e Castilho, 2008).

Normalmente, os hidrociclones são equipamentos constituídos de uma parte cilíndrica e uma parte cônica. Esta parte cônica pode ser dividida em uma ou mais partes com diferentes ângulos. A alimentação do hidrociclone pode ser composta por um ou dois tubos, circulares ou retangulares, que devem ser normais ao eixo do equipamento, e posicionadas tangencialmente à parede lateral do cilindro. Por não possuírem partes móveis, seu funcionamento é mais simples que as centrífugas e demandam menores custos de investimento, operação e manutenção, porém, operam com campos centrífugos de menor intensidade. (SVAROVSKY, 2001).

O hidrociclone possui duas saídas chamadas de *overflow* e *underflow*. A primeira encontra-se próxima à seção de alimentação, no topo do equipamento, enquanto a segunda encontra-se na parte inferior do equipamento, no final da parte cônica. O tubo no topo do hidrociclone possui uma extensão para dentro do hidrociclone e é chamado de *vortex finder*. A Figura 1 mostra um desenho esquemático de um hidrociclone.

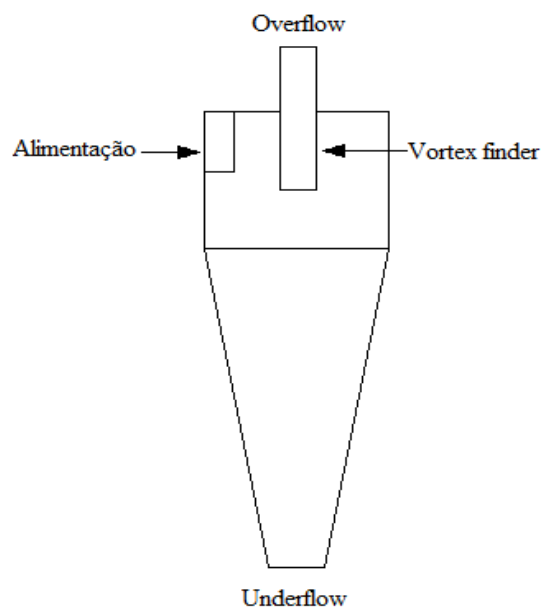


Figura 1- Desenho esquemático de um hidrociclone.

A separação da fase dispersa nos separadores ciclônicos é realizada pela ação do campo centrífugo que se estabelece no interior do equipamento devido às condições impostas à corrente de fluido que escoar em seu interior (SVAROVSKY, 2001).

A gravidade não afeta de uma maneira significativa a separação porque o campo centrífugo gerado dentro de um hidrociclone é muito maior que o campo gravitacional. Com isso, o equipamento não precisa ser operado na vertical podendo operar inclinado ou até mesmo invertido se necessário (SVAROVSKY, 1984).

A suspensão escoar no interior do equipamento, gerando um escoamento tridimensional turbulento. Devido à força do campo centrífugo, a substância que possui maior densidade tende a se mover em direção à parede do equipamento, também tendendo a sair pelo *underflow*. A substância menos densa tende a se concentrar no entorno do eixo central do equipamento, onde o gradiente de pressão reverso provoca a saída deste fluido através do *overflow* (Grady, et al. 2003).

As principais desvantagens na utilização do hidrociclone para separação líquido-líquido são a impossibilidade de realizar-se uma separação completa das fases, a eficiência de separação é altamente dependente da diferença entre as densidades

(geralmente, esta diferença é menor entre misturas líquido/líquido comparada com a diferença entre sistemas sólido/líquido) e, devido à existência de cisalhamento, gotas presentes na mistura podem se quebrar a partir de certo valor da taxa de cisalhamento, portanto, há uma vazão ótima para eficiência de separação máxima. Tal fenômeno, não afeta muito as partículas sólidas na separação sólido/líquido (SVAROVSKY, 2001).

Para ser realizada uma análise de desempenho do hidrociclone, é necessário saber a distribuição de tamanhos de partículas nas entradas e saídas do equipamento, razão de fluido, eficiência granulométrica, eficiência granulométrica reduzida, eficiência total de separação e eficiência total reduzida.

2.1.1 Distribuição de Tamanhos de Partículas

Conhecer a distribuição de tamanhos de partículas da amostra é essencial, pois o tamanho delas influencia diretamente na eficiência da separação. Existem diversos modelos capazes de descrever a distribuição de diâmetros das partículas em uma amostra. Todos os modelos possuem seus parâmetros distintos, mas a forma de obter os valores destes parâmetros é similar. A partir da equação principal, faz-se um ajuste dos parâmetros, podendo, dependendo do caso, ser uma linearização e, assim, são obtidos os valores dos parâmetros. Um exemplo é o modelo de Rosin-Rammler-Bennett (RRB), Equação 1, que, além de ser de fácil linearização, mostra resultados satisfatórios para mistura de óleo disperso em água, como é observado em dois outros estudos (ARAÚJO, 2015; BRAGA, 2015).

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{k} \right)^m \right] \quad (1)$$

Em que,

y = fração cumulativa menor que dado tamanho;

d = diâmetro da partícula;

m = parâmetro do modelo;

k = parâmetro do modelo.

A Equação 1 linearizada é mostrada a seguir:

$$\ln(-\ln(1 - y)) = m \ln d - m \ln k \quad (2)$$

2.1.2 Razão de fluido (R_f)

A razão de fluido R_f indica a fração da fase contínua que está saindo pelo concentrado. Ela é calculada pela Equação 3, a partir da razão entre as vazões mássicas da fase contínua presentes na saída do concentrado e na alimentação. No caso deste trabalho, a fase contínua é a água e o concentrado é o que sai pelo *overflow*.

$$R_f = \frac{W_{ao}}{W_{af}} \quad (3)$$

Em que,

W_{ao} = vazão mássica de água no *overflow*;

W_{af} = vazão mássica de água na alimentação.

2.1.3 Eficiência Granulométrica (G)

A eficiência granulométrica G indica a fração de partículas de um determinado tamanho que saiu pelo concentrado. Ela é calculada pela Equação 4, usando a razão entre as vazões mássicas de partículas de um dado diâmetro no concentrado e na alimentação. No presente trabalho, as partículas em questão são as partículas de óleo, que formam a fase dispersa.

$$G = \frac{W_{od}}{W_{fd}} \quad (4)$$

Em que,

W_{od} = vazão mássica no *overflow* de uma dada partícula de óleo de diâmetro d ;

W_{fd} = vazão mássica na alimentação de uma da partícula óleo de diâmetro d .

Através do cálculo da eficiência granulométrica de diversos tamanhos de partículas, pode-se montar a curva de eficiência granulométrica conforme exemplificado na Figura 2.

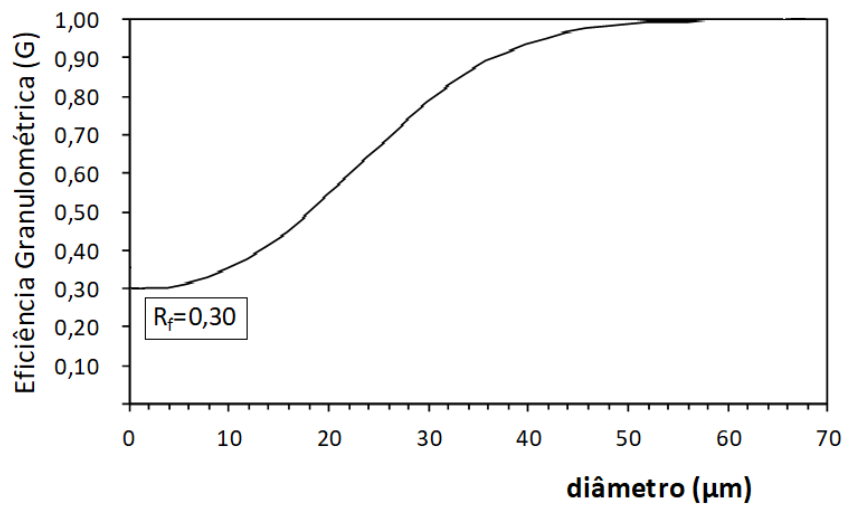


Figura 2 - Exemplo de curva de eficiência granulométrica com $R_f = 0,30$.

2.1.4 Eficiência Granulométrica Reduzida (G')

A eficiência granulométrica reduzida G' considera apenas a quantidade de óleo que sai do equipamento pelo efeito da separação centrífuga. Isso se deve ao fato de que, devido ao efeito de divisão de correntes, qualquer tamanho de partícula sempre apresentará, no mínimo, uma eficiência G igual à R_f , mesmo que o hidrociclone não esteja de fato separando. A eficiência granulométrica reduzida é calculada descontando a razão de fluido da eficiência granulométrica, como mostra a Equação 5:

$$G' = \frac{G - R_f}{1 - R_f} \quad (5)$$

Plitt (1971) propôs a Equação 6 como forma de descrever o comportamento de G' em função do diâmetro da partícula.

$$G' = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{d}{d'_{50}} \right)^n \right] \quad (6)$$

Em que,

d'_{50} = diâmetro de corte reduzido;

n = parâmetro do modelo.

Para resolver a Equação 6, é necessário conhecer o diâmetro de corte reduzido (diâmetro que apresenta uma eficiência granulométrica reduzida igual a 50%) e o parâmetro n . O diâmetro de corte reduzido pode ser obtido através da curva de eficiência granulométrica reduzida, como indicado na Figura 3.

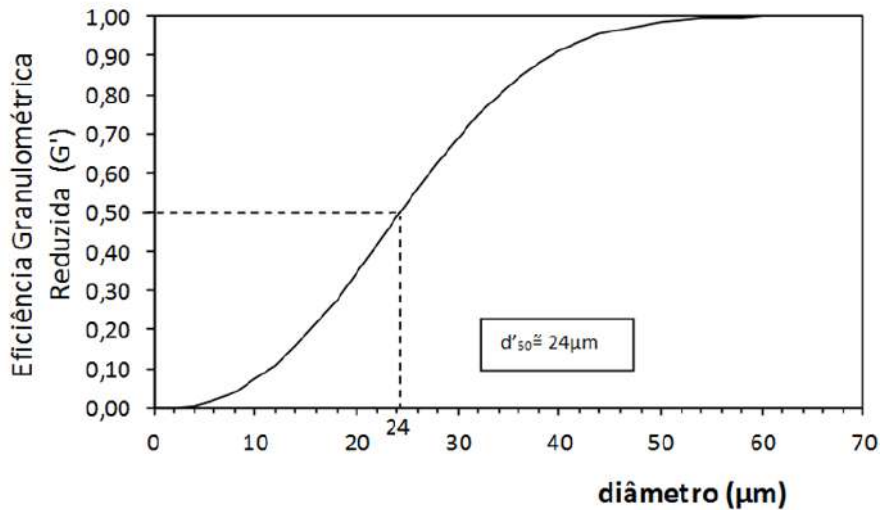


Figura 3 - Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida, com um diâmetro de corte reduzido de aproximadamente 24 μm , adaptada de Braga (2015).

Já o parâmetro n é obtido através da linearização da Equação 6:

$$\ln(-\ln(1 - G')) = \ln(0,693) + n \cdot \ln\left(\frac{d}{d'_{50}}\right) \quad (7)$$

2.1.5 Eficiência Total ou Global (E_T)

A eficiência total E_T indica a fração mássica da fase dispersa que sai pelo concentrado, levando em consideração todos os diâmetros da distribuição de tamanhos da alimentação e do concentrado. É calculada pela Equação 8, através da razão entre as vazões mássicas da fase dispersa no concentrado e na alimentação.

$$E_T = \frac{W_o}{W_f} \quad (8)$$

Em que,

W_o = vazão mássica de óleo no *overflow*;

W_f = vazão mássica de óleo na alimentação.

2.1.6 Eficiência Total Reduzida (E'_T)

Existem duas formas distintas para se calcular a eficiência total reduzida E'_T . Quando a eficiência total já é conhecida, o cálculo se dá de uma forma análoga ao cálculo da eficiência granulométrica reduzida:

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (9)$$

A segunda forma é utilizada quando se projeta um hidrociclone, ou seja, quando a eficiência total ainda não é conhecida, mas dispõe-se da curva de eficiência granulométrica reduzida. Conhecendo-se o diâmetro de corte reduzido, E'_T pode ser estimada através da Equação 10. Caso a equação para eficiência granulométrica reduzida utilizada seja a de Plitt (1971), a eficiência é calculada através da Equação 11.

$$E'_T = \int_0^1 G' dy \quad (10)$$

$$E'_T = \int_0^1 \left\{ 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{k (-\ln(1-y))^{\frac{1}{m}}}{d'_{50}} \right)^n \right] \right\} dy \quad (11)$$

2.2 Planejamento de Experimentos

Após a definição das variáveis que serão estudadas em um trabalho experimental, o uso do planejamento de experimentos busca minimizar o número de experimentos necessários para a realização do trabalho, mantendo uma boa descrição do comportamento das variáveis estudadas. Através do planejamento de experimentos, é possível reduzir o custo total do trabalho, tanto financeiro quanto temporal, sem que os resultados finais sejam comprometidos.

Quando se trata de experimentos rápidos, de baixo custo e com um número pequeno de variáveis, é possível realizar-se todas as possibilidades de experimentos. Porém, a maioria dos experimentos apresenta um custo elevado, seja financeiro e/ou de tempo, que inviabiliza a realização de todas as possibilidades. Logo, realizar um número menor de experimentos, mas que sejam capazes de descrever bem o comportamento das variáveis envolvidas é extremamente importante para que seja viável o estudo. Portanto, se faz necessário o uso do planejamento de experimentos.

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura. Em um dado experimento, a propriedade de interesse é chamada de resposta e as variáveis, que em princípio, influenciam a resposta são os fatores, e a função que descreve essa influência é chamada de superfície de resposta. Em qualquer área de pesquisa, o objetivo é saber não apenas quais variáveis são importantes, como também seus limites inferior e superior, ou seja, os níveis de valores dessas variáveis. Cientificamente, essas instruções são frequentemente expressas através de métodos matemáticos que procuram maximizar ou minimizar alguma propriedade específica do sistema em estudo (Calado e Montgomery, 2003).

Antes da realização dos experimentos, um plano estratégico para coordenar as atividades do procedimento dos experimentos que serão realizados deve ser definido, deixando claro cada passo do processo experimental, estes passos são (Galdámez, 2002):

- Definição dos objetivos do experimento
- Estudo dos parâmetros do experimento
- Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta
- Seleção da matriz experimental
- Realização do experimento
- Análise de dados
- Interpretação dos resultados
- Elaboração de relatórios.

Os três princípios básicos de um planejamento de experimentos são replicação, aleatoriedade e blocagem. Através da replicação, é possível obter-se o erro experimental e, também, permite uma estimativa mais precisa caso uma média dos valores esteja sendo usada. A aleatoriedade permite uma análise imparcial de todos os fatores não considerados. A blocagem tem como objetivo aumentar a precisão do experimento através da divisão de experimentos não homogêneos em blocos, um exemplo é a divisão das medidas feitas por duas pessoas diferentes em dois blocos separados já que elas podem apresentar diferenças relacionadas ao erro de cada pessoa diferente (Calado e Montgomery, 2003).

Existem diferentes tipos de planejamentos de experimento, como o planejamento fatorial, planejamento fatorial fracionário e o planejamento composto central. O planejamento utilizado neste trabalho foi o planejamento composto central.

2.2.1 Planejamento Composto Central

A análise da superfície de resposta é importante para o planejamento de experimentos, pois ela permite realizar a otimização das variáveis estudadas. A superfície pode ser obtida por um modelo de primeira ordem (Equação 12) ou de segunda ordem (Equação 13). O modelo de primeira ordem descreve bem os sistemas que não apresentam uma curvatura.

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \quad (12)$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_jx_j + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij}x_ix_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj}x_j^2 + \varepsilon \quad (13)$$

Em que,

Y = resposta ou variável independente;

β = parâmetros da equação;

x = fator;

ε = erro.

O planejamento composto central é utilizado quando se deseja verificar a curvatura de uma superfície, ou seja, quando se deseja verificar se há termos quadráticos no modelo de regressão (Calado e Montgomery, 2003).

Esse tipo de planejamento consiste em N experimentos, sendo 2^k corridas referentes ao planejamento fatorial, $2k$ corridas axiais e n_c corridas centrais. A variável k se refere ao número de fatores. A Figura 4 mostra os pontos do planejamento composto central com dois fatores.

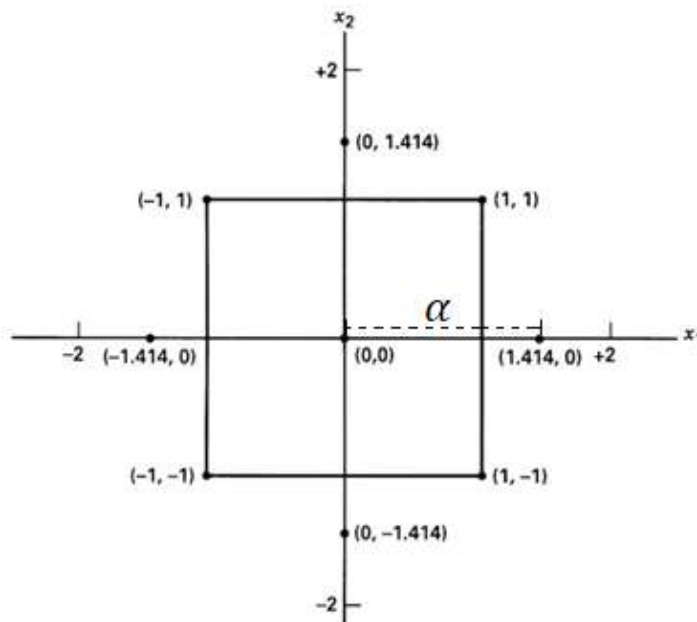


Figura 4 - Pontos experimentais para o planejamento composto central, adaptado de Calado e Montgomery 2003.

No planejamento composto central, existem dois parâmetros que devem ser especificados: a rotabilidade α que representa a distância a partir do centro do planejamento até os pontos axiais e o número de pontos centrais n_c .

A rotabilidade é importante para o modelo de segunda ordem fornecer previsões que tenham uma variância razoavelmente consistente e estável nos pontos de interesse. Uma superfície de resposta de segunda ordem deve ser rotacionável. Portanto, a variância do valor previsto para a resposta é a mesma em todos os pontos das variáveis independentes que estejam à mesma distância do centro do planejamento (Calado e Montgomery, 2003).

Quando a região de interesse é uma esfera, o planejamento tem de incluir pontos centrais a fim de prover variância razoavelmente estável da resposta prevista e a melhor escolha para a rotabilidade é dada pela Equação 14. Geralmente, recomenda-se usar de três a cinco pontos centrais (Calado e Montgomery, 2003).

$$\alpha = (k)^{1/2} \tag{14}$$

Em que,

α = rotabilidade

k = número de fatores

2.3 Fluidodinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional é uma área de estudos de grande importância na engenharia. Através dela é possível obter-se soluções numéricas, por métodos computacionais, das equações de conservação do momento e da massa (equações do movimento e da continuidade, respectivamente), permitindo a simulação de diversos escoamentos de fluidos.

O desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de fluidodinâmica computacional trazem enormes vantagens para realização de experimentos e pesquisas laboratoriais. A grande vantagem da experimentação em laboratório é que ela trata com a configuração real do problema trazendo os resultados reais. Porém, muitas vezes ela traz altos custos ou é de difícil reprodução devido a fatores de segurança (um exemplo é a transferência de calor em reatores nucleares) ou devido a severas condições (um exemplo é o escoamento supersônico em grandes altitudes) (MALISKA, 2004).

O uso da fluidodinâmica computacional visa amenizar os problemas citados, já que o uso de técnicas numéricas possui menores restrições do que as reproduções experimentais. Todavia, os dados obtidos devem ser analisados para definir se são confiáveis ou não.

Existem dois tipos de validações das soluções numéricas que são de extrema importância para aumentar a credibilidade dos resultados numéricos quando comparados aos resultados reais. São elas: a verificação numérica e a validação física.

A verificação numérica visa detectar os erros numéricos presentes na resolução do método numérico utilizado a fim de aumentar a precisão da solução e sua convergência, esta validação pode ser feita através da comparação com resultados de outras soluções, sejam analíticas ou numéricas. A validação física visa determinar as equações diferenciais mais adequadas para representar o fenômeno estudado, ou seja, usar um modelo matemático fiel com a física do problema (MALISKA, 2004).

A Figura 5 mostra os dois tipos de validações: a comparação dos resultados numéricos (RN) com os resultados analíticos (RA) e também a comparação entre os resultados numéricos com os resultados experimentais (RE).

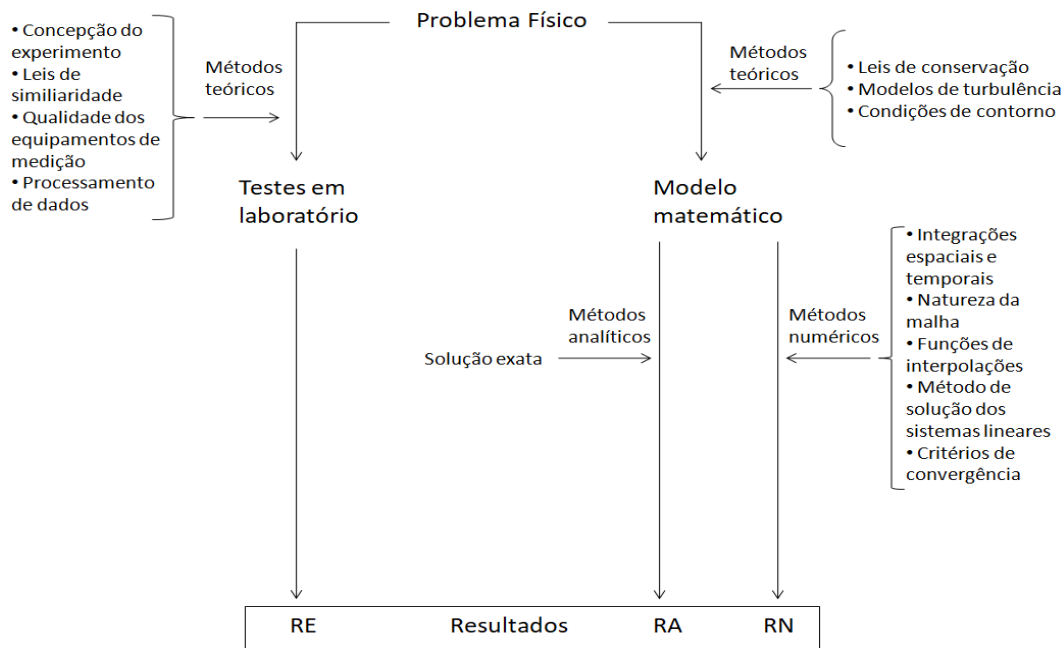


Figura 5 - Métodos de solução de um problema de fenômenos de transporte. Adaptada de Maliska (2004)

As etapas da solução numérica de um problema físico estão apresentadas na Figura 6. Define-se a modelagem matemática a ser usada, gerando as equações governantes, depois, discretizam-se estas equações transformando-as em um sistema de equações algébricas. Finalmente, resolvem-se estas equações em alguns pontos do domínio. Com isso, uma solução aproximada é obtida, a qual deve ser analisada e interpretada para definir se a modelagem se adequa bem ao problema ou se é necessário um ajuste.

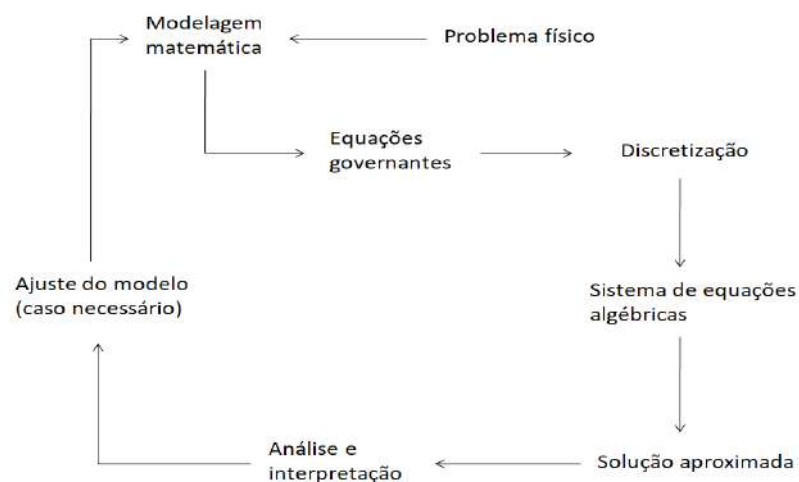


Figura 6 - Esquema de uma solução de um problema físico utilizando métodos numéricos. Adaptada de Maliska (2004).

A diferença entre uma solução analítica e uma solução numérica é que, a primeira, fornece os resultados de todo o domínio da modelagem. Já a segunda, fornece apenas os resultados de determinados pontos do domínio, os demais resultados são calculados através de uma interpolação dos valores dos pontos e isto pode ocasionar grandes erros nos demais resultados. A Figura 7 mostra esta diferença.

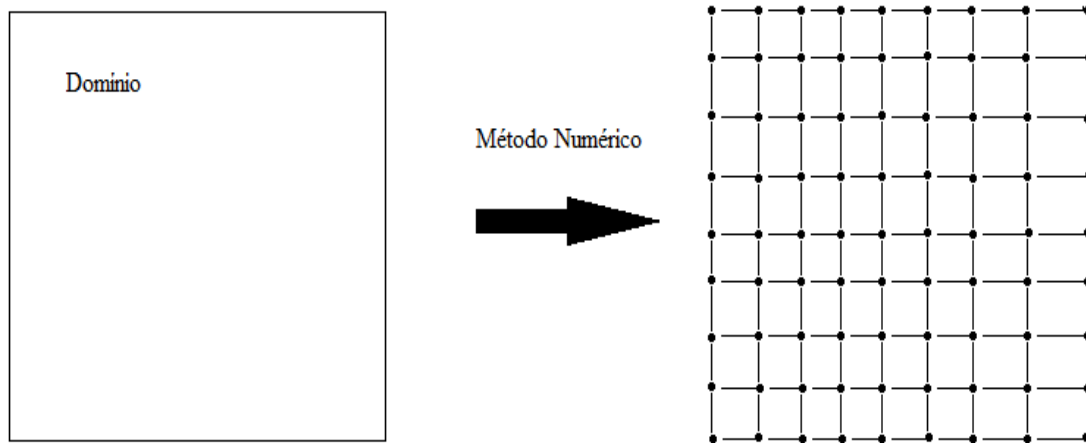


Figura 7 - Discretização no domínio. Adaptada de Maliska (2004).

Através de fluidodinâmica computacional, é possível obter-se soluções numéricas das equações de conservação do momento e da massa. Dependendo do problema em análise, estas equações podem estar eventualmente acopladas a outras equações de conservação, tais como as equações da energia e de concentração de dada espécie química (BRAGA, 2015).

Através destas soluções numéricas, é possível simular até mesmo escoamentos que não podem ser reproduzidos experimentalmente ou que são difíceis de medir, tais como: escoamento no interior de ciclones e hidrociclones, vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis, explosões, combustão e escoamentos em reservatórios de petróleo e em *risers*.

Existem diversos pacotes computacionais de fluidodinâmica computacional, como *OpenFoam*, *Comsol* e *Ansys*. Cada um possui suas próprias características com vantagens e desvantagens dependendo do tipo do problema a ser resolvido e como se deseja resolvê-lo. O *Ansys* foi utilizado neste trabalho.

Para a realização de uma simulação, é necessário seguir algumas etapas, independente de qual pacote computacional seja utilizado. Estas etapas são:

- Geração da geometria;
- Geração da malha;
- Definição da simulação (modelagem física, condições iniciais e de contorno, parâmetros de convergência, etc.);
- Solução das equações definidas no problema;
- Análise dos resultados.

A geometria do problema engloba todo o domínio onde serão efetuados os cálculos.

Gerar a malha significa dividir o domínio em partes menores, onde serão efetuados os cálculos da solução numérica. A geração da malha é uma etapa de extrema importância para se obter resultados condizentes com a realidade em um tempo razoável para a simulação. Isto se dá porque, mesmo se a geometria e as definições da simulação estiverem adequadas, uma malha grosseira pode gerar resultados pouco precisos e, uma malha muito refinada eleva muito o custo computacional podendo até inviabilizar a simulação (seja por causa do tempo disponível para o projeto ou por não possuir máquinas capazes de realizar tantas contas). Portanto, durante a geração da malha é importante a realização do chamado teste de malha, este teste visa encontrar uma malha boa o suficiente para representar bem o fenômeno estudado, mas que possua o menor custo computacional possível.

Normalmente, quando se tem uma geometria bidimensional, a malha é gerada utilizando elementos triangulares ou quadriláteros (Figura 8) e, quando se tem uma geometria tridimensional, são utilizados elementos tetraédricos ou hexaédricos.

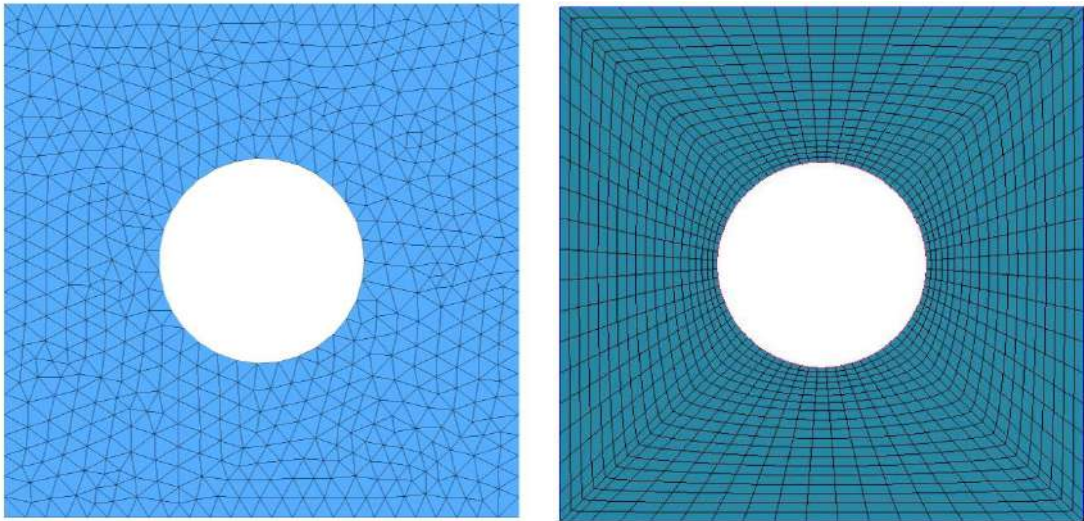


Figura 8 - Mesma geometria com elementos triangulares (esquerda) e elementos quadriláteros (direita).

A malha pode ser definida como estruturada ou não estruturada. Para a malha ser estruturada, a numeração dos elementos deve seguir uma estrutura fixa de forma que o número de cada elemento seja consecutivo ao seu vizinho. Dessa forma, todos os vizinhos de cada elemento são conhecidos e obtidos de uma forma bem simples (MALISKA, 2004).

Já, numa malha não estruturada, a numeração dos elementos é diferente, então, não tem como prever qual elemento é o vizinho. Portanto, é necessário ter na memória, matrizes ou vetores para indicar a posição de cada elemento na malha (MALISKA, 2004).

A principal vantagem da malha estruturada é uma maior facilidade para a realização dos cálculos das equações de balanços, uma vez que não é necessário o uso de matrizes ou vetores para indicar a posição dos elementos, o que diminui o número de acessos e a quantidade de memória necessária para a simulação (Aguirre e Damian, 2008 *apud* Braga, 2015). Porém, o uso deste tipo de malha só é possível para geometrias relativamente simples.

Embora seja necessário o uso de matrizes ou vetores para a indicação da posição dos elementos de uma malha não estruturada, o que dificulta o cálculo das equações de balanços, a maior vantagem do uso desse tipo de malha é que ela se adequa bem praticamente a qualquer tipo de geometria, mesmo as mais complicadas.

Após a construção da malha, ainda é necessário definir as condições iniciais e de contorno do problema, as propriedades físicas e químicas dos materiais envolvidos, definir a modelagem do sistema, escolher modelos de turbulência, ou seja, definir a simulação do problema.

2.4 Turbulência

Diferentemente de um escoamento laminar, que se pode dizer que é um escoamento ordenado, o escoamento turbulento é caótico. Os elementos do fluido se misturam de forma não linear em três dimensões formando diversos vórtices, o que eleva a dificuldade do estudo deste tipo de escoamento. O escoamento turbulento é um processo intrinsecamente transiente (Bird, Stewart e Lightfoot, 2004). A Figura 9 mostra um exemplo de escoamento turbulento.



Figura 9 - Exemplo de escoamento turbulento. Fonte: <https://hypescience.com/turbulencia-pode-derrubar-um-aviao/> (acessado em 10/08/2018)

Por mais que a utilização correta das equações de conservação seja capaz de descrever qualquer tipo de escoamento, as flutuações de velocidade, pressão e densidade de um escoamento turbulento exigem malhas extremamente refinadas, o que torna inviável a solução destas equações devido ao esforço computacional necessário ser extremamente elevado.

Para resolver este problema, é comum a utilização da abordagem RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que consiste em decompor as variáveis em uma componente média e uma flutuante e aplicar a média temporal. Com isso, surge o conhecido problema do fechamento da turbulência (WILCOX, 1998), uma vez que a equação da continuidade (Equação 15) mais as três equações de Reynolds (Equações 16, 17 e 18) somam quatro equações com dez incógnitas (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w} , \bar{p} , $\overline{u'^2}$, $\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$, $\overline{v'^2}$, $\overline{v'w'}$ e $\overline{w'^2}$), tornando o problema indeterminado.

As equações médias da continuidade para as três componentes de velocidade nas coordenadas cartesianas são mostradas abaixo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } \bar{u}) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v} \bar{v}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } \bar{v}) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{w} \bar{w}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } \bar{w}) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] \quad (18)$$

Em que \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} são as médias temporais das componentes do vetor velocidade; u' , v' , w' são as flutuações das componentes do vetor velocidade e p é a média temporal da pressão.

Boussinesq (1877) propôs modelar os tensores de Reynolds (τ_{ij}) de forma análoga a lei da viscosidade de Newton (Equação 19), estabelecendo o conceito de viscosidade turbulenta ν_t . De acordo com essa proposta, o tensor de Reynolds seria calculado pela Equação 20, onde δ_{ij} é o delta de Kronecker. A Equação 21 mostra a definição da energia cinética turbulenta por unidade de massa k usada na Equação 20.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (19)$$

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (210)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'u'}) = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (21)$$

Devido ao fato da viscosidade turbulenta ser uma propriedade do escoamento e não do fluido, a sua avaliação se torna difícil, gerando uma forte não linearidade na solução das equações (WILCOX, 1998).

Para se calcular a viscosidade turbulenta, precisa-se de duas grandezas turbulentas: uma escala de velocidade e uma de comprimento ou uma de velocidade e um tempo, por exemplo. Essas grandezas podem ser calculadas de forma algébrica ou por equações de transporte adicionais. Quando se utiliza apenas uma equação diferencial parcial de transporte adicional, diz-se que se está utilizando um modelo de turbulência de uma equação, quando se usam duas, diz-se que se está utilizando um modelo de duas equações. O modelo $k-\varepsilon$ é um dos modelos de duas equações mais utilizados.

Mesmo que os modelos de turbulência baseados no conceito de viscosidade turbulenta consigam obter sucesso na solução de diversos tipos de escoamentos, ainda existem algumas limitações como, por exemplo, no caso de escoamentos com linhas de corrente curva (WILCOX, 1998).

Uma forma de contornar as limitações dos modelos baseados no conceito de viscosidade turbulenta é deduzir equações de transporte diretamente para cada componente do tensor de Reynolds. Estes modelos são chamados de modelos de tensores de Reynolds.

2.4.1 Modelos de Tensores de Reynolds

Este tipo de modelo é muito mais geral que os modelos baseados no conceito da viscosidade turbulenta, pois se resolve uma equação de transporte para cada componente do tensor de Reynolds. Porém, isso implica no cálculo de sete equações de transporte adicionais (seis para os componentes do tensor de Reynolds e outra para uma quantidade turbulenta associada à escala de comprimento da turbulência, como taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε). Assim, o esforço computacional para a resolução é maior, quando comparado com o custo associado aos modelos de turbulência de uma ou duas equações.

Como o escoamento dentro de um hidrociclone é bastante complexo, essa é a classe de modelos indicada para o mesmo. Neste trabalho, utilizou-se o modelo dos tensores

de Reynolds de Gibson e Launder (1978) (*Ansys Fluent* 18.0), disponível no programa utilizado, o *Fluent*.

A equação geral para o tensor de Reynolds do modelo de Gibson e Launder(1978) está apresentada na equação 22, em que P_{ij} é a taxa de produção dos tensores de Reynolds e está definido na equação 23.

$$\frac{\partial \rho \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_l} (\rho \bar{u}_l \tau_{ij}) = \rho P_{ij} - \rho \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} + \rho \Phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \rho c_s \frac{K}{\varepsilon} \overline{u_k u_l} \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_l} \right] \quad (22)$$

$$P_{ij} = - \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (23)$$

Na Equação 22, o segundo termo do lado direito representa a taxa de dissipação viscosa do componente ij do tensor e assume isotropia dos componentes normais, o que é aceitavelmente válido para escoamentos com altos números de Reynolds. O termo de redistribuição Φ_{ij} é uma correlação entre as flutuações de pressão e velocidade, expresso como a soma de quatro outros termos (Equação 24): uma interação entre os componentes de flutuação da velocidade ($\Phi_{ij,1}$), uma interação entre os componentes de flutuação da velocidade e o escoamento principal ($\Phi_{ij,2}$) e dois termos de reflexão da parede ($\Phi_{ij,w1}$ e $\Phi_{ij,w2}$). As expressões para cada termo estão apresentadas nas Equações 25 a 28.

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2} + \Phi_{ij,w1} + \Phi_{ij,w2} \quad (24)$$

$$\Phi_{ij,1} = -c_1 \frac{\varepsilon}{K} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ijk} \right) \quad (25)$$

$$\Phi_{ij,2} = -c_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k \right) \quad (26)$$

$$\Phi_{ij,w1} = -C'_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'_k u'_m} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_k u'_i} n_k n_j - \frac{3}{2} \overline{u'_k u'_j} n_k n_i \right) \frac{k^{3/2}}{2,5y\varepsilon} \quad (27)$$

$$\Phi_{ij,w2} = -C'_2 \left(\Phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \Phi_{ik,2} n_k n_i - \frac{3}{2} \Phi_{jk,2} n_k n_j \right) \frac{k^{3/2}}{2,5y\varepsilon} \quad (28)$$

Em que \mathbf{n} é o vetor unitário normal à parede e y é a distância normal à parede.

Para a utilização do modelo de Gibson e Launder (1978), é necessária uma equação para a taxa de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \rho c_\varepsilon \frac{K}{\varepsilon} \overline{u_k u_l} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] - c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (29)$$

A Tabela 1 mostra os valores das constantes do modelo de Gibson e Launder (1978):

Tabela 1: Constantes do modelo de Turbulência de Gibson e Launder (1978).

Constante	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	C_ε	C_s	C_1	C_2	C'_1	C'_2
Valor	1,44	1,92	0,18	0,22	1,8	0,6	0,5	0,3

2.5 Escoamentos Multifásicos

As equações mostradas previamente são para escoamentos monofásicos. Porém, em muitos casos de processos industriais o escoamento possui mais de uma fase, como é o caso deste trabalho, que trata de um sistema bifásico. Nestes casos, é introduzida a fração volumétrica de cada fase nas equações da continuidade e movimento para caracterizar-se o escoamento multifásico.

Neste trabalho, a abordagem multifásica utilizada foi a Euleriana. Na abordagem Euleriana todas as fases são resolvidas como contínuas, sendo as equações médias de conservação de massa, momento e energia, resolvidas para todas as fases (Schütz, Gorbach e Piesche, 2009).

O método de Euler utiliza o tempo como parâmetro para estabelecer as equações que determinam a velocidade e as grandezas características das partículas do fluido em cada ponto do escoamento. Este método demanda um maior recurso computacional do que outros métodos multifásicos, porém, produz resultados mais precisos (ARAÚJO, 2015).

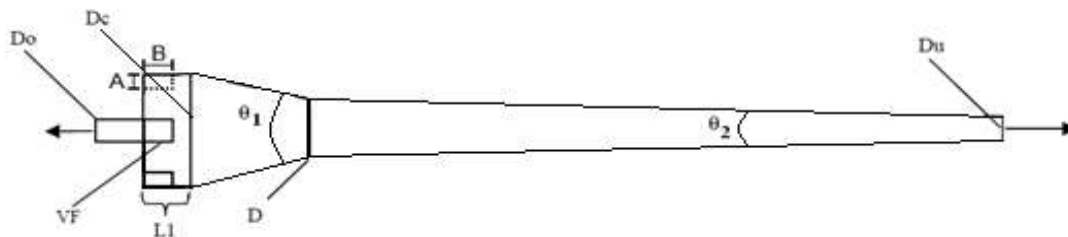
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo enunciará os materiais e as metodologias empregadas para gerar as geometrias, malhas e os resultados computacionais deste projeto. Todas as etapas deste trabalho, desde a geração da geometria até as simulações numéricas utilizaram o pacote computacional de CFD da *Ansys*, versão 18.0;

3.1 Geração da geometria

As dimensões dos hidrociclones simulados neste trabalho foram obtidas usando como base o hidrociclone 8 de Araújo (2015), que projetou um hidrociclone para a separação de altos teores de óleo em água. A escolha deste hidrociclone foi feita porque o mesmo apresentou elevada eficiência para a separação de misturar de água e óleo, mas não foi analisado mais profundamente. As entradas do hidrociclones foram modificadas para entradas quadradas apenas com o propósito de facilitar a construção da malha, porém a área da seção transversal da entrada foi mantida.

A Figura 10 mostra o esquema dos hidrociclones empregados neste trabalho, onde pode ser observada a localização das variáveis geométricas do equipamento.



A = comprimento da entrada; B = altura da entrada; Du = diâmetro do underflow; D = diâmetro compreendido entre as duas seções cônicas; Dc = diâmetro da seção cilíndrica; Do = diâmetro do tubo de *overflow*; VF = comprimento do *vortex finder*; L1 = comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone; θ_1 = ângulo da primeira seção cônica do hidrociclone; θ_2 = ângulo da segunda seção cônica do hidrociclone.

Figura 10 – Esquema dos hidrociclones estudados.

Neste trabalho, o diâmetro do *overflow* (Do) foi variado numa faixa de 5 a 25 mm e o diâmetro do *underflow* (Du) variou numa faixa de 10 a 30 mm. Todas as demais dimensões dos hidrociclones não foram variadas, sendo elas: comprimento da entrada (A) 7,5mm, altura da entrada (B) 7,5 mm, diâmetro entre as seções cônicas (D) 40 mm, diâmetro da seção cilíndrica (Dc) 70 mm, comprimento do *vortex finder* (VF) 40 mm, comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone (L1) 25 mm, ângulo da primeira seção cônica (θ_1) 15° e ângulo da segunda seção cônica (θ_2) 2°.

Tabela 2: Faixa de valores das variáveis estudadas

Variável	Faixa (mm)
Do	5-25
Du	10-30

Do = diâmetro do tubo de *overflow*; Du = diâmetro do *underflow*.

Foi realizado um planejamento composto central com dois fatores, sendo 2^2 corridas referentes ao planejamento fatorial, 2×2 corridas axiais e 1 corrida central, totalizando nove experimentos. Os valores das variáveis para cada uma das simulações sugeridas são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões dos hidrociclones estudados.

Hidrociclone	Do (mm)	Du (mm)	Du/Do
1	5	20	4
2	7,4	12,4	1,7
3	7,4	27,6	3,7
4	15	10	0,7
5	15	20	1,3
6	15	30	2
7	22,6	12,4	0,5
8	22,6	27,6	1,2
9	25	20	0,8

Do = diâmetro do tubo de *overflow*; Du = diâmetro do *underflow*.

O volume e comprimento para todos os hidrociclones do planejamento podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Comprimento e volume dos nove hidrociclones simulados.

Hidrociclone	Comprimento (mm)	Volume (litros)
1	751,98	0,7996
2	969,54	0,8456
3	534,13	0,7022
4	1038,6	0,8687
5	751,98	0,8053
6	465,39	0,6623
7	969,54	0,8589
8	534,13	0,7156
9	751,98	0,8172

Todas as geometrias sugeridas no planejamento foram construídas utilizando o *Design Modeler* (Ansys 18.0). A Figura 11 mostra a geometria do hidrociclone 5, que é o ponto central.

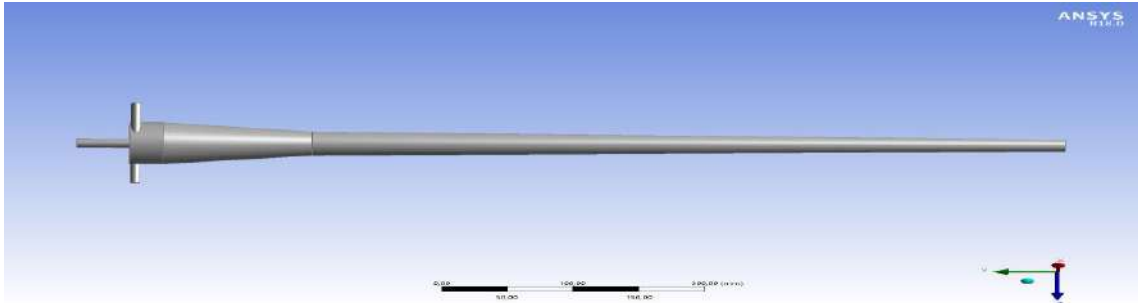


Figura 11 – Geometria do hidrociclone 5.

3.2 Geração da malha

Devido à complexidade da construção de uma malha para hidrociclones, o programa utilizado foi o *ANSYS ICEM* e todas as malhas geradas foram hexaédricas.

Para a realização do teste de malha, foi utilizado o hidrociclone 5 (ponto central) para a geração de malhas com aproximadamente 360.000, 600.000, 800.000 e 1.300.000 elementos. A malha a ser escolhida será aquela com a menor quantidade de elementos, a partir da qual não há uma diferença significativa nos perfis de velocidade. Nas Figuras 12, 13 e 14 é possível observar diferentes vistas da malha gerada com 800.000 elementos. A malha foi refinada próxima ao eixo central do hidrociclone e, também, nas proximidades da parede.

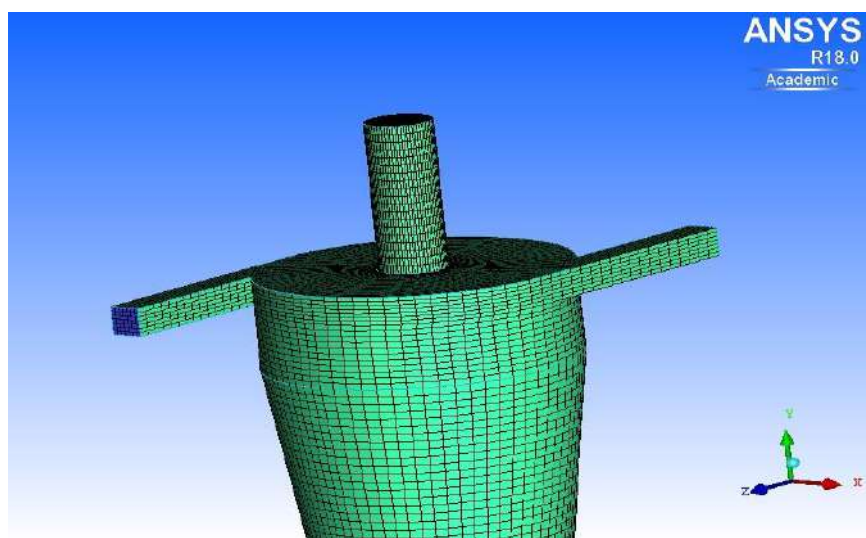


Figura 12 - Vista lateral da malha do hidrociclone 5.

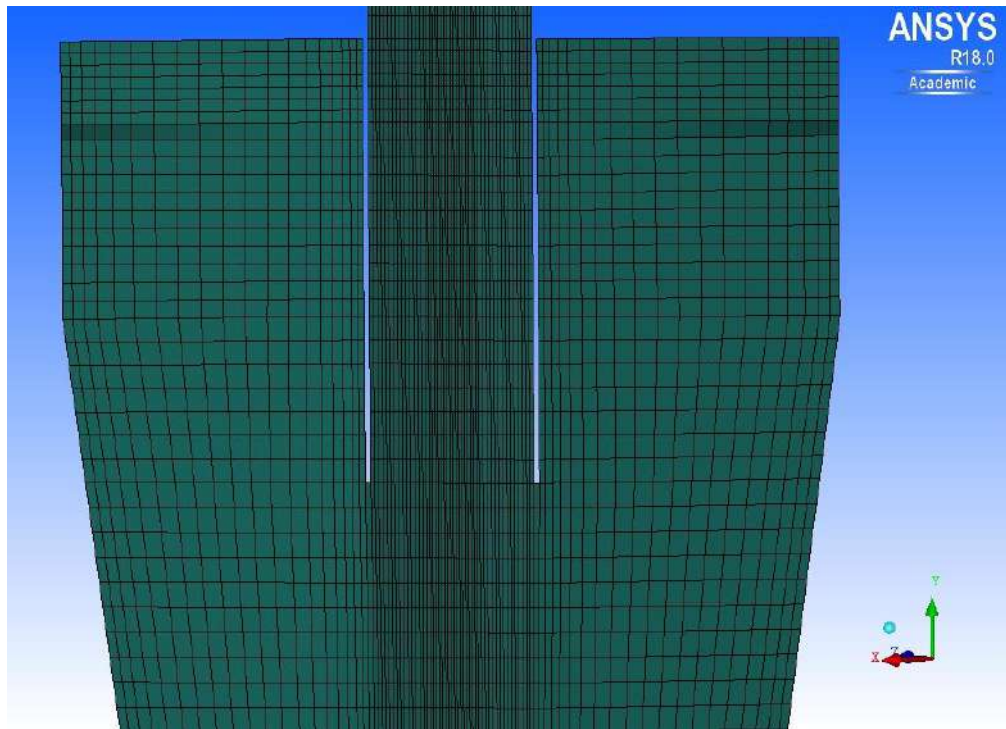


Figura 13 - Vista interna da malha do hidrociclone 5.

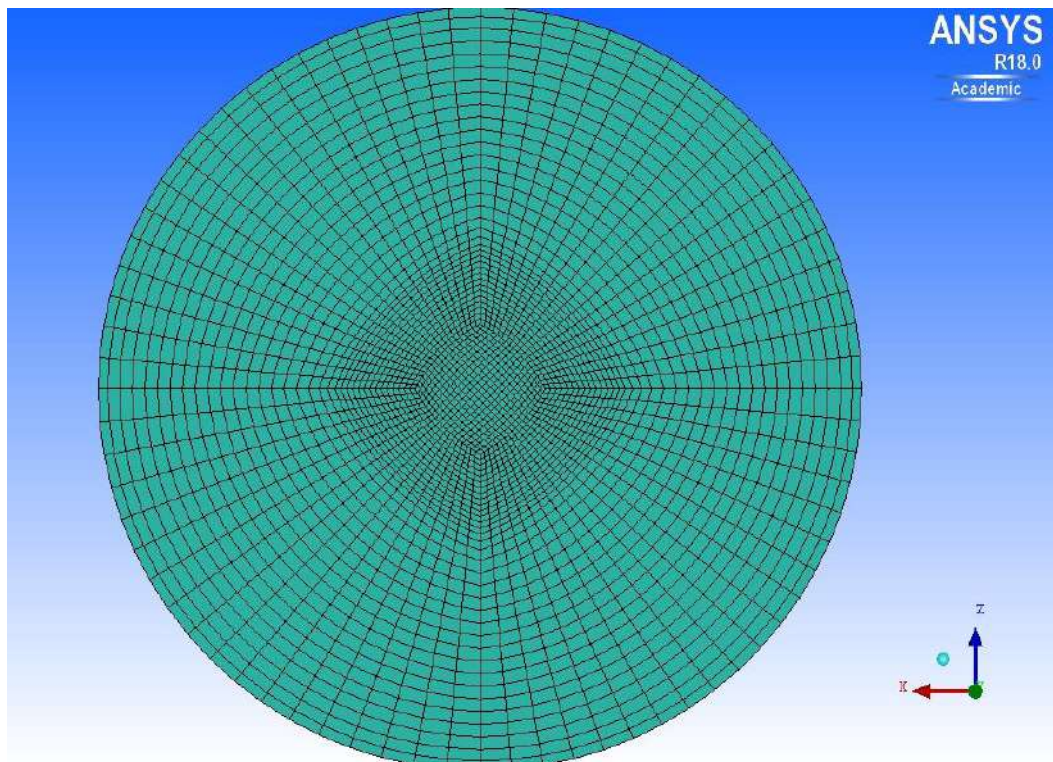


Figura 14 - Vista do corte no plano XZ entre as duas seções cônicas.

Durante a construção de todas as malhas os critérios de qualidade observados foram o *Aspect Ratio* (valor deve ser menor que 100), *Quality* (valor deve ser maior que 0,3) e *Volume Change* (valor deve ser menor que 5).

3.3 Definição das simulações

Em todas as simulações, a concentração volumétrica da fase dispersa (concentração do óleo) foi de 15% e o diâmetro de gota adotado para o óleo foi de 100 μm . As propriedades físicas da água e do óleo, bem como da velocidade de entrada da mistura foram as mesmas utilizadas em Araújo (2015), sendo esta igual a 4 m s^{-1} , a densidade da água e do óleo iguais a 996,5 e 840,0 kg m^{-3} , respectivamente, e a viscosidade da água e do óleo iguais a $8,55 \times 10^{-4}$ e $1,32 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Dois computadores foram utilizados durante a execução das simulações, o primeiro possuía um processador quad-core Intel® Core i7, com 2.8 GHz e memória RAM de 8,00 GB e o segundo possuía seis processadores Intel® Core i7-5820k, com 3.30 GHz e 32 GB de memória RAM. Este segundo computador só passou a ser utilizado nos últimos dois meses de realização do projeto.

Todas as simulações foram realizadas no *Fluent* (ANSYS 18.0), em regime pseudo transiente. As configurações utilizadas em todas as simulações estão resumidas na Tabela 5.

A diferença do balanço de massa (*BM*) apresentada na Tabela 5 foi calculada através da Equação 30:

$$BM = \frac{W_f - W_o - W_u}{W_f} \quad (30)$$

Em que,

W_f = vazão mássica de óleo na alimentação;

W_o = vazão mássica de óleo no *overflow*;

W_u = vazão mássica de óleo no *underflow*.

Tabela 5: Configuração das simulações no Fluent.

Parâmetro	Método
<i>Solver</i>	<i>Pressure Based</i>
Modelo multifásico	Euleriano
Modelo de turbulência	Gibson e Launder (1978)
Função de Parede	Scalable (ANSYS 18.0)
RSM multiphasemodel	Mixture
Condições de contorno	
Zona	Tipo
entrada	Velocidade uniforme de 4 m s^{-1}
<i>overflow</i>	Aberto para a atmosfera
<i>underflow</i>	Aberto para a atmosfera
parede	Velocidade nula na parede
Método de solução	
Acoplamento Pressão Velocidade	
Esquema	<i>Coupled</i>
Discretização Espacial	
Gradiente	<i>Least Square CellBased</i>
Momento	<i>Second order Upwind</i>
Fração Volumétrica	<i>First order Upwind</i>
Energia Cinética Turbulenta	<i>Second order Upwind</i>
Taxa de dissipação turbulenta	<i>Second order Upwind</i>
Tensor de Reynolds	<i>Second order Upwind</i>
Regime	Pseudo Transiente
Critério de convergência	
Resíduos	Menor que $1e-4$
Diferença do Balanço de Massa (óleo)	Menor que 0,5 %

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de malha

O objetivo do teste de malha é reduzir o custo computacional sem perder a confiabilidade dos resultados, ou seja, garantir que a malha não influencia nos resultados. Para este teste foi escolhido o hidrociclone 5, ponto central, empregando-se as quatro malhas citadas no Capítulo 3, com aproximadamente 360.000, 600.000, 800.000 e 1.300.000 elementos.

A escolha da malha mais adequada será baseada nos perfis de velocidade tangencial do hidrociclone em quatro alturas diferentes, ilustradas na Figura 15.

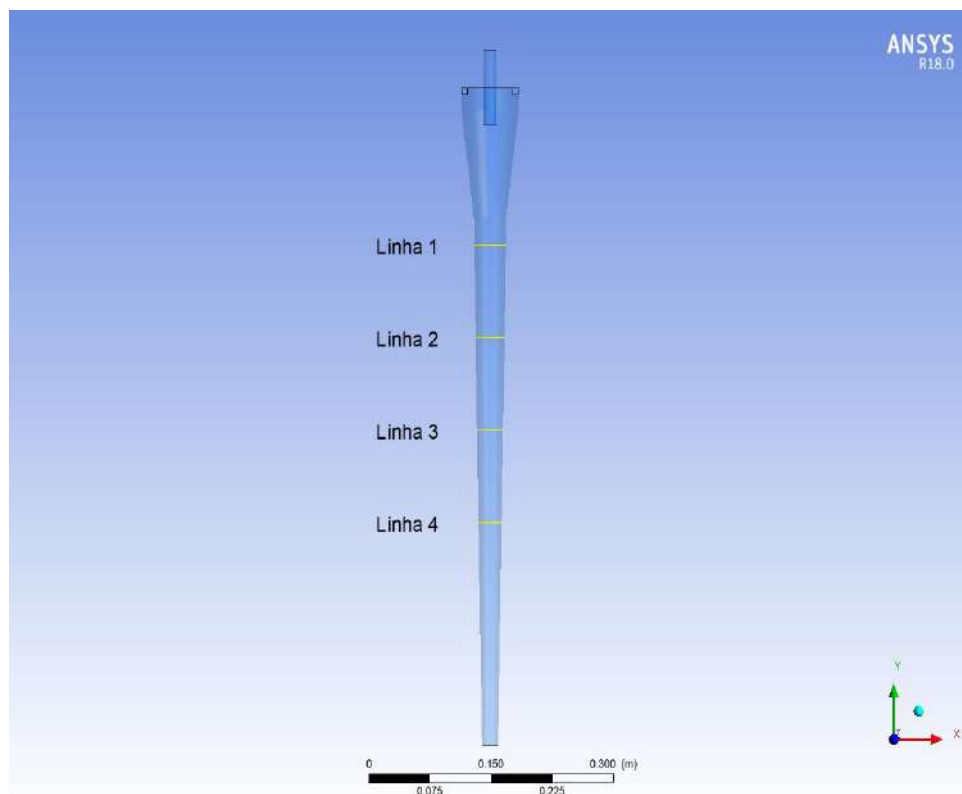


Figura 15 - Alturas onde foram realizadas as análises dos perfis de velocidade tangencial do hidrociclone 5.

Os perfis de velocidade tangencial de cada malha, em cada altura indicada na Figura 15, foram comparados através de gráficos contendo a velocidade tangencial em função da posição radial (R) e podem ser vistos nas Figuras 16 a 19.

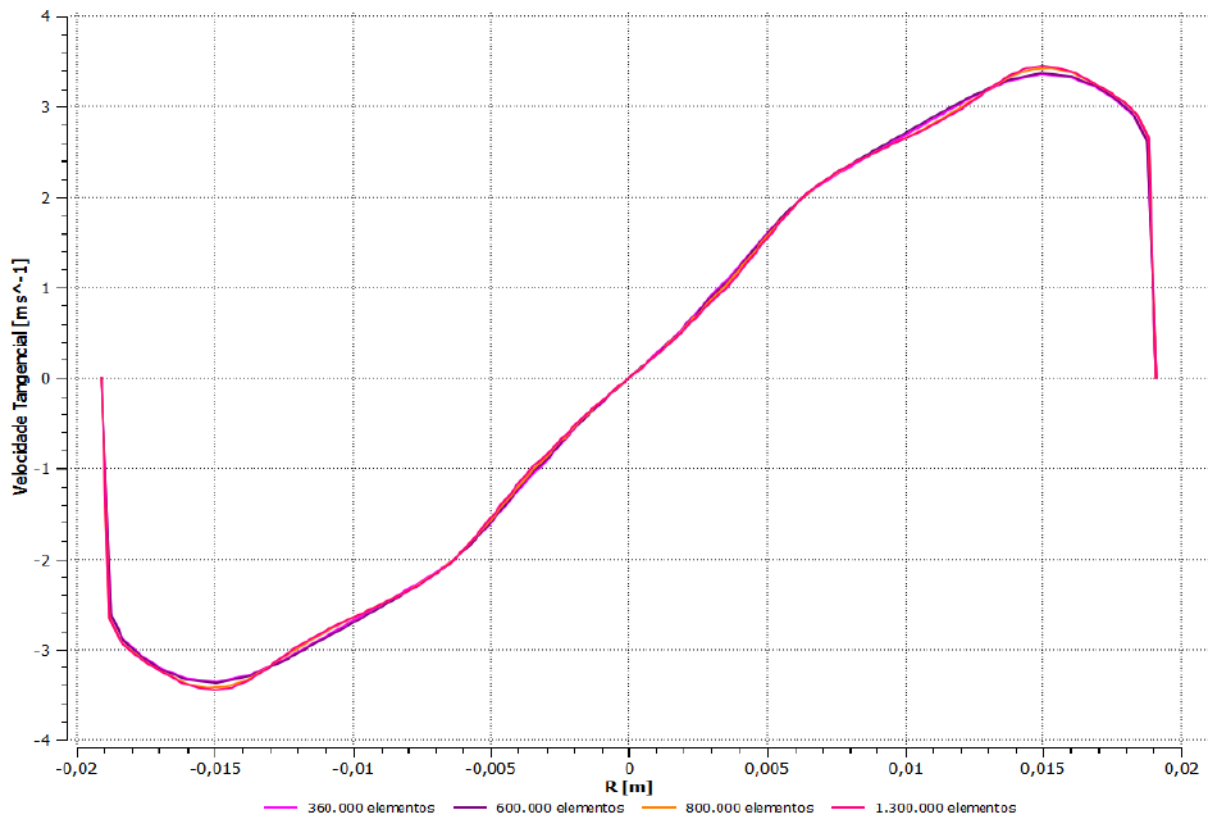


Figura 16 – Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 1 da Figura 15.

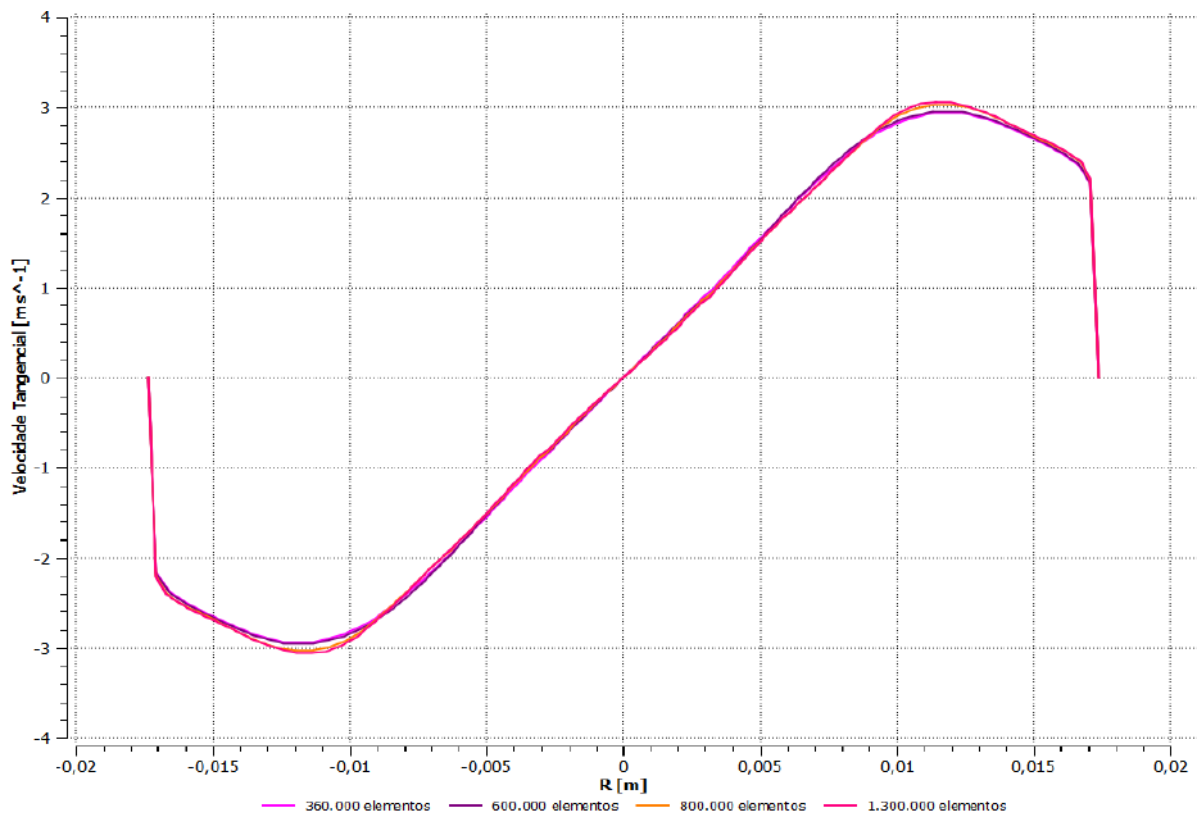


Figura 17 - Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 2 da Figura 15.

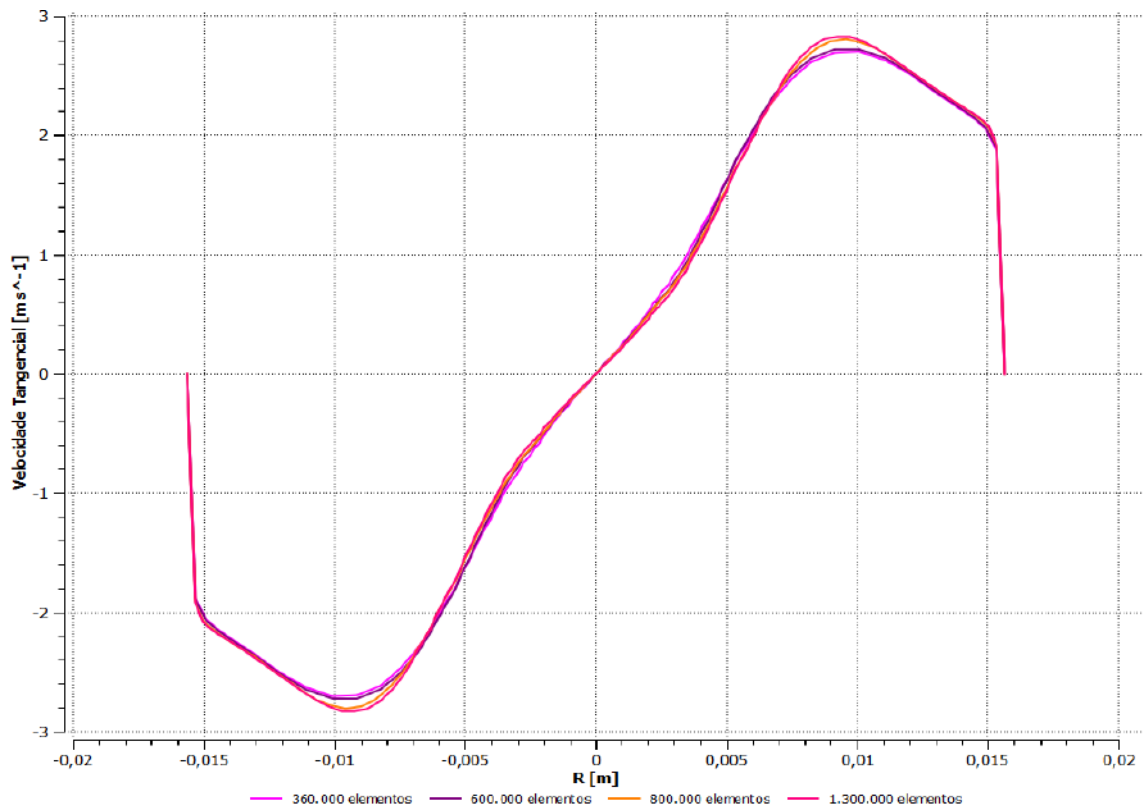


Figura 18 - Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 3 da Figura 15.

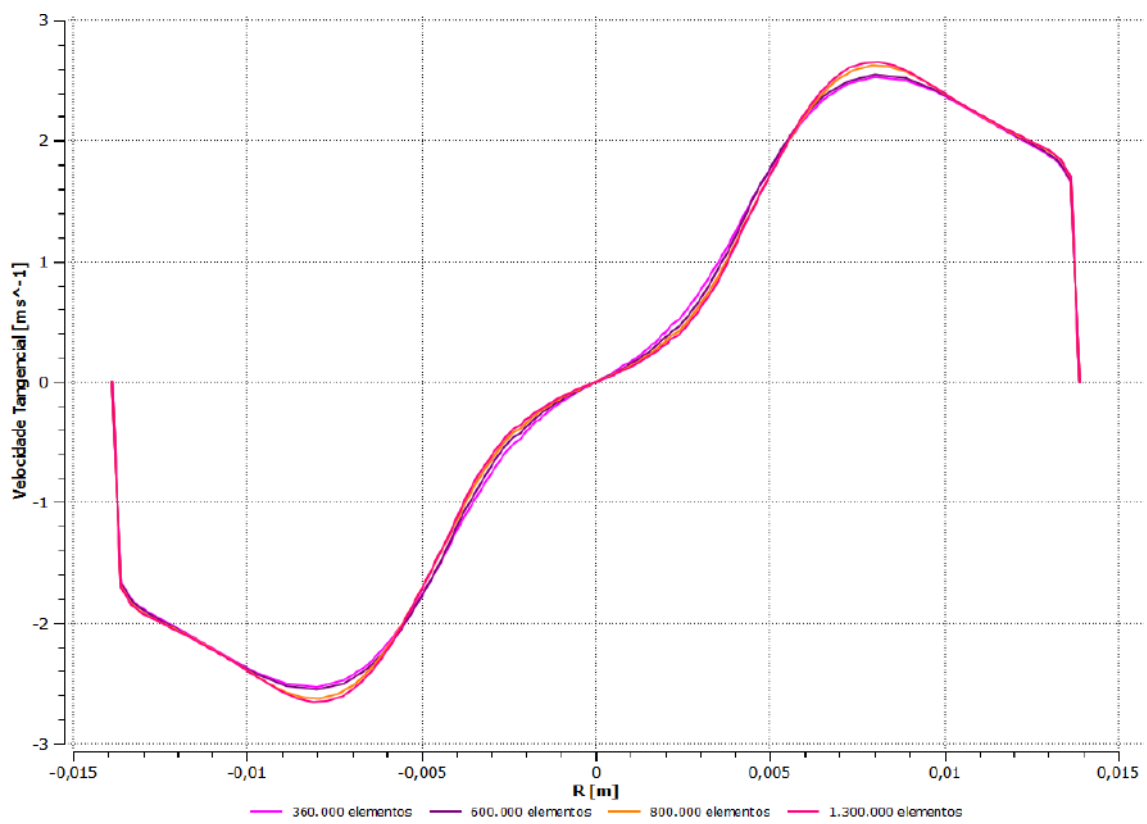


Figura 19 - Perfis de velocidade tangencial na altura da linha 4 da Figura 17.

Analisando as figuras acima, foi possível concluir que a malha de aproximadamente 800 mil elementos é suficiente para garantir que não haja grandes modificações nos resultados dos perfis de velocidade. A utilização da malha de 1.300.000 elementos, por mais houvesse um pequeno ganho da precisão dos resultados, acarretaria em um maior esforço computacional sem que o ganho da acurácia fosse significativo.

4.2 Planejamento Experimental

O resultado da eficiência granulométrica, razão de fluido e eficiência granulométrica reduzida para os nove hidrociclones resultantes do planejamento composto central estão apresentados na Tabela 6.

De modo a contornar erros numéricos e garantir valores fisicamente plausíveis, a eficiência granulométrica foi calculada conforme equação 31 abaixo:

$$G = \frac{W_{od}}{W_{od} + W_{ud}} \quad (31)$$

Em que,

W_{od} = vazão mássica no *overflow* de uma dada partícula de óleo de diâmetro d ;

W_{ud} = vazão mássica no *underflow* de uma da partícula óleo de diâmetro d .

Quanto mais próximo de zero a diferença de balanço de massa de óleo, mais esta equação se aproxima da Equação 4 de eficiência granulométrica, uma vez que a vazão mássica de entrada estaria cada vez mais próxima da soma das vazões de saída (*overflow* e *underflow*).

Tabela 6: Resultado das simulações para um diâmetro de partícula de 100 μm .

Hidrociclone	Do (mm)	Du (mm)	G (%)	G' (%)	R _F (%)
1	5,0	20,0	0,0	0,0	0,0
2	7,4	12,4	96,6	96,6	$2,62 \times 10^{-5}$
3	7,4	27,6	0,0	0,0	0,0
4	15,0	10,0	100	100,0	50,1
5	15,0	20,0	94,7	94,7	$2,10 \times 10^{-3}$
6	15,0	30,0	0,0	0,0	0,0
7	22,6	12,4	100	100	66,7
8	22,6	27,6	74,8	74,8	$7,50 \times 10^{-3}$
9	25,0	20,0	100,0	100,0	45,1

Analisando os resultados das simulações, optou-se por não realizar uma avaliação estatística neste trabalho, pois os resultados encontrados e expostos na Tabela 6 estão nos limites dos valores (três das nove razões de fluidos são iguais a zero e outras três são praticamente zero; o mesmo pode ser observado para a eficiência granulométrica reduzida: três são iguais a 100%, três são iguais a zero e outras duas são praticamente 100%). Isto faria com que as superfícies de resposta, provavelmente, não representassem bem o efeito das variáveis estudadas na razão de fluido e eficiência granulométrica reduzida, impedindo uma otimização confiável.

Portanto, o planejamento experimental foi utilizado apenas para decidir quantas simulações seriam necessárias e quais seriam os valores dos diâmetros de *overflow* e *underflow*. O hidrociclone utilizado para as demais análises foi o que apresentou as melhores características para este trabalho, maior eficiência granulométrica reduzida com o menor valor de razão de fluido. Com base neste critério, se pode destacar dois hidrociclones: o hidrociclone 2 e o hidrociclone 5, sendo que o hidrociclone 5 foi o escolhido, pois ele apresentou uma menor diferença no balanço de massa quando comparado ao hidrociclone 2.

Uma hipótese para esses resultados não serem capazes de descrever bem o efeito das variáveis estudadas neste trabalho, mesmo os resultados tendo convergido, é a faixa utilizada para a razão entre os diâmetros de *underflow* e *overflow* apresentar razões

muito elevadas, podendo chegar até a 4, o que poderia explicar a quantidade de razões de fluido e de eficiências granulométricas iguais a zero.

Outra hipótese é a de que o tamanho da partícula utilizado durante esta análise foi elevado, ou seja, este tamanho de partícula gera elevadas eficiências por ser bem maior que o diâmetro de corte. Portanto, o efeito do tamanho da partícula pode estar influenciando os resultados de uma maneira maior que a esperada, impedindo uma otimização estatística dos diâmetros de *overflow* e *underflow*.

4.3 Desempenho do hidrociclone 5

A primeira etapa para a avaliação da desempenho do hidrociclone escolhido é construir a curva de eficiência granulométrica reduzida dele para, assim, identificar o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}). Os pontos da curva foram obtidos através da simulação do hidrociclone 5 com novos diâmetros de partícula. Os diâmetros de partícula foram escolhidos de uma forma que representassem, de uma maneira satisfatória, a curva de eficiência granulométrica reduzida do hidrociclone 5. Os diâmetros escolhidos foram: 10 μm , 30 μm , 40 μm , 50 μm , 60 μm e 80 μm (além do 100 μm que já havia sido calculado). A Tabela 7 mostra a eficiência granulométrica, a razão de fluido e a eficiência granulométrica reduzida de cada um dos diâmetros de gotas analisados.

Tabela 7: Distribuição da eficiência granulométrica reduzida do hidrociclone 5.

Diâmetro de partícula(μm)	G (%)	R _f (%)	G' (%)
10	12,19	8,63	3,90
30	22,30	8,73	14,87
40	37,54	6,85	32,94
50	55,83	4,52	53,74
60	74,13	2,07	73,58
80	90,69	0,073	90,68
100	94,72	0,0021	94,72

Com os dados da Tabela 7, construiu-se a curva da eficiência granulométrica reduzida, apresentada na Figura 20.

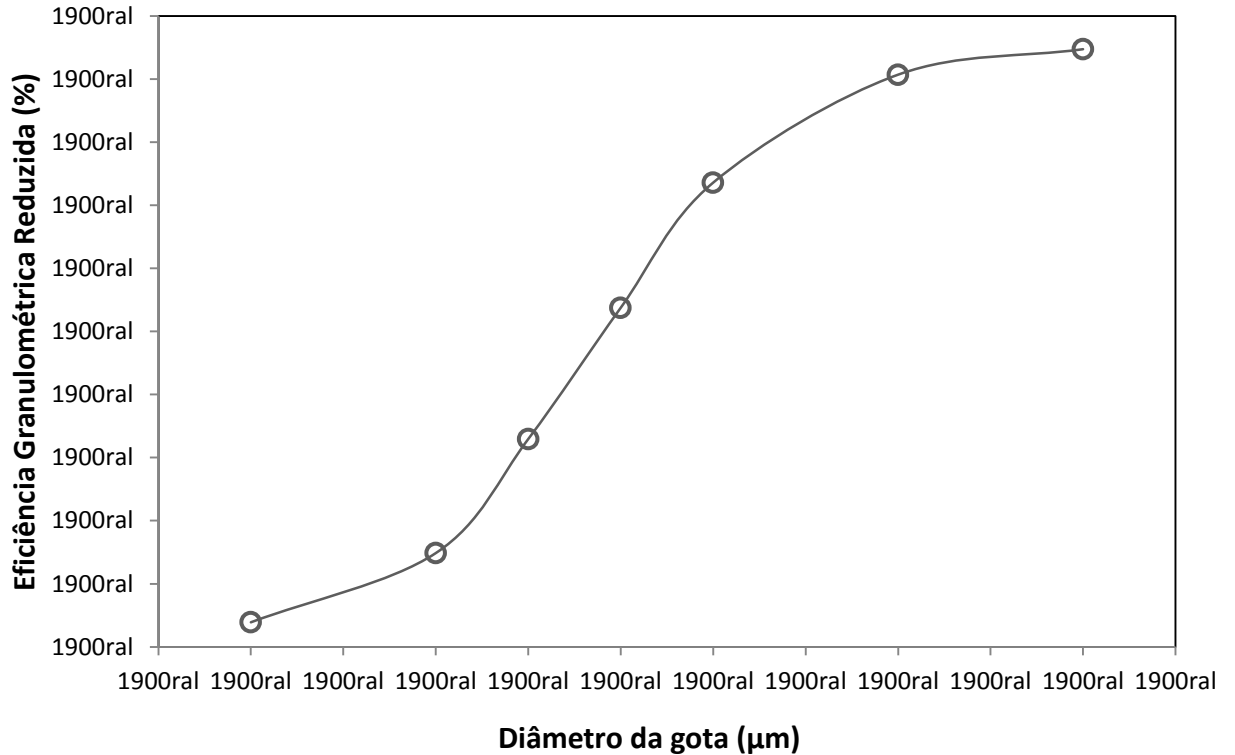


Figura 20 - Eficiência granulométrica reduzida para o hidrociclone 5.

Com base na Figura 20, obteve-se um diâmetro de corte reduzido de aproximadamente 48,1 µm. Com o d'_{50} , é possível utilizar a correlação de Plitt (Equação 6) linearizada (Equação 7) para a obtenção do parâmetro n e, assim, obter-se a equação que relaciona a eficiência granulométrica reduzida com o diâmetro da partícula para o hidrociclone estudado.

A Figura 21 apresenta a correlação de Plitt linearizada, onde é feita uma regressão linear para a identificação do coeficiente angular (parâmetro n).

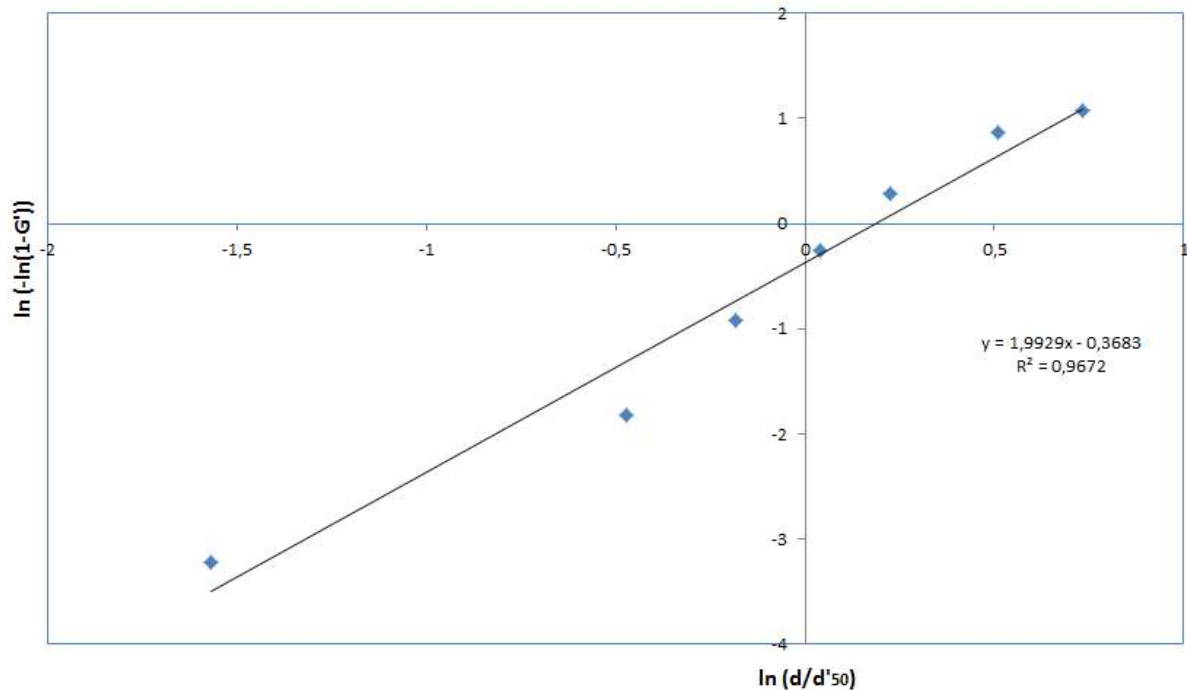


Figura 21 - Linearização da eficiência granulométrica reduzida (equação 7) para o hidrociclone 5.

O valor para o parâmetro n é de aproximadamente 2,0, com o coeficiente de correlação $R^2 = 0,9672$. Portanto, a correlação de Plitt (equação 6) para o hidrociclone 5 fica:

$$\ln(-\ln(1 - G')) = -0,3809 + 2,0 \cdot \ln\left(\frac{d}{48,1}\right) \quad (32)$$

Com a equação da eficiência granulométrica reduzida e a distribuição de tamanhos de partículas do óleo, é possível calcular a eficiência total reduzida do hidrociclone 5. Contudo, como o hidrociclone está sendo analisado apenas numericamente, é desconhecida a distribuição de tamanho das partículas.

Com a intenção de demonstrar que diferentes distribuições de tamanhos de partículas geram diferentes eficiências totais e, também ter uma pequena estimativa da eficiência total reduzida do hidrociclone, utilizou-se duas distribuições diferentes e reais. A primeira distribuição, estudo 1, é a usada no trabalho de Araújo (2015) e a segunda, estudo 2, é a usada no trabalho de Braga (2015). Ambas as distribuições usam o modelo RRB e os parâmetros são mostrados na Tabela 8:

Tabela 8: Distribuições de partículas do modelo RRB.

Estudo	m	k (μm)
1	1,86	240,85
2	2,51	160

Utilizando a distribuição do estudo 1, obtemos a Equação 33:

$$E'_T = \int_0^1 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{240,85 \times (-\ln(1-y))^{\frac{1}{1,86}}}{48,1} \right)^2 \right] dy \quad (33)$$

Utilizando a distribuição do estudo 2, obtemos a Equação 34:

$$E'_T = \int_0^1 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{160 \times (-\ln(1-y))^{\frac{1}{2,51}}}{48,1} \right)^2 \right] dy \quad (34)$$

A eficiência total reduzida para ambos os casos são mostradas na Tabela 9:

Tabela 9: Eficiências totais reduzidas.

Estudo	E' _T (%)
1	93,58
2	92,08

4.4 Avaliação Fluidodinâmica

A avaliação fluidodinâmica dos resultados também é uma etapa importante para se certificar que os resultados obtidos através das simulações estão de acordo com o esperado; uma vez que, se as características do escoamento simulado não condizem com os perfis típicos obtidos em hidrociclones, os resultados obtidos devem ser desconsiderados. Os perfis de velocidade tangencial, pressão e fração volumétrica de óleo para diâmetros diferentes são apresentados nas Figuras 22, 23 e 24 respectivamente.

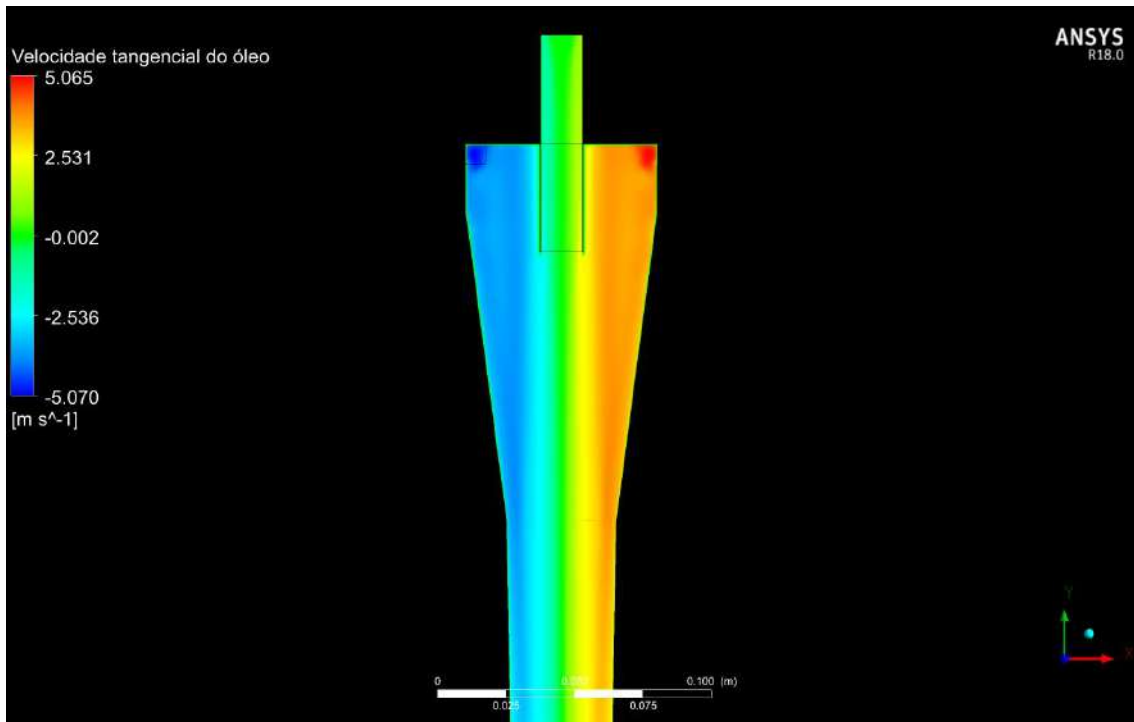


Figura 22 - Perfil de velocidade tangencial no plano central do hidrociclone.

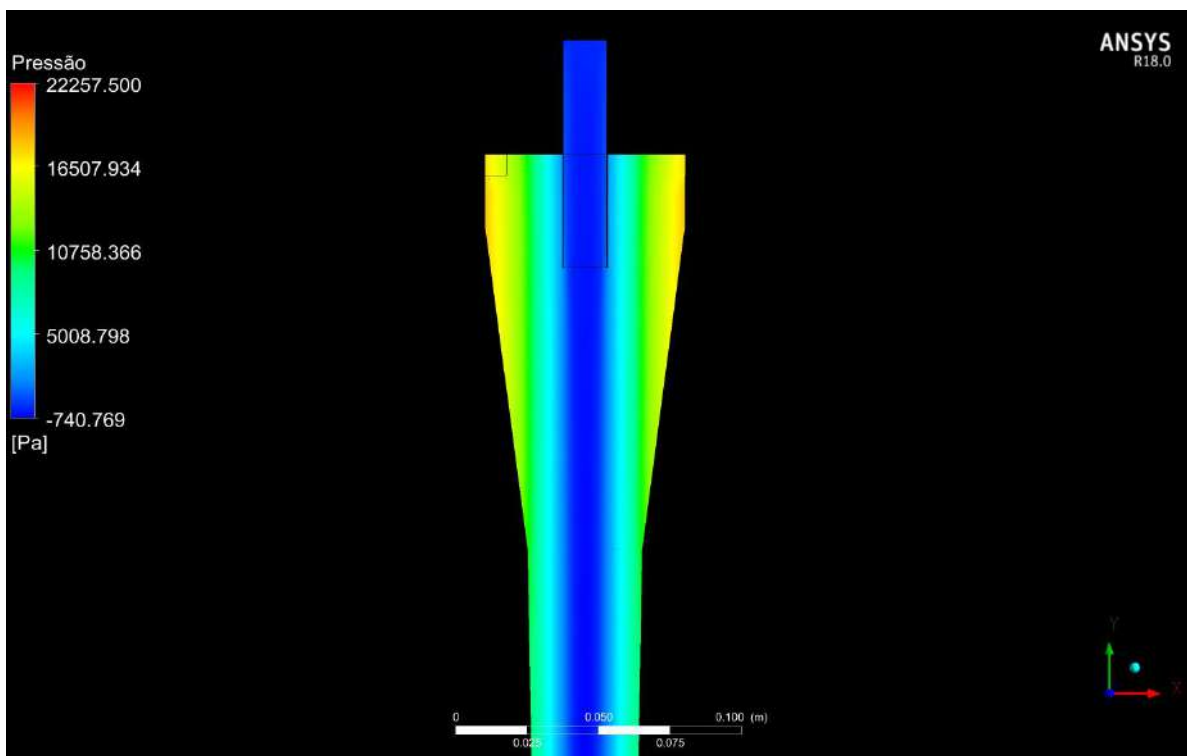
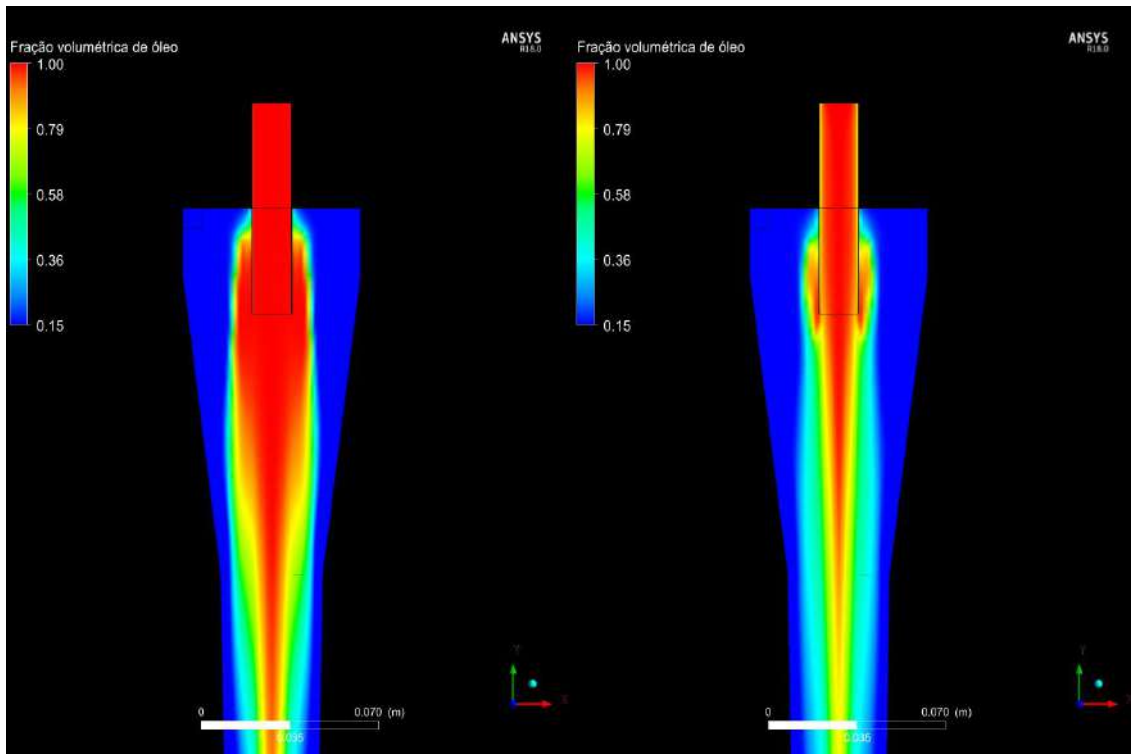
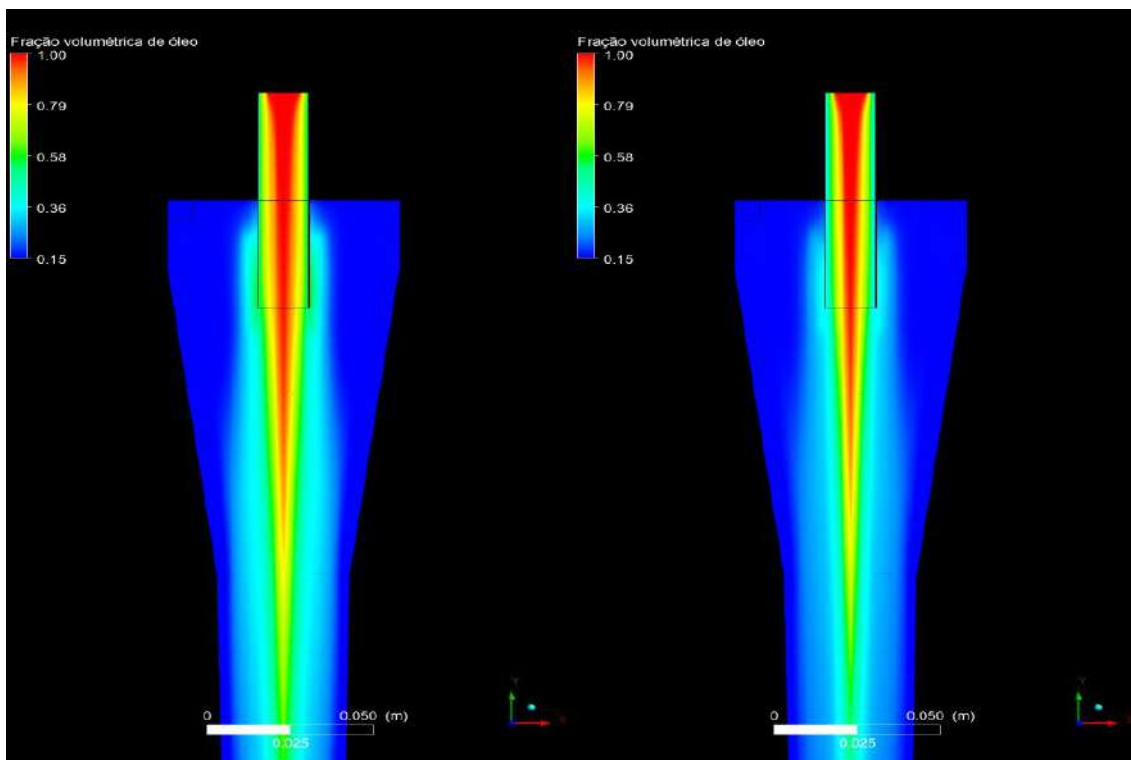


Figura 23 - Perfil de pressão no plano central do hidrociclone.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 24 - Distribuição da fração volumétrica do óleo com os seguintes diâmetros de partículas: (a) 80 μ m, (b) 60 μ m, (c) 40 μ m e (d) 30 μ m.

O comportamento do perfil de velocidade tangencial (Figura 22) está dentro do esperado para um hidrociclone com duas entradas porque ocorre uma simetria da intensidade das velocidades tangenciais a partir do eixo central do plano XY; o valor negativo ou positivo apenas indica o sentido do escoamento. Também, pode-se observar que a velocidade tangencial no eixo central é igual a zero e, durante a parte cilíndrica e a primeira parte cônica, os módulos de máxima velocidade tangencial encontram-se mais próximos ao eixo central do que das paredes.

O comportamento do perfil de pressão (Figura 23) está dentro do esperado para um hidrociclone com duas entradas porque se pode observar uma simetria dos resultados a partir do eixo central do plano XY, com a menor pressão dentro do hidrociclone presente no eixo do mesmo.

Analisando-se a Figura 24, pode-se dizer que a distribuição de gotas de óleo perto do *overflow* também condiz com os resultados de eficiência granulométrica e razão de fluido. Nos casos (a) e (b), a razão de fluido foi praticamente zero, o que acaba indicando que a fração volumétrica de óleo no *overflow* nestes casos deve ser próxima a 1. Já os casos (c) e (d), apresentam uma razão de fluido na faixa dos 6-8%. Pode-se notar ainda que, como a água é mais densa que o óleo, esta se desloca para as paredes do equipamento.

5. CONCLUSÃO

Foi projetado um hidrociclone para a separação de óleo disperso em água com médios teores de óleo (concentração volumétrica de óleo igual a 15%) através das técnicas de fluidodinâmica computacional.

Obteve-se um hidrociclone que apresenta uma boa eficiência de separação. A determinação do diâmetro de corte reduzido, 48,1 μm , do hidrociclone escolhido ($D_o = 15 \text{ mm}$ e $D_u = 20 \text{ mm}$) foi realizada através da construção da curva de eficiência granulométrica reduzida do mesmo. A análise da performance do hidrociclone através do uso de duas distribuições de tamanho de partículas reais e distintas, mostraram que o hidrociclone é capaz de atingir eficiências totais reduzidas superiores a 92%.

A avaliação da fluidodinâmica da simulação foi dentro dos limites do esperado para o caso de um hidrociclone, uma vez que os perfis de velocidade tangencial e de pressão se encontram dentro do esperado para um hidrociclone com duas entradas. O perfil da fração volumétrica da fase dispersa, óleo, dentro do hidrociclone também está dentro do esperado, uma vez que quanto mais próximo da saída do *overflow*, maior a fração volumétrica de óleo.

Como trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- Fazer uma análise da performance do hidrociclone 2 para a realização de uma comparação mais a fundo sobre qual dos dois hidrociclones é mais eficiente;
- Construção do hidrociclone 5 para a validação experimental dos resultados obtidos com as simulações, através da comparação dos perfis de velocidades simulados com os perfis reais e da performance simulada com a performance real do hidrociclone;
- Definição de uma nova faixa de diâmetro para o *overflow* e *underflow* com a finalidade de obter resultados propícios para a realização da otimização através das análises estatísticas. De todas as sugestões citadas, esta é a menos atraente tendo em vista que o planejamento experimental deste trabalho foi capaz de definir dois hidrociclones com altas eficiências granulométricas (chegando a quase 100%) para as partículas de óleo com 100 μm .

- Refazer o planejamento de simulações, mas com um diâmetro menor, em torno do d'_{50} encontrado neste trabalho, para tentar encontrar resultados de G' e R_f fisicamente coerentes, permitindo a análise estatística dos resultados e determinação de um hidrociclone ótimo a ser comparado com o obtido neste trabalho.
- Estudar a influência de outros parâmetros geométricos do hidrociclone, como os ângulos da parte cônica ou diâmetro da parte cilíndrica, que possam vir a aumentar a eficiência de separação.

6. REFERÊNCIAS

AGUIRRE, J., e R. DAMIAN. “Guidelines on numerical modeling of cyclones and hydrocyclones.”South American ANSYS Conference.Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

ALVES, J. V. B.; MEDRONHO, R. A. Hidrociclone para a separação do óleo residual de água em refinarias. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ABEQ, Búzios, p.10958 – 10967, 2012.

ALVES, J. V. B. Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias. Dissertação (Mestrado) - Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012

ANSYS FLUENT 18.0. “Theory Guide.”Copyright © by Ansys, 2017

ANSYS ICEM CFD 18.0. “User Manual.”Copyright © by Ansys, 2017

ARAÚJO, C.A.O. Hidrociclones para a separação de misturas de alto teor de óleo disperso em água. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BASTOS, H. B. Otimização da Geometria de Ciclones para a Retenção de Catalisador em Reatores de Unidades de FCC. Projeto Final de Curso, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BARKER, T.B. (1985).*Quality by experimental design*. New York, Marcel Dekker; Milwaukee: ASQC Quality Press. Cap. 1-2, p. 1-22.

BHASKAR, K.U.; MURTHY, Y.R.; RAJU, M.R.; TIWARI, S.; SRIVASTAVA, J.K.; RAMAKRISHNAM, N.; CFD Simulation and Experimental Validation Studies on Hydrocyclone. *MineralsEngineering*, v 20, p. 60-71, 2007.

BIRD, R. B.; W. E. STEWART, W. E; LIGHTFOOT,E. N.Fenômenos de Transporte.2^a ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

BOUSSINESQ, J. “Théorie de l’Écoulement Tourbillant.” *Mem. Présentés par Divers Savants Acad. Sci. Inst. Fr* 23, 1877

BRAGA, E. R. Desenvolvimento de um hidrociclone para a separação do óleo presente em águas oleosas de refinarias de petróleo. Tese (Doutorado) -Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. Planejamento de experimentos usando o Statistica. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços editoriais, 2003.

COLMAN, D. A., e M. T. THEW. "Hydrocyclone to give a highly concentrated sample of a lighter dispersed phase." International Conference on Hydrocyclones. Cambridge: BHRA, 1980. 209-224.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução N° 393, de 08/08/2007, publicada no DOU nº 153, de 09/08/2007, Seção 1. 2007. 72-73.

DECKWER, W. D., R.A. MEDRONHO, B. ANSPACH, E M. LUBBERSTEDT. EUA Patente 6,878,545. 2005.

DELFO, R.; MURPHY, S.; STANBRIDGE, D.; OLUJIC, Z.; JANSENA, P. J. A design tool for optimizing axial liquid-liquid hydrocyclones. *Minerals Engineering*, v.17, p. 721-731, 2004.

FREITAS, A.G.B. Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Universidade Federal do Sergipe, São Cristóvão, 2009

FREITAS, A.G.B.; PAIXÃO, A. E. A.; MEDRONHO, R. A.; SILVA, G. F. Influência de algumas variáveis geométricas do hidrociclone na razão de fluido e eficiência granulométrica reduzida: um estudo com CFD. *Anais do ENEMP 2009 - XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas*. UNICAMP, Campinas, 2009.

GALDÁMEZ, E. V. C. Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

- GIBSON, M. M.;LAUNDER,B. E. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*,vol. 86, issue 3,p. 491-511, 1978.
- GRADY, S. A.;WESSON, G. D.;ABDULLAH, M.; KALU,E. E. Prediction of 10-mm hydrocyclone separation efficiency using computational fluid dynamics. *Filtration & Separation*, vol. 40, issue 9, p. 41-46, 2003.
- HASHMI, K. A.;HAMZAH. A.;WILSON, J. C. Canmet hydrocyclone: an emerging alternative for the treatment of oily waste streams. *Minerals Engineering*, vol 17, issue 5, p. 643-649, 2004.
- MALISKA, C.R. Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- OLIVEIRA, A. G.; MEDRONHO, R. A. Otimização da geometria de hidrociclones para o tratamento de águas de lastro de navios petroleiros. *Anais do Rio Oil&Gas Expo andConference2004*, IBP-Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2004
- OLTEANU, D. Hidrociclones na separação líquido-líquido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- PINTO, R. C. V.; MEDRONHO, R. A.; CASTILHO, L. R.Separation of CHO cell using hydrocyclones.*Cytotechnology*,v. 56, p. 57-67, 2008.
- PLITT, L. R. The analysis of solid-solid separations in classifiers. *CIM Bulletin*, v. 64, p. 42-47, 1971.
- SANTANA, C. R. Tratamento de água produzida para descarte. Monografia de Especialização em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe,São Cristóvão, 2007.
- SCHÜTZ, S.;GORBACH, G.; PIESCHE, M. Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid-liquid separation in hydrocyclones. *Chemical Engineering Science*, v. 64,p. 3935-3952, 2009.

SVAROVSKY, L. Solid-liquid Separation. 4th ed, Oxford: Butterworth-Heinemann, p.191-245, 2001.

SVAROVSKY, L. Hydrocyclones. Londres: Holt, Rinehart and Winston, 1984.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. CA: DCW Industries, La añana, 1998.