

Monografia de Graduação

Desempenho de um Hidrociclone para separação de águas oleosas

Diogo Batista Coelho

Natal, agosto de 2011

DIOGO BATISTA COELHO

DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE PARA SEPARAÇÃO DE ÁGUAS OLEOSAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Corpo Docente do Departamento de Engenharia
Química da Universidade Federal do Rio Grande
do Norte, como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Engenheiro
Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás
Natural – Refino e Processamento.*

ORIENTADORES: Prof. Dr. Afonso Avelino Dantas Neto

Prof. Dr. Ricardo de Andrade Medronho

CO-ORIENTADOR: Eng. João Victor Barbosa Alves

Natal, agosto de 2011.

Catálogo da Publicação na Fonte.
UFRN / CT / DEQ
Biblioteca Setorial "Professor Horácio Nicolas Solimo".

Coelho, Diogo Batista.

Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas/ Diogo Batista Coelho.
- Natal, 2011.

52 f.: il.

Orientadores: Afonso Avelino Dantas Neto.
Ricardo de Andrade Medronho.

Co-orientador: João Victor Barbosa Alves.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química.

1. Hidrociclone - Monografia. 2. Separação de águas oleosas - Monografia. 3. Fluidodinâmica computacional (CFD) - Monografia. I. Dantas Neto, Afonso Avelino. II. Medronho, Ricardo de Andrade. III. Alves, João Victor Barbosa. IV. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. V. Título.

RN/UF/BSEQ

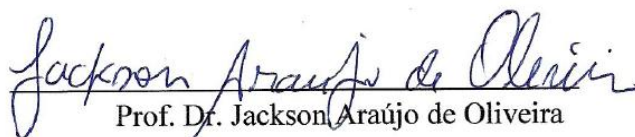
CDU 621.928.3

DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE PARA SEPARAÇÃO DE ÁGUAS OLEOSAS

Diogo Batista Coelho

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.


Aprovado por:

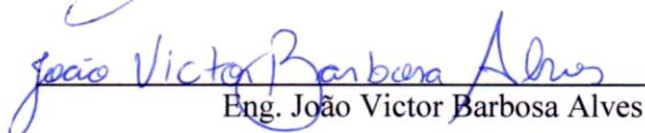

Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira


Prof. Dr. Domingos Fabiano de Santana Souza

Orientado por:


Prof. Dr. Afonso Avelino Dantas Neto


Prof. Dr. Ricardo de Andrade Medronho


Eng. João Victor Barbosa Alves

Natal, agosto de 2011.

Coelho, Diogo Batista - Desempenho de um Hidrociclone para separação de águas oleosas. Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Química / UFRN / Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Engenharia de Processos em Plantas de Petróleo e Gás Natural.

ORIENTADORES: **Prof. Dr. Afonso Avelino Dantas Neto**

Prof. Dr. Ricardo de Andrade Medronho

CO-ORIENTADOR: **Eng. João Victor Barbosa Alves**

RESUMO

Em um campo novo de produção de petróleo, aproximadamente de 5 a 15% do volume produzido é água, entretanto ao longo da produção e o esgotamento econômico do poço, o volume de água pode atingir uma faixa entre 75 a 90%. Esse grande volume de efluente não pode ser descartado no ambiente, necessitando de tratamento. Em plataformas offshore o preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado, e a busca por separadores compactos e eficientes tem sido uma constante. Os hidrociclones se enquadram nessa classe de equipamentos, devido ao campo centrífugo que promove a separação, diminuindo o tempo de residência e aumentando a eficiência quando comparado com separadores gravitacionais. O estudo teórico de hidrociclones é complexo, pois envolve escoamento multifásico e turbulento. A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta que auxilia o estudo do escoamento em hidrociclones, pois utiliza da resolução numérica das equações de conservação para prever o comportamento do fluido. O objetivo deste trabalho é avaliar os perfis de velocidade tangencial e eficiência de separação de um hidrociclone projetado para separação de águas oleosas, baseado nos dados experimentais obtidos por Marins *et al.* (2007), utilizando distintas dispersões com diferentes distribuições de gotas de óleo em água. Os resultados das simulações apresentaram valores condizentes com os dados experimentais, principalmente os perfis de velocidade tangencial e de pressão. Para o cálculo da eficiência foram utilizados os modelos lagrangeano e euleriano. Quando três curvas de dispersões de óleo em água com medianas de distribuição de 21, 45 e 130 μm foram utilizadas, a eficiência de separação para o modelo lagrangeano foi 32,3, 80,4 e 96,0% e para o euleriano foi 35,1, 80,3 e 96%, respectivamente.

Palavras Chave: Hidrociclone, Água oleosa, CFD, Distribuição Granulométrica.

Coelho, Diogo Batista - Performance of a hydrocyclone for separation of oily water. Final Project submitted to the Department of Chemical Engineering / UFRN / National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels - Process Engineering in Plants, Oil and Natural Gas.

SUPERVISORES: **Prof. Dr. Afonso Avelino Dantas Neto**

Prof. Dr. Ricardo de Andrade Medronho

CO-SUPERVISOR: **Eng. João Victor Barbosa Alves**

ABSTRACT

In a new field of oil production, approximately 5 to 15% of the volume produced is water, however along the production and economic exhaustion of the well, the volume of water can reach a range between 75 to 90%. This large volume of effluent cannot be discarded in the environment, thus it requires treatment. In the offshore platform, the price per square meter of deck area for equipment is very high, and because of that, the search for compact and efficient separators has been intensified. The hydrocyclones fall into this class of equipment, due to the centrifugal field that promote the separation, reducing the residence time and increasing efficiency compared with gravitational separators. The theoretical study of hydrocyclones is complex because it involves multiphase and turbulent flow. The Computational Fluid Dynamics (CFD) is a tool that aids the study of the flow in hydrocyclones. This is possible because CFD uses the numerical resolution of conservation equations to predict the behavior of the fluid. The objective of this study is to evaluate the profiles of tangential velocity and separation efficiency of a hydrocyclone designed for oily water separation, based on experimental data obtained by Marins et al. (2007), using distinct dispersions with different distributions of oil droplets in water. The simulation results showed similar values with the experimental data, especially the profiles of tangential velocity and pressure. To calculate the efficiency we used the Lagrangian and Eulerian models. When three curves of dispersions of oil in water with medians of 21, 45 and 130 μm were used, the separation efficiency for the Lagrangian model was 32.3, 80.4 and 96.0% for the Eulerian and was 35.1, 80.3 and 96.0%, respectively.

Keywords: Hydrocyclone, Oily Water, CFD, Droplet Size Distribution.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, aos meus pais Rose e Raimundo, pelo amor, apoio, carinho, conselhos e pela dedicação de sempre me proporcionar educação de qualidade. Devo a eles, a conclusão esta etapa importante da minha vida. À minha irmã Priscila, pelo apoio, carinho e incentivos.

Ao professor Ricardo de Andrade Medronho, pela orientação, pela amizade, pelo incentivo e por aceitar que eu realizasse este trabalho em seu laboratório.

Ao João Victor, pela amizade, conselhos, dicas, conversas, orientação que foram essenciais para realização desse trabalho.

Ao professor Afonso Avelino Dantas Neto, pela orientação acadêmica durante dois anos de iniciação científica. Ao professor Osvaldo Chiavone Filho, pelo incentivo, orientação e por me apresentar o professor Ricardo Medronho.

Aos grandes amigos da engenharia química, Primo Charles, Herick, Natália, Rodolfo, Daniel Teixeira, Angélica, Ceres, Carlos Bode, Julíssima, Canindé, Enio e pessoal do Centro Acadêmico (Hazboun, Motta e Diogo), pelos momentos de felicidades, de descontração, conversas e discussões na cantina, e pelas horas difíceis de estudo.

À amiga Rayane Araújo, pela forte amizade que se formou entre nós, pelas horas e horas de conversas, conselhos, aflições, pelos estudos em véspera de prova e pelos bons momentos de descontração.

Ao pessoal do Lab CFD da Escola de Química/UFRJ, Andrea, Cristiano, Eduardo, João Phelipe, Diego, Natália, Flávio, Sara e Amanda, pelo apoio, incentivo e bons momentos.

Aos amigos: Anderson, Igor (Massumi), Nathalia Lundberg, Tamyres, Marco Schiewe, Dani, Heloísa, Joseanne.

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural – ANP – e da Fundação Norte-Rio-Grandense de Pesquisa e Cultura – FUNPEC – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP, em particular ao PRH 14, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
2. HIDROCICLONES	3
2.1. Aplicação na Indústria do Petróleo	4
2.2. Eficiência do Hidrociclone em Separação Líquido-Líquido	6
2.3. Perfis de Velocidade	9
3. MODELOS MATEMÁTICOS	11
3.1. Equações de Conservação	11
3.2. Modelo Lagrangeano	13
3.3. Modelo Euleriano	13
4. MODELOS DE TURBULÊNCIA	14
4.1. Modelo k- ϵ	15
4.2. Modelo RSM	17
5. FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL	18
5.1. Etapas de uma simulação em CFD	21
5.2. Tipos de Malha	23
5.3. Discretização por Métodos Numéricos	28
6. METODOLOGIA	31
6.1. Software e Hardware	31
6.2. Geometria do Hidrociclone	31
6.3. Geração da Malha	33
6.4. Simulação Bifásica	37
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
7.1. Teste de Malha	39
7.2. Resultados Gerais	40
7.3. Eficiência pelo Modelo Lagrangeano	45
7.4. Eficiência pelo Modelo Euleriano	46
7.5. Eficiência Global do Hidrociclone	48
8. CONCLUSÕES	50
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Princípio de funcionamento de um hidrociclone.	3
Figura 2.2. Exemplo de um sistema compacto de hidrociclones em plataforma offshore.	5
Figura 2.3. Curva de eficiência granulométrica com $R_f = 10\%$.	7
Figura 2.4. Eficiência granulométrica reduzida e diâmetro de corte reduzido.	8
Figura 2.5. Componentes da velocidade global do hidrociclone..	9
Figura 2.6. Perfil de velocidade tangencial no hidrociclone (Svarovsky, 1990).	10
Figura 2.7. a) Perfil de velocidade axial. b) Perfil de velocidade radial (Svarovsky, 1990).	10
Figura 5.1. Etapas da resolução de problemas em CFD (Leahy-Dios, 2003).	21
Figura 5.2. Exemplo de organização dos pontos de uma malha estruturada (Galante, 2006).	24
Figura 5.3. Exemplo de uma malha não estruturada com elementos triangulares (Aguirre, 2010).	25
Figura 5.4. Discretização de um domínio D em um sistema de equações algébricas.	28
Figura 5.5. Aplicação do balanço de conservação em um volume de controle (Maliska, 2004).	29
Figura 6.1. Esquema das proporções geométricas do hidrociclone (Marins, 2010).	32
Figura 6.2. Geometria do hidrociclone no programa DesignModeler.	32
Figura 6.3. Geometria do hidrociclone criado no DesignModeler (detalhe para a região das duas entradas).	33
Figura 6.4. Software ICEM-CFD, detalhe para os blocos estruturados.	34
Figura 6.5. Geração da malha no ICEM-CFD.	34
Figura 6.6. Detalhe do refinamento na região do vortex core. (A) Malha 1, (B) Malha 2, (C) Malha 3, (D) Malha 4.	36
Figura 7.1. Gráfico comparativo das velocidades tangenciais para o teste de malha.	39
Figura 7.2. Gráfico comparativo da velocidade tangencial experimental e do simulado: a) Posição 180 mm. b) Posição 200 mm.	40
Figura 7.3. Gráfico comparativo da velocidade tangencial experimental e do simulado: a) Posição 220 mm. b) Posição 320 mm.	41
Figura 7.4. Gráfico comparativo da velocidade tangencial experimental e do simulado: a) Posição 440 mm. b) Posição 600 mm.	41
Figura 7.5. Plano do perfil de velocidade tangencial do fluido	42
Figura 7.6. Plano do perfil de pressão do hidrociclone.	43
Figura 7.7. Linhas de corrente para o escoamento do óleo como fase dispersa.	44
Figura 7.8. Fração volumétrica de óleo no plano vertical XY.	44
Figura 7.9. Linearização para encontrar parâmetro n (Modelo Lagrangeano).	45
Figura 7.10. Relação entre os diâmetros das gotas e respectivas eficiências (Modelo Lagrangeano).	46
Figura 7.11. Linearização para encontrar parâmetro n (Modelo Euleriano).	47
Figura 7.12. Relação entre os diâmetros das gotas e respectivas eficiências (Modelo Euleriano).	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.1. Dimensões do hidrociclone empregado neste estudo.	31
Tabela 6.2. Parâmetros utilizados para o teste de malha e quantidade de elementos.	35
Tabela 6.3. Condições de contorno utilizadas nas simulações do modelo Euleriano.	38
Tabela 7.1. Resultado dos parâmetros do teste de malha.	39
Tabela 7.2. Comparação dos valores experimentais e da simulação para a pressão na entrada (P_i) e a razão entre as quedas de pressão (DPR)	43
Tabela 7.3. Distribuições de tamanhos de gotas empregadas neste trabalho.	48
Tabela 7.4. Eficiências obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas (fina, média e grossa).	49

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Um campo de exploração de petróleo com o passar do tempo, se torna um campo maduro e a consequência disso é o aumento da produção de água. Em um campo de produção novo, aproximadamente de 5 a 15% do volume produzido é água, entretanto ao longo da produção e o esgotamento econômico do poço, ou seja, a maturação do mesmo, o volume de água pode atingir uma faixa entre 75 a 90%.

O óleo extraído não contém somente água, além disso, há gás dissolvido e materiais particulados que precisam ser removidos antes do processo de refino. Existem, então, processos de separação para essas diferentes fases, que encontram-se em uma Planta de Processamento Primário do Petróleo. Essa planta tem a finalidade de separar o gás, sob condições operacionais controladas, e remover a água, sais e outras impurezas, tornando o óleo adequado para ser transferido à refinaria (Freitas, 2007).

Os equipamentos tradicionalmente utilizados no tratamento de águas oleosas em plataformas de produção são separadores gravitacionais, conhecidos como separadores de produção (separador gás/óleo/água). Nesses equipamentos, o campo gravitacional é usado para promover a separação água-óleo. Entretanto, devido à pequena diferença entre as densidades do óleo e da água, esses separadores possuem uma velocidade terminal pequena. As baixas velocidades terminais e os elevados volumes produzidos exigem altos tempos de residência para que a separação produza os níveis de concentração oleosa determinados pelos órgãos de controle ambiental.

A água produzida na exploração do petróleo pode ser reinjetada no poço ou lançada ao mar, entretanto, a mesma deve passar por tratamento para se adequar aos padrões definidos pelo órgão regulador brasileiro. O CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, determina, dentre outros critérios, que "o descarte de água produzida deverá obedecer à concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L" (CONAMA 393, 2007).

Com objetivo de reduzir o tempo de separação água-óleo, os hidrociclones foram introduzidos na indústria do petróleo para separação de águas oleosas no início da década de 1970. A equipe liderada pelo Prof. Martin Thew, da Universidade de

Southampton (Inglaterra), foi a pioneira em realizar estudos para essa aplicação do hidrociclone.

Hidrociclones usam campos centrífugos para promover a separação, que podem ser até alguns milhares de vezes maiores que o campo gravitacional usado nos separadores gravitacionais. Portanto, esses equipamentos conseguem produzir eficiências elevadas em pequenos tempos de residência, ocupando uma pequena área (*floor space*), sem onerar a carga total da plataforma. Além disso, hidrociclones não têm partes móveis, sendo de baixo custo de manutenção e fácil operação (Leahy-Dios, 2003).

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar os perfis de velocidade e eficiência de separação de um hidrociclone projetado para separação de águas oleosas, baseado nos dados experimentais obtidos por Marins *et al.* (2007), utilizando distintas dispersões com diferentes distribuições de gotas de óleo em água. O estudo foi realizado através de simulações aplicando os conceitos de escoamento da Fluidodinâmica Computacional (CFD).

2. HIDROCICLONES

Hidrociclones são equipamentos separadores simples que separam as fases envolvidas através da diferença de densidade. O equipamento é constituído de uma parte cilíndrica que é conectado a uma parte cônica. A alimentação é feita por um tubo que tangencia a parede lateral da parte cilíndrica. As duas saídas do separador estão posicionadas axialmente ao equipamento, uma delas situada próxima à seção de alimentação, chamada *overflow*, e a outra situada numa seção afastada da seção de alimentação, próxima ao vértice do corpo cônico do hidrociclone, chamada *underflow*.

O fluido entra no hidrociclone tangencialmente girando com intensidade na seção cônica. O escoamento em forma de redemoinho, combinado com a diferença de densidade entre as duas fases, causa a separação da fase dispersa da fase contínua. A fase menos densa migra para o eixo do hidrociclone, onde o gradiente de pressão reverso provoca a saída deste fluido através do *overflow*. A fase mais densa migra em direção à parede do hidrociclone, onde eventualmente sai através do *underflow* (Figura 2.1).

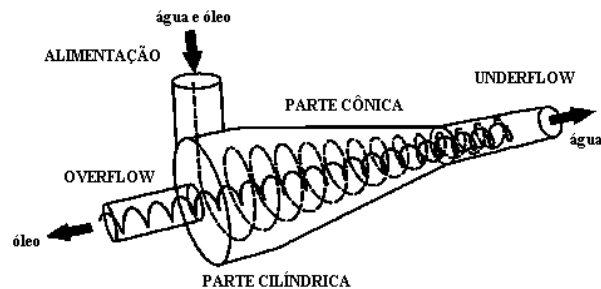


Figura 2.1. Princípio de funcionamento de um hidrociclone (Husveg, 2007)

Os hidrociclones são equipamentos versáteis, pois podem ser utilizados como separadores tanto para suspensões diluídas quanto concentradas, e as partículas dispersas podem ser sólidas, líquidas ou bolhas de gás. Eles também são usados como clarificadores, concentradores e equipamento de lavagem, podendo ainda funcionar como desgaseificadores e classificadores (Heiskanen, 1993).

No caso de separação líquido-líquido é importante saber as propriedades da fase dispersa e a fase contínua. Se o componente mais denso for a fase dispersa, por exemplo água dispersa em óleo, a maior parte do fluxo deixa o hidrociclone através do tubo de *overflow*, como no projeto convencional (separação sólido-líquido). Se o componente mais leve está disperso no mais denso, como por exemplo, óleo disperso em água, neste caso, a maior parte do fluxo deve deixar o hidrociclone através do orifício de *underflow*.

Os hidrociclones apresentam grandes vantagens em relação a outros equipamentos de separação, dentre as quais podem-se destacar (Medronho, 2004).

- Eles são simples de construir ou baratos;
- Os custos de instalação e operacional são baixos, principalmente por não terem partes móveis;
- Requer um espaço extremamente pequeno para operar, comparando-se com um sedimentador, por exemplo;
- São versáteis em suas aplicações, sendo usado em separação sólido/líquido, sólido/sólido, gás/líquido, gás/sólido e líquido/líquido.

Já as elevadas forças cisalhantes que ocorrem devido ao escoamento, podem ser uma desvantagem quando analisado para uma separação líquido-líquido, pois quebram as gotas dispersas, diminuindo assim a eficiência de separação.

2.1. Aplicação na Indústria do Petróleo

Na indústria do petróleo, principalmente na produção em alto mar (*offshore*), onde o preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado, a busca por separadores compactos e eficientes tem sido uma constante e os hidrociclones se enquadram nessa classe de equipamentos. O petróleo, quando produzido, carrega também gás, sólidos e água. Essas “impurezas” precisam ser separadas. Um esquema típico de uma planta de processamento primário de petróleo

contém separadores gravitacionais, separador eletrostático e o sistema de tratamento de água. Nesta última etapa do processo destacam-se os hidrociclones e flotadores (Marins, 2007).

Hidrociclones são objetos de pesquisa há muito tempo. Entretanto, somente alguns anos atrás, o equipamento começou a ser utilizado industrialmente (Freitas, 2009). Devido ao tamanho reduzido em relação aos tradicionais separadores e pelas vantagens citadas anteriormente, sistemas compactos de hidrociclones já estão sendo utilizadas em plataformas offshore (Figura 2.2).



Figura 2.2. Exemplo de um sistema compacto de hidrociclones em plataforma offshore.

O alto preço do petróleo no mercado e as rígidas legislações ambientais impulsionam as pesquisas por diferentes geometrias e aplicações de hidrociclones. Devido a sua versatilidade, o hidrociclone é um dos poucos equipamentos que conseguem remover pequenas gotículas de óleo dispersas na água produzida, apesar do pequeno diâmetro dessas gotículas e, muitas vezes, da reduzida diferença de densidade entre o óleo e a água.

Segundo Oliveira (2000), sob o ponto de vista das regiões de produção e das estações de transferência, a presença de emulsões do tipo água em óleo (A/O) causa, dentre outros problemas, a elevação dos custos de movimentação dos petróleos, devido ao aumento da sua viscosidade aparente. Entende-se por emulsão uma mistura estável de dois líquidos imiscíveis, onde uma fase dispersa encontra-se na forma de gotículas

em uma fase contínua. No caso das refinarias, as emulsões de petróleo causam problemas ainda mais sérios, tais como a corrosão dos equipamentos e a diminuição do valor comercial das frações mais pesadas, devido à elevação do teor de cinzas, resultante da presença de sais dissolvidos na água emulsionada.

2.2. Eficiência do Hidrociclone em Separação Líquido-Líquido

Os principais conceitos utilizados para avaliar a eficiência de separação em um hidrociclone são: eficiência granulométrica, razão de fluido, eficiência total, além das curvas de distribuição de tamanhos.

A eficiência granulométrica (G) é a razão entre a vazão mássica de gotículas de óleo de um dado tamanho (d) recolhida no overflow (W_{go}) e a vazão mássica das gotículas de óleo deste mesmo tamanho na alimentação (W_g).

$$G(d) = 100 \times \frac{W_{go}(d)}{W_g(d)} \quad (2.1)$$

A razão de fluido (R_f) é um parâmetro que relaciona a vazão mássica de água coletada no overflow (W_{lo}) e a vazão mássica de água alimentada no hidrociclone (W_l).

$$R_f = \frac{W_{lo}}{W_l} \quad (2.2)$$

A Figura 2.3 mostra uma curva típica de eficiência granulométrica para hidrociclones, apresentando uma eficiência mínima de 10%, o que geralmente equivale à razão de fluido.

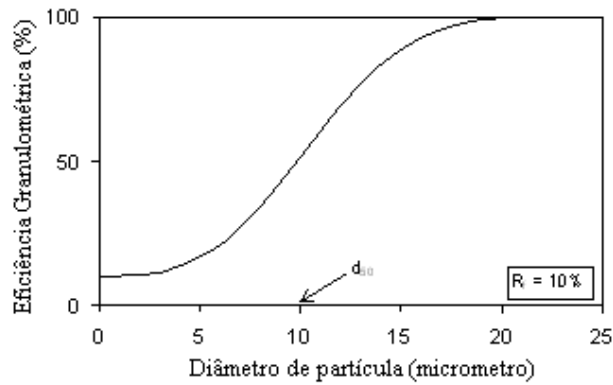


Figura 2.3. Curva de eficiência granulométrica com $R_f = 10\%$ (Medronho, 2004)

A eficiência granulométrica reduzida (G') considera somente a quantidade de óleo coletada no overflow pela ação centrífuga do hidrociclone, ou seja, desconsiderando-se o óleo enviado ao overflow apenas pelo efeito divisor de vazões. A eficiência granulométrica reduzida pode ser representada pela Equação 2.3.

$$G' = \frac{(G - R_f)}{(1 - R_f)} \quad (2.3)$$

onde: G' = Eficiência Granulométrica Reduzida

G = Eficiência granulométrica

R_f = Razão de fluido

A Figura 2.4 mostra a curva de eficiência granulométrica reduzida, iniciando em 0%, destacando o d_{50} . O d_{50} é o diâmetro de corte que de certa forma representa o poder de separação do hidrociclone em 50% de eficiência.

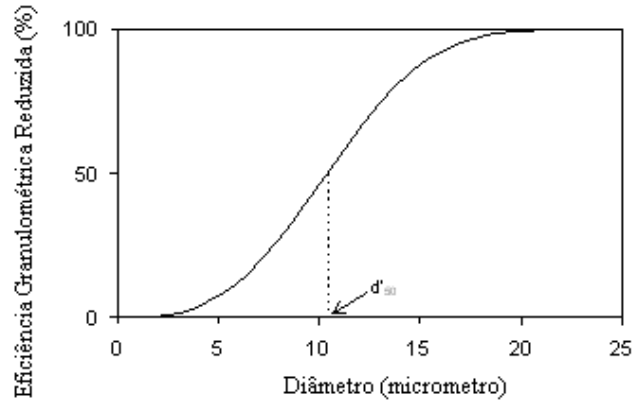


Figura 2.4. Eficiência granulométrica reduzida e diâmetro de corte reduzido (Medronho, 2004).

Uma distribuição de tamanho das partículas pode ser representada pela Equação 2.4 de Rosin-Rammler, e a eficiência granulométrica reduzida por uma equação de Rosin-Rammler modificada (Equação 2.5):

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{k} \right)^m \right] \quad (2.4)$$

$$G' = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{d}{d'_{50}} \right)^n \right] \quad (2.5)$$

onde, y é a distribuição cumulativa para um dado tamanho de partícula; k , m e n são parâmetros e d'_{50} é o diâmetro de corte reduzido.

A eficiência total de um hidrociclone para qualquer distribuição de partículas é dada pela Equação 2.6.

$$E'_T = \int_0^1 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{k (-\ln(1-y))^{\frac{1}{m}}}{d'_{50}} \right)^n \right] dy \quad (2.6)$$

2.3. Perfis de Velocidade

Os perfis de velocidade no interior de um hidrociclone são complexos devido ao escoamento turbulento, porém, são importantes para avaliar o bom funcionamento do equipamento. A velocidade global pode ser decomposta em três componentes como visto na Figura 2.5: velocidade tangencial, velocidade axial e velocidade radial.

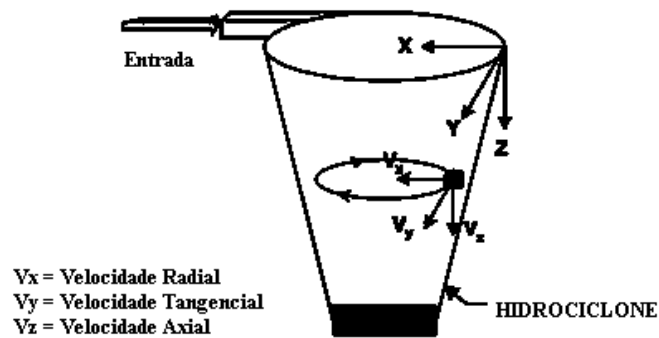


Figura 2.5. Componentes da velocidade global do hidrociclone.

Dentre as três componentes, a velocidade tangencial merece um maior destaque, por ter relação com a pressão dentro do hidrociclone. Segundo Nascimento (2008), devido ao escoamento turbilhonar nos hidrociclones, a pressão estática aumenta radialmente. Este efeito é determinado pela distribuição da velocidade tangencial no escoamento e constitui a maior contribuição à queda total de pressão através de um hidrociclone em operação. Como consequência, as distribuições de velocidade tangencial podem ser estimadas através de medidas simples de pressão estática radial. A velocidade tangencial aumenta a partir da parede com o decréscimo do raio, passando então, por um máximo, diminuindo na direção do núcleo central (Figura 2.6).

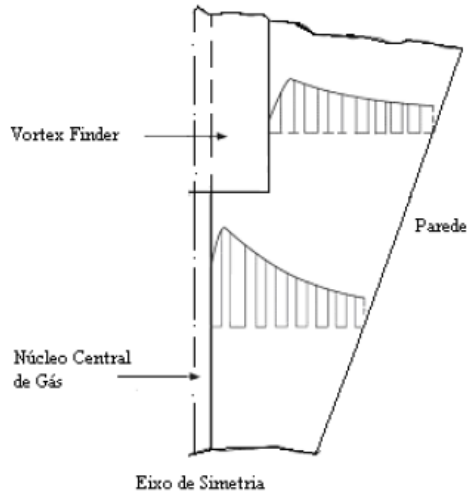


Figura 2.6. Perfil de velocidade tangencial no hidrociclone (Svarovsky, 1990).

As Figuras 2.7a e 2.7b representam os perfis de velocidade axial e radial, respectivamente no interior de um hidrociclone. A velocidade axial tanto na porção cônica quanto na cilíndrica apresenta um fluxo descendente próximo à parede. Já na região central, o fluxo é ascendente. A velocidade radial é decrescente com o decréscimo do raio, e acima da borda do *vortex finder* e próximo ao topo do hidrociclone há fortes velocidades radiais em direção ao centro e à base do *vortex finder*.

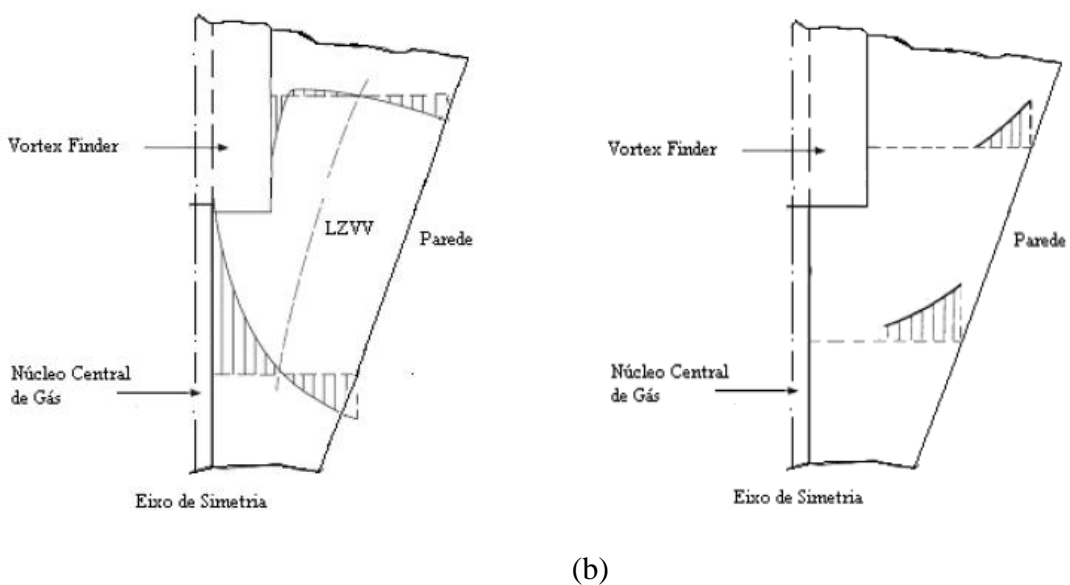


Figura 2.7. a) Perfil de velocidade axial. b) Perfil de velocidade radial (Svarovsky, 1990).

3. MODELOS MATEMÁTICOS

3.1. Equações de Conservação

Uma modelagem matemática parte do princípio que a natureza dos fenômenos físicos de um determinado processo deve ser entendida, determinando quais grandezas físicas atuam no sistema e como elas o afetam. Isso pode ser realizado através de ensaios experimentais em laboratório, ou por modelos teóricos matemáticos.

As equações básicas que descrevem os fenômenos relacionados com escoamento de fluidos são definidas pelas leis físicas de conservação de massa e de quantidade de movimento. De acordo com Almeida (2009), a hipótese do contínuo é considerada, ou seja, o fluido é considerado um meio contínuo e todas as propriedades do fluido são funções contínuas do espaço e do tempo.

A Equação 3.1 representa a equação de conservação de massa em coordenadas cartesianas ou retangulares, também chamada de equação da continuidade. Essa equação é originada por um balanço entre taxa líquida de fluxo de massa para fora da superfície de controle e a taxa de variação de massa dentro do volume de controle, podendo ser definida também como notação vetorial (Equação 3.2).

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (3.2)$$

A equação da conservação de movimento também é obtida através de um balanço da quantidade de momento linear que entra e sai de um volume de controle e das forças externas que agem sobre o volume de controle. A equação de movimento é a segunda lei de Newton, onde as forças são representadas pelas tensões sobre o volume de controle (Equação 3.3).

$$\frac{\vec{F}_i}{V} = m\vec{a} \therefore \frac{\vec{F}_i}{V} = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (3.3)$$

Onde:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \quad (3.4)$$

A Equação 3.5 mostra que a equação de conservação do movimento representa o somatório das forças que atuam em um volume de controle.

$$\vec{F}_i = \vec{F}_p + \vec{F}_v + \vec{F}_g \quad (3.5)$$

Na equação acima, \vec{F}_i representa as forças de inércia, \vec{F}_p as forças de pressão, \vec{F}_v as forças viscosas e \vec{F}_g as forças de campo. As Equações (3.6), (3.7) e (3.8) representam respectivamente as forças citadas acima.

$$\frac{\vec{F}_p}{V} = -\vec{\nabla}P \quad (3.6)$$

$$\frac{\vec{F}_v}{V} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \quad (3.7)$$

$$\frac{\vec{F}_g}{V} = \rho \vec{g} \quad (3.8)$$

Substituindo as Equações (3.3), (3.6), (3.7) e (3.8) na Equação (3.5) obtém-se a equação geral do movimento (Equação 3.9).

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\vec{\nabla}P - \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (3.9)$$

3.2. Modelo Lagrangeano

Em uma abordagem lagrangeana, a fase contínua é tratada utilizando uma metodologia clássica como o método de volumes finitos enquanto o movimento das gotas é resolvido acompanhando-se muitos *parcels* (partículas representando um pequeno grupo de partículas/gotas/bolhas com as mesmas características) pelo domínio (Almeida, 2009).

A solução do movimento da fase fluida discreta é obtida calculando-se a velocidade local do grupo de partículas na posição atual, usando a velocidade calculada e um passo de tempo de referência na Equação 3.10, definindo-se a sua nova posição. Essas etapas são repetidas até que o parcel deixe o domínio ou atinja o número limite de cálculos.

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} |u_i - v_i| (u_i - v_i) + \frac{F_i}{m_p} \quad (3.10)$$

onde v_i é a velocidade da fase fluida discreta (Lagrangeana), F_i é a soma das forças na direção i (além da força de arraste), C_D é o coeficiente de arraste, m_p é a massa da gota ρ_p é a densidade da fase fluida discreta, d_p é o diâmetro de gota e Re é o número de Reynolds relativo entre as fases contínua e dispersa.

Em geral o modelo lagrangeano é mais adequado quando ocorrem escoamentos com concentrações diluídas da fase dispersa, livre de difusão numérica, menos influenciado por outros erros e mais estáveis para grandes gradientes de velocidade da partícula.

3.3. Modelo Euleriano

O modelo euleriano considera ambas as fases como fases contínuas, bem como a influência de uma das fases no escoamento das demais. Em cada uma das fases as equações de conservação são escritas para a massa, momento e energia da nuvem de partículas como um contínuo, e integradas para prever as propriedades volumétricas médias do campo.

Um inconveniente da modelagem euleriana é que, mesmo para uma única fase dispersa, o custo computacional é bem mais elevado do que para uma abordagem lagrangeana. Isso porque para cada fase se resolve um conjunto completo de equações de balanço.

Esse modelo vem sendo usado em muitas simulações, como por exemplo, em aplicações de leito fluidizado, onde adequam-se especialmente bem. No entanto, modelos eulerianos não são capazes de tratar diversos tamanhos de partículas diretamente em uma única fase, mas sim considerando cada classe de tamanho como uma fase distinta. Isso caracteriza uma séria desvantagem em problemas práticos, uma vez que várias fases seriam necessárias para representar uma ampla faixa de tamanhos de partículas, aumentando significativamente o custo computacional.

4. MODELOS DE TURBULÊNCIA

Escoamentos turbulentos são comuns no dia a dia, exemplo disso são os escoamentos ao redor de veículos e aviões, escoamento dos gases de combustão de um motor. Em hidrociclones, o escoamento turbulento é inerente ao redemoinho gerado no interior do equipamento devido a sua geometria.

A turbulência é um processo complexo que gera instabilidade no escoamento. Segundo Hinze (1959), são características importantes de um escoamento turbulento:

- Altos números de Reynolds;
- Altamente irregulares: As flutuações turbulentas são aparentemente randômicas, sem que haja um perfil determinável das propriedades turbulentas ao longo do escoamento;
- Tridimensionais: As flutuações turbulentas ocorrem em todas as direções do escoamento, na maioria das vezes de forma anisotrópica;

- Alto grau de vorticidade: O escoamento turbulento é caracterizado pela intensa presença de turbilhões, que se formam e se dissipam continuamente;
- Comportamento dissipativo. A energia perdida é convertida irreversivelmente a energia interna do fluido;

Um modelo de turbulência é um conjunto de equações, expressões, e coeficientes empíricos que permitem a determinação dos termos extras nas equações de Navier-Stokes de média de Reynolds, chamadas as tensões de Reynolds e os fluxos térmicos turbulentos nas equações de energia de média de Reynolds. O modelo de turbulência é usado na solução numérica das equações de Navier Stokes e de energia de média de Reynolds, permitindo-se a simulação de aspectos importantes de escoamentos turbulentos encontrados em engenharias (Su, 2006).

Os modelos de turbulência disponíveis e empregados para a solução dos problemas de engenharia são (Freitas, 2009):

- Modelos algébricos
- Modelos diferenciais de duas equações
- Modelos diferenciais de quatro equações (k- ϵ de múltipla escala)
- Modelos que não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta (modelos de tensão de Reynolds ou *Reynold Stress Model - RSM*).

Neste trabalho serão abordados somente o modelo k- ϵ e o modelo de tensão de Reynolds (RSM), por serem os mais utilizados em simulações envolvendo CFD.

4.1. Modelo k- ϵ

O modelo k- ϵ é um modelo de turbulência simples, apropriado para escoamentos onde os efeitos de convecção e difusão são relevantes, como por exemplo, no caso de recirculações. Tem um excelente desempenho em muitos escoamentos industriais relevantes, boa estabilidade e, é o modelo de turbulência mais extensamente validado.

O modelo k-ε possui duas equações, uma para k (energia cinética turbulenta) e outra para ε (dissipação da energia cinética turbulenta). A equação da continuidade e a equação de momento ficam representadas, respectivamente, pelas Equações (4.1) e (4.2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{V}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{V})^T + \mathbf{B} \quad (4.2)$$

sendo: B = a soma das forças que atuam no corpo,

μ_{eff} = a viscosidade efetiva devida à turbulência

p' = pressão modificada.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \bar{\nabla} \cdot \mathbf{V} \quad (4.3)$$

O modelo k-ε, um modelo a zero equação, é baseado no conceito de viscosidade turbulenta, no qual $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, sendo μ_t a viscosidade turbulenta. Este modelo supõe que a viscosidade turbulenta é função da energia cinética turbulenta e a dissipação. A Equação (4.4) representa esta relação.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

onde C_μ - constante do modelo de turbulência k-ε [adimensional]

k - energia cinética turbulenta por unidade de massa;

ε - taxa de dissipação turbulenta.

As desvantagens para esse modelo de turbulência é a baixa performance em casos de escoamentos não confinados, escoamentos com altos valores de tensão extra (camada limite com curvas), escoamentos rotacionais, e em escoamentos plenamente desenvolvidos em dutos não circulares.

4.2. Modelo RSM

O modelo de turbulência clássico mais complexo é Modelo dos Tensores de Reynolds (*Reynolds Stress Model* - RSM), também conhecido como modelo de fechamento de segunda ordem ou de segundo momento. Ele modela todos os componentes do tensor de Reynolds, melhorando o cálculo de efeitos direcionais existentes no escoamento turbulento. Assim, o modelo apresenta bons resultados para escoamentos complexos, pois incluem efeitos de curvatura, mudanças repentinas na taxa de cisalhamento, escoamentos secundários e empuxo. Portanto, é o modelo mais utilizado para simulações em hidrociclone, devido a complexidade do escoamento.

A Equação (4.5) mostra a quantidade de movimento para a velocidade média (Leahy-Dios, 2003).

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) - \nabla \cdot (\mu \nabla V) = -\nabla p'' - \nabla \cdot (\overline{\rho v \otimes v}) + B \quad (4.5)$$

Onde:

p'' : Pressão modificada;

B: Soma das forças de corpo;

$\overline{\rho v \otimes v}$: Contribuição da flutuação das tensões de Reynolds.

Contrário aos modelos de viscosidade turbulenta, a pressão modificada não contribui para a turbulência, e é relacionada à pressão estática pela Equação (4.6).

$$p'' = p + \nabla \cdot V \left(\frac{2}{3} \mu - \xi \right) \quad (4.6)$$

onde:

p: Pressão estática;

ζ : Viscosidade bulk.

Esses modelos podem ser apresentados sob a forma algébrica ou diferencial; na forma diferencial as equações são resolvidas individualmente para cada componente da tensão de Reynolds. Nessa forma, a equação (4.7) representa a tensão de Reynolds.

$$\frac{\partial \overline{\rho v \otimes v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho v \otimes v \otimes V}) - \nabla \cdot \left(\rho C \frac{\kappa}{\varepsilon} \overline{v \otimes v} (\overline{v \otimes v})^T \right) = P + G + \underline{\underline{\phi}} - \frac{2}{3} \rho \mathcal{E} \quad (4.7)$$

onde:

P: Produção de turbulência devido ao cisalhamento;

G: Produção de turbulência devido a empuxo;

$\underline{\underline{\phi}}$: Correlação pressão-deformação;

C: Constante do modelo.

As principais desvantagens desse modelo são o alto esforço computacional e apresentam uma performance tão pouco eficiente quanto o modelo k- ε para alguns escoamentos, como jatos assimétricos ou escoamentos não confinados com recirculação.

5. FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL

A Fluidodinâmica Computacional ou dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* — CFD) pode ser descrita de forma generalizada como a simulação numérica de todos aqueles processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento de fluidos. A predição dos campos de concentração, velocidades, pressão, temperaturas e propriedades turbulentas, são efetuadas através de modelos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo.

As equações de Navier-Stokes são utilizadas em fluidodinâmica computacional para prever o escoamento de fluidos. As equações são derivadas parciais que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento. Estas equações

diferenciais foram descritas no início do século XIX e não possuem soluções gerais analíticas, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

Nos casos de escoamentos laminares, os modelos são relativamente simples, pois as equações de Navier-Stokes podem ser resolvidas. Entretanto, a maioria dos escoamentos que acontecem na natureza e no meio industrial são turbulentos, e estes têm um alto grau de complexidade. Nesses casos as soluções para a equação de Navier-Stokes são frequentemente encontradas com a ajuda de computadores, justificando a utilização do CFD.

Conforme Souza Neto *et al.* (2005), a Fluidodinâmica Computacional auxilia na compreensão de eventos físicos no escoamento dos fluidos num domínio particular. A simulação em CFD direciona a uma solução aplicando a discretização das equações diferenciais parciais de transporte (momento, massa e energia) que descreve o escoamento.

Além disso, a utilização de CFD reduz o número de experimentos que não podem ser estudados em laboratório de forma prática, sendo possível então analisar numericamente diversos parâmetros relevantes ao problema em questão. Tais parâmetros podem ser alterados até que o resultado da simulação atenda às exigências necessárias.

De acordo com Almeida (2009) as diversas vantagens do uso de CFD em projetos de sistemas fluidos em relação à abordagem baseada unicamente em experimentos são:

- Redução significativa nos prazos de entregas e custos de novos projetos;
- Possibilidade de estudar sistemas onde experimentos controlados são difíceis e/ou impossíveis de serem realizados (ex. sistemas muito grandes);
- Possibilidade de estudar sistemas sob condições perigosas (ex. estudos de segurança e cenários de acidentes);

- Nível praticamente ilimitado de detalhes nos resultados (variando o custo computacional com o nível de detalhamento desejado).

Deve-se ter em mente que as simulações não são 100% realistas, visto que há uma série de erros em uma simulação que desviam o resultado numérico do exato. Dentre esses erros, pode-se citar (Nascimento, 2008):

- Erros de modelagem (simplificação de modelos, aproximações de condições de contorno ou uso de modelos impróprios para representar o fenômeno físico);
- Erros de arredondamento (operações matemáticas que formam dízimas periódicas ou números reais com casas decimais infinitas necessitam ser arredondados, podendo gerar erros de arredondamento);
- Erros de convergência (associados à diferença entre o valor obtido e o real);
- Erros de discretização (associados à malha computacional utilizada).

CFD é interpretada como uma ferramenta numérica, sendo utilizada em experimentos numéricos de forma a auxiliar no estudo de características fundamentais do escoamento. Porém, como se trata de uma descrição numérica do escoamento, os resultados de CFD são válidos apenas enquanto os modelos físicos incorporados nas equações e nas condições de contorno forem válidos, e, portanto são sujeitos a erros, principalmente em se tratando de escoamentos mais complexos, como os turbulentos. Assim como a precisão de dados experimentais depende da qualidade das ferramentas utilizadas, a precisão das soluções numéricas é dependente da qualidade das discretizações utilizadas. Além disso, os mais diversos erros associados ao algoritmo utilizado para a obtenção da resposta numérica comprometem a precisão e validade dos resultados obtidos (Anderson, 1995).

Segundo Hargreaves e Silvester (1990), no uso de Fluidodinâmica Computacional, a seguinte sequência de passos deve ser considerada:

- a) Decidir as fronteiras do objeto ou espaço a ser analisado;
- b) Dividir este volume de controle em células ou elementos apropriados;
- c) Decidir as condições de contorno nas fronteiras do volume de controle;

- d) Resolver o conjunto de equações de conservação;
- e) Estocar os resultados para todas as variáveis de interesse;
- f) Validar testes experimentais através dos resultados da simulação.

5.1 Etapas de uma simulação em CFD

As simulações realizadas em um pacote de softwares em CFD seguem a seguinte sequência como demonstrado na Figura 5.1.

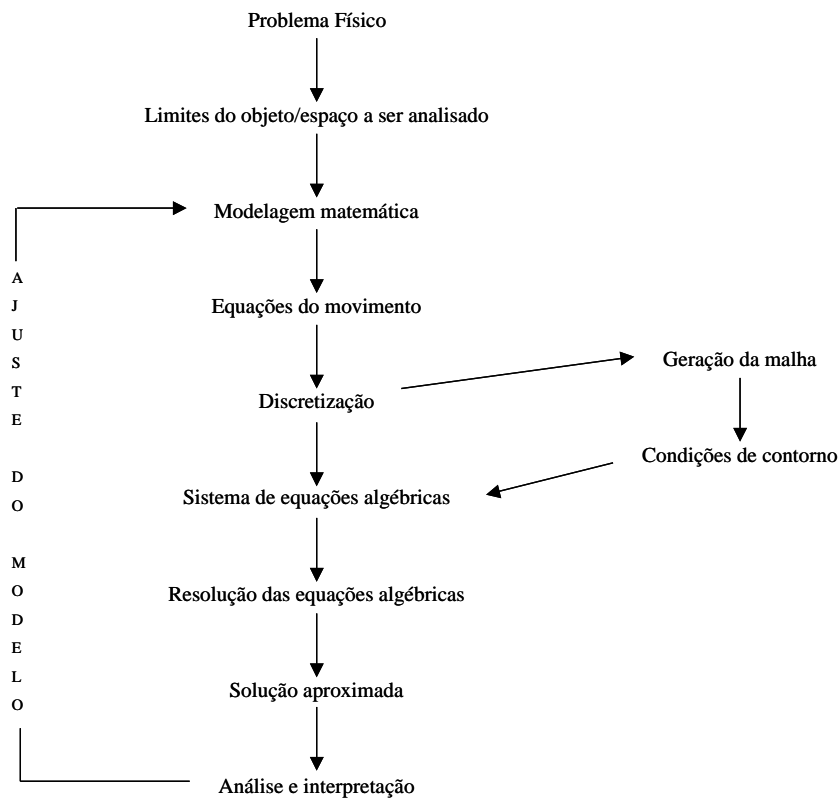


Figura 5.1. Etapas da resolução de problemas em CFD (Leahy-Dios, 2003).

Em geral, uma simulação em CFD pode ser dividida em basicamente três etapas principais: pré-processador; solver; e pós-processador.

5.1.1. O Pré-Processador

O pré-processador é a primeira parte da simulação. Essa etapa consiste em estudar e entender os problemas físicos envolvidos no processo, as variáveis do problema, a geometria a ser utilizada, o escoamento do fluido, entre outros fatores. A primeira etapa para iniciar uma simulação em CFD é criar a geometria. Os modelos físicos são expressos na forma de equações e definido na região, chamada de domínio, onde elas são válidas. Dependendo do escoamento em questão, é possível escolher entre os sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas, esféricas, curvilíneas, ortogonal e não-ortogonal, que podem ser fixos ou em movimento.

O domínio definido é então discretizado, sendo dividido em sub-regiões, ou elementos, onde serão obtidas as soluções para as equações em questão. O conjunto dos elementos presentes é chamado de malha ou *grid*. O tipo e complexidade do escoamento e geometria são fatores essenciais na escolha da malha a ser utilizada na resolução do problema. São introduzidas então condições de contorno, condições iniciais, propriedades físicas do fluido e parâmetros do escoamento para cada elemento da malha (Leahy-Dios, 2003).

5.1.2. O Solver

A segunda etapa consiste na resolução das equações definidas no pré-processador. O solver tem a função de resolver, através de métodos numéricos, uma ou mais equações diferenciais substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita em cada volume de controle. Quando não é possível a solução analítica, pode-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, para um número discreto de pontos, com um determinado erro. Mais perto da solução exata será a solução numérica quanto maior o número de pontos (Maliska, 2004).

A resolução das equações é realizada até que se atinja a convergência estipulada ou o número de iterações definidas. Durante a simulação é possível acompanhar a resolução das equações, visualizando através de gráficos os resíduos do sistema, fechamento do balanço de massa e energia, além de outras variáveis que podem ser definidas pelo usuário.

Nessa etapa a configuração do computador tem muita importância. A utilização de processadores modernos e rápidos diminui o esforço computacional na resolução do problema, obtendo-se assim, repostas mais rápidas para o estudo.

5.1.3. O Pós Processador

A última etapa de uma simulação em CFD é a análise dos resultados obtidos. Os softwares existentes permitem ao usuário uma ampla quantidade de ferramentas para analisar os resultados como a construção de gráficos, vetores e perfis de velocidade, pressão, concentração, temperatura, entre outros. A dinâmica do software também possibilita comparar várias simulações obtidas, visualizar trajetórias de partículas, linhas de corrente, criar animações para entender melhor o fenômeno, importar e exportar dados de outros programas como o Microsoft Excel.

A análise dos resultados nessa etapa é importante para verificar se a simulação obtida foi satisfatória e que as condições de contorno, modelos e/ou a malha foram escolhidos corretamente.

5.2. Tipos de Malha

A representação discreta do domínio geométrico em que o problema em questão é resolvido é denominada de malha ou *grid*. O domínio a ser estudado é subdividido em pequenos volumes, que são domínios menores, onde as equações dos balanços serão aplicadas. As equações que descrevem o fenômeno físico do problema são resolvidas em cada volume, e a solução de um volume é utilizada como condição de contorno para o volume vizinho.

O avanço computacional nos últimos anos possibilitou que diversos tipos de malha fossem criados para representar uma solução do problema cada vez mais condizente com a realidade. As malhas são divididas basicamente em dois grupos que são caracterizados pela conectividade dos pontos: malhas estruturadas e malhas não estruturadas.

5.2.1. Malha Estruturada:

As malhas estruturadas são malhas localmente ortogonais que obedece a um sistema coordenado. Cada ponto do interior da malha é adjacente ao mesmo número de elementos. A posição de qualquer ponto da malha é identificada unicamente por dois índices (i, j) ou três índices (i, j, k) , para problemas em duas e três dimensões, respectivamente, podendo ser facilmente armazenados em uma matriz (Figura 5.2).

O fato de conhecer os elementos vizinhos através de expressões simples traz um número enorme de vantagens na hora de programar um código. Facilita o cálculo dos balanços, diminui o número de acessos à memória, diminui a própria quantidade de memória necessária, entre outros fatores (Aguirre, 2010). Esse tipo de malha é facilmente gerada, porém existe uma limitação para o uso da mesma em geometrias mais complexas.

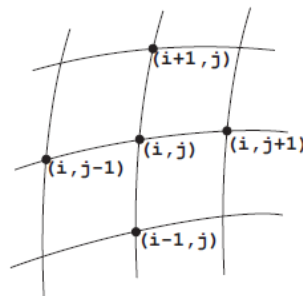


Figura 5.2. Exemplo de organização dos pontos de uma malha estruturada (Galante, 2006).

5.2.2. Malha não estruturada

Para as malhas não estruturadas não existe restrição ao número de elementos vizinhos a um determinado elemento. Devido a esse fato, de ser mais flexível, esse tipo de malha geralmente é utilizado em geometrias mais complexas, pois pode ser utilizado em qualquer domínio estabelecido (Figura 5.3).

Segundo Aguirre (2010) o uso da malha não estruturada faz com que o código a ser programado seja mais complexo. Também impõem que se tenha que acessar a matriz de conectividade várias vezes, aumentando o número de operações na máquina

em relação à malha estruturada. Essas são algumas desvantagens. Além dessas, geralmente o uso de malhas não estruturadas gera elementos vizinhos muito distantes.

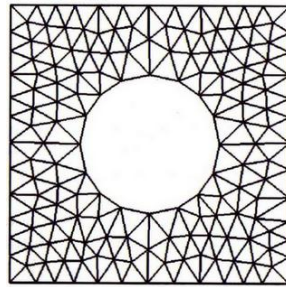
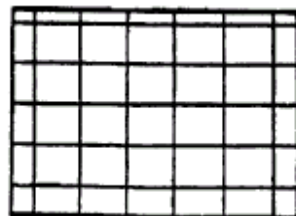


Figura 5.3. Exemplo de uma malha não estruturada com elementos triangulares (Aguirre, 2010).

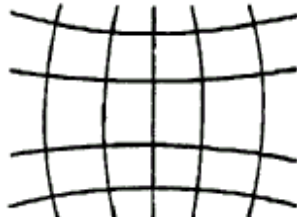
5.2.3. Tipos de Elementos

Definido o tipo de malha a ser usada, com base nos fenômenos físicos do problema, defini-se o tipo de elemento a ser usado. No trabalho de Leahy-Dios (2003), o autor referencia os autores Hargreaves e Silvester (1990) que fazem uma definição completa dos elementos disponíveis para elaboração de uma malha:

- a. Elementos retangulares cercadas por paredes retangulares – esse tipo de malha é utilizado principalmente em geometrias simples, com contornos retangulares. Seu uso em geometrias mais complexas implica no desligamento de alguns elementos. Porém, mesmo esses elementos são guardados e incluídos formalmente no processo de solução, gerando assim maior consumo de memória computacional que o requerido.



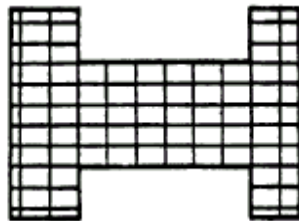
- b. Elementos ortogonais – nesse tipo de malha os elementos não são retangulares, mas são ajustados para que todos os ângulos de canto sejam retos.



- c. Elementos não-ortogonais – Os elementos nessa malha têm ainda menos restrições que os elementos ortogonais, já que os ângulos não são fixados, porém os limites externos devem ser topologicamente ortogonais.



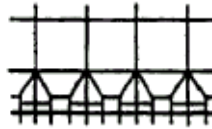
- d. Elementos genéricos – Esses elementos são característicos de malhas não estruturadas, não apresentando as restrições mencionadas acima. É altamente econômico na representação de formas complexas.



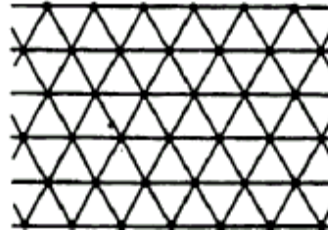
- e. Elementos refinados em bloco – Os elementos dessa malha devem se encaixar na geometria básica e também considerar variações locais na intensidade do campo de escoamento. Esse tipo de refinamento se dá em blocos de uma malha estruturada.



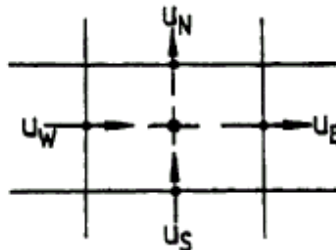
- f. Elementos refinados não estruturados – O refinamento local de malha faz uso das várias opções do ambiente não estruturado.



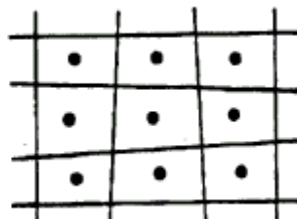
- g. Elementos triangulares – Os elementos dessa malha são triangulares, proveniente de elementos quadriláteros ou hexahédricos. Essa opção é mais flexível quanto ao tipo de geometria utilizada.



- h. Malha Desencontrada – Nessa malha, os elementos são diferentes para diferentes variáveis, garantindo a estabilidade numérica, e sendo usada com a informação de velocidade atribuída a cada lado (2D) ou face (3D) de um elemento. Exige vasta memória e é difícil de ser incorporada em uma malha severamente distorcida.



- i. Malha co-localizada – Esse tipo de malha tem as propriedades avaliadas no mesmo ponto de cada elemento.



5.3. Discretização por Métodos Numéricos

Um método numérico é uma ferramenta utilizada para resolução de equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita (Maliska, 1995). Portanto, o método numérico discretiza o domínio em estudo, transformando as equações diferenciais em um sistema de equações algébricas (Figura 5.4).

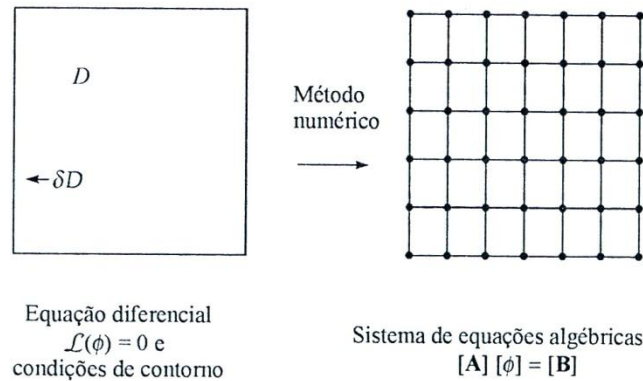


Figura 5.4. Discretização de um domínio D em um sistema de equações algébricas.

Na área de fluidodinâmica computacional existem três métodos para a discretização de um domínio: método por elementos finitos, método por diferenças finitas, e método por volume finito.

5.3.1. Método por Elementos Finitos

O Método por Elementos Finitos (MEF) é um método de análise de modelos matemáticos de problemas físicos em meios contínuos. O método consiste na divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões denominadas de elementos finitos, transformando o contínuo em discreto. Em cada elemento a solução é aproximada por uma função polinomial, o que permite que haja continuidade da solução através das condições de contorno em cada elemento. Após a integração dessas funções é obtido um conjunto de equações algébricas não lineares.

A vantagem do MEF é a fácil aplicação do método em malhas não estruturadas. Devido a cada elemento ser subdivisível, o método numérico consegue discretizar facilmente geometrias arbitrárias e mais complexas.

5.3.2. Método por Diferenças Finitas

O Método por Diferenças Finitas (MDF) baseia-se no princípio de que em cada ponto da malha (nós) a equação de conservação na forma diferencial é aproximada, utilizando, por exemplo, a expansão pela série de Taylor. Com isso, equações algébricas são obtidas em cada ponto da região em que se deseja calcular a solução do problema. O recurso da interpolação polinomial também é utilizado, mas, para calcular valores das variáveis em locais diferentes dos nós da malha.

O MDF é um método simples e eficiente quando utilizado em malhas estruturadas. Entretanto, sua utilização se restringe a apenas geometrias simples.

5.3.3. Método por Volumes Finitos

O Método por Volumes Finitos (MVF) é caracterizado pela utilização da forma integral das equações de conservação. Essas equações são aplicadas no centróide de cada um dos finitos volumes de controle gerados com a subdivisão do domínio (Figura 5.5).

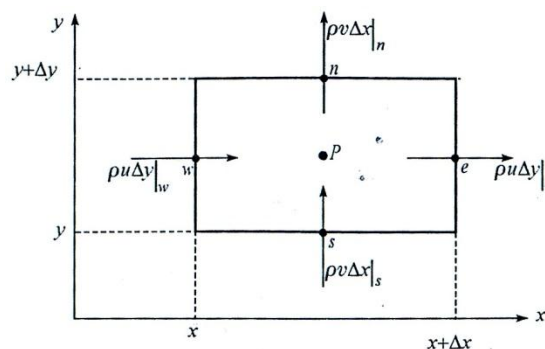


Figura 5.5. Aplicação do balanço de conservação em um volume de controle (Maliska, 2004).

Segundo Maliska (1995) existem duas maneiras de aproximar as equações no MVF. A primeira forma é a utilização do balanço da propriedade conservada para cada um dos subdomínios. O segundo modo é a integração da equação de conservação, na forma conservativa, no volume do subdomínio. Ambos os métodos levam ao mesmo resultado, pois a equação de conservação se originou através de um balanço da propriedade em um volume finito.

O método por diferenças finitas deu origem ao método por volumes finitos. Em ambos os casos, problemas de instabilidade ou convergência são mais raros de acontecer, pois é possível garantir que cada volume de controle obedece a lei de conservação. Enquanto o MDF aplica a equação diferencial em nós discretos da malha, utilizando aproximações por série de Taylor, o MVF aplica a equação diferencial nos subdomínios da malha através da integração em cada volume.

A integração das equações diferenciais diretamente sobre a malha facilita a obtenção de equações para a solução numérica do problema. Além disso, esse método pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, até mesmo em geometrias mais complexas. De acordo com Aline, 2008 (Maliska), a maioria dos softwares de CFD disponíveis no mercado, utilizam esse método para solução de problemas de escoamento de fluidos e transferência de calor.

6. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de CFD (LabCFD), que se localiza no LADEQ (Laboratórios do Departamento de Engenharia Química), situado Bloco I do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

6.1. Software e Hardware

Neste trabalho foi utilizado o pacote comercial de fluidodinâmica computacional da ANSYS Technology (versões 12.1 e 13.0), para a realização das simulações. As simulações foram realizadas em um microcomputador com processador Intel Core i7 2,8GHz e memória de 4,0GB DDR3. Foi utilizado o programa ICEM para construção das malhas hexaédricas e o programa Fluent para resolver as simulações, ambos da ANSYS.

6.2. Geometria do Hidrociclone

O hidrociclone em estudo foi baseado no trabalho de Marins *et al* (2010), que realizou testes experimentais para analisar o escoamento em um hidrociclone projetado para separação líquido-líquido, operando em fluxo monofásico. Marins obteve os perfis de velocidade através das técnicas LDA (*Laser-Doppler Anemometry*) e PIV (*Particle Image Velocimetry*), técnicas que utilizam os princípios óticos de medição a laser. Na Tabela 6.1 e na Figura 6.1 são apresentadas as proporções geométricas do hidrociclone em estudo. O equipamento apresenta duas seções cônicas, θ_1 e θ_2 , que medem respectivamente 15° e 1° .

Tabela 6.1. Dimensões do hidrociclone empregado neste estudo.

Geometria	Dimensões (mm)
Diâmetro do cilindro (D_c)	70
Diâmetro do overflow (D_o)	10
Diâmetro do underflow (D_u)	26,3
Altura do duto de alimentação (L3)	47,6
Comprimento da seção cilíndrica (L1)	47,6
Largura do duto de alimentação (L2)	5
Comprimento da primeira seção cônica (L4)	124
Comprimento da segunda seção cônica (L5)	686,4
Comprimento do tubo de underflow (L6)	63,6
Comprimento do tubo de overflow (L7)	70

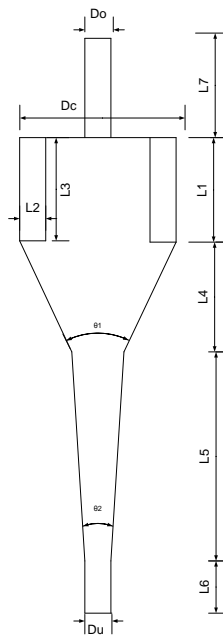


Figura 6.1. Esquema das proporções geométricas do hidrociclone (Marins, 2010).

As Figuras 6.2 e 6.3 mostra o ambiente do DesignModeler (ANSYS), software utilizado para criar a geometria do hidrociclone utilizado nas simulações, com base nos dados apresentados acima.

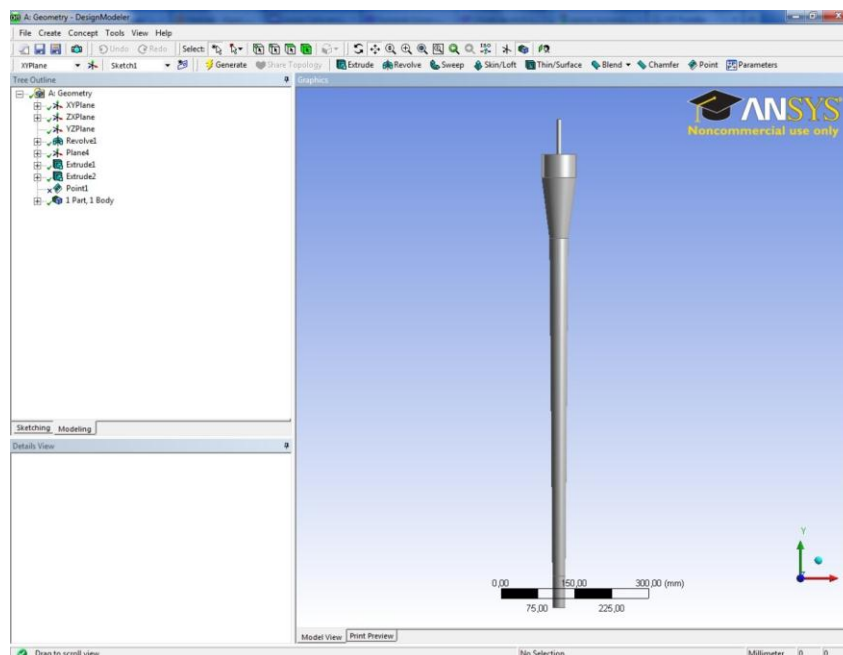


Figura 6.2. Geometria do hidrociclone no programa DesignModeler.

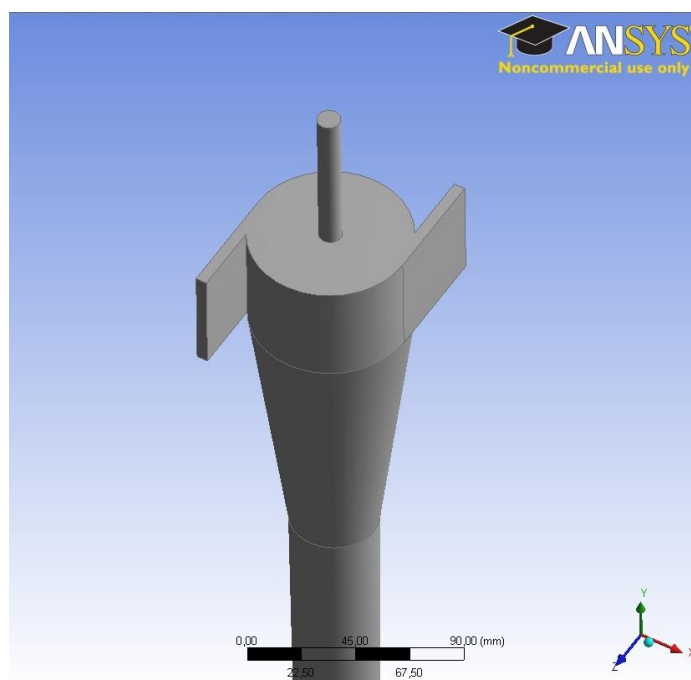


Figura 6.3. Geometria do hidrociclone criado no DesignModeler (detalhe para a região das duas entradas).

6.3. Geração da Malha

Para a geração da malha, utilizou-se o software ICEM-CFD, que se baseia na estratégia de criação de blocos que gera uma malha estruturada hexaédrica (Figura 6.4). As malhas estruturadas são geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos que, geralmente, são hexaedros. Nessas malhas, cada elemento tem sempre o mesmo número de elementos vizinhos, a não ser quando o mesmo pertence ao contorno. Além disso, a malha hexaédrica permite a realização de cálculos mais precisos e seguros, representando com maior fidelidade os fenômenos interfaciais. Porém, um maior esforço computacional é necessário para representar tais fenômenos.

Durante a criação dos blocos, a ferramenta *o-grid* disponível no software ICEM, permitiu o refino da malha na região central (*vortex core*) do hidrociclone juntamente com o *underflow* e o *overflow*. O tamanho dos elementos próximos às paredes também foram refinados, com o objetivo de diminuir a perda de informação de elemento para

elemento. Após os ajustes dos blocos e da definição do tamanho e quantidade de elementos, a malha foi gerada como pode ser visto na Figura 6.5.

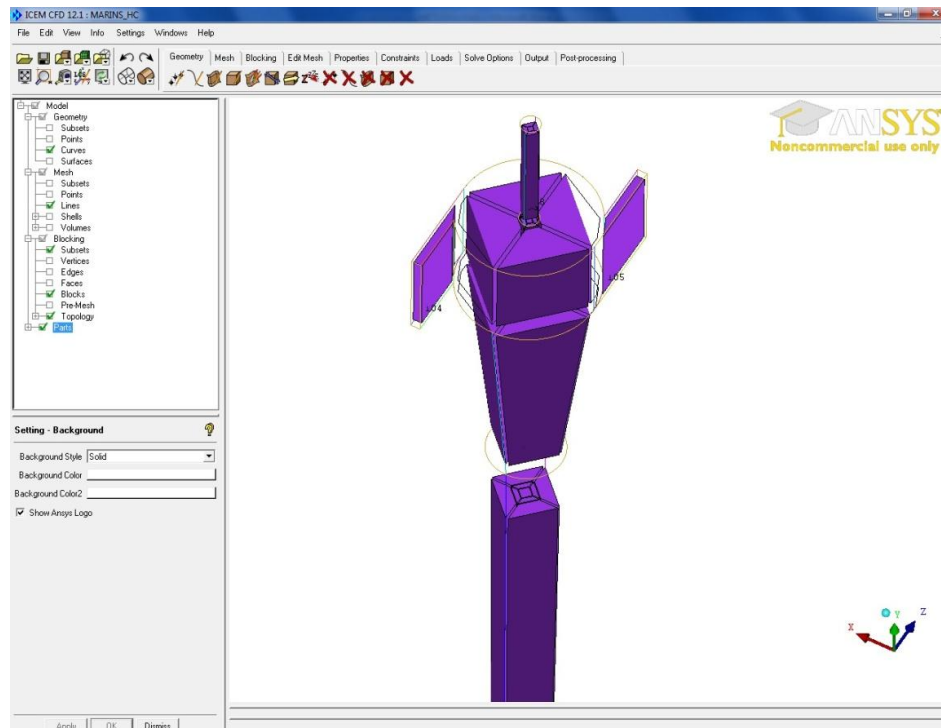


Figura 6.4. Software ICEM-CFD, detalhe para os blocos estruturados.

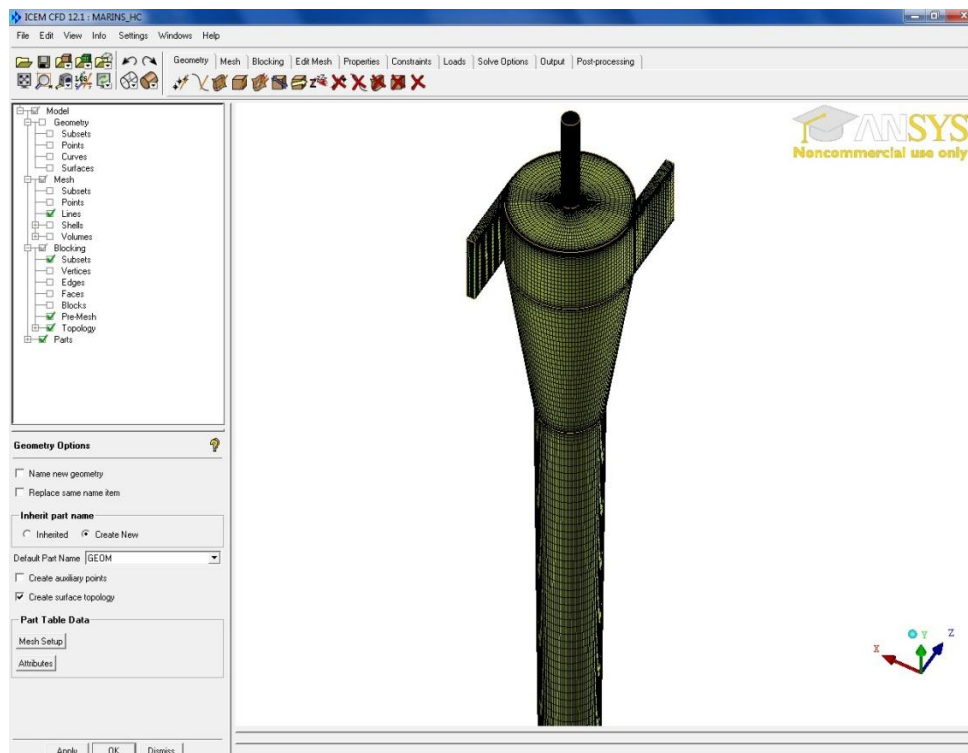


Figura 6.5. Geração da malha no ICEM-CFD.

6.3.1 Teste de Malha

Um teste de malha foi realizado para garantir a utilização de uma malha que representasse através das simulações, resultados coerentes e mais próximos com os dados reais e que ao mesmo tempo não utilizasse um esforço computacional alto e desnecessário. Foram criadas então quatro malhas: malha 1, malha 2, malha 3 e malha 4, com respectivamente 200.000, 500.000, 750.000 e 1 milhão de elementos (Tabela 6.2). Todas as malhas seguiram o mesmo critério para a construção, entretanto o que difere entre elas é o refinamento na região do *vortex core* (região central) e nas paredes (camadas limites) por serem regiões onde ocorrem elevados gradientes de pressão e de velocidade (Figura 6.6).

Tabela 6.2. Parâmetros utilizados para o teste de malha e quantidade de elementos.

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Elementos	214.500	537.141	753.032	1.057.604
Nós	208.126	525.012	738.274	1.038.866
Do	10	17	19	20
Dc	18	22	27	30
Du	10	17	19	20
L2	5	9	7	9
L3	22	22	27	30
L5	68	72	87	100

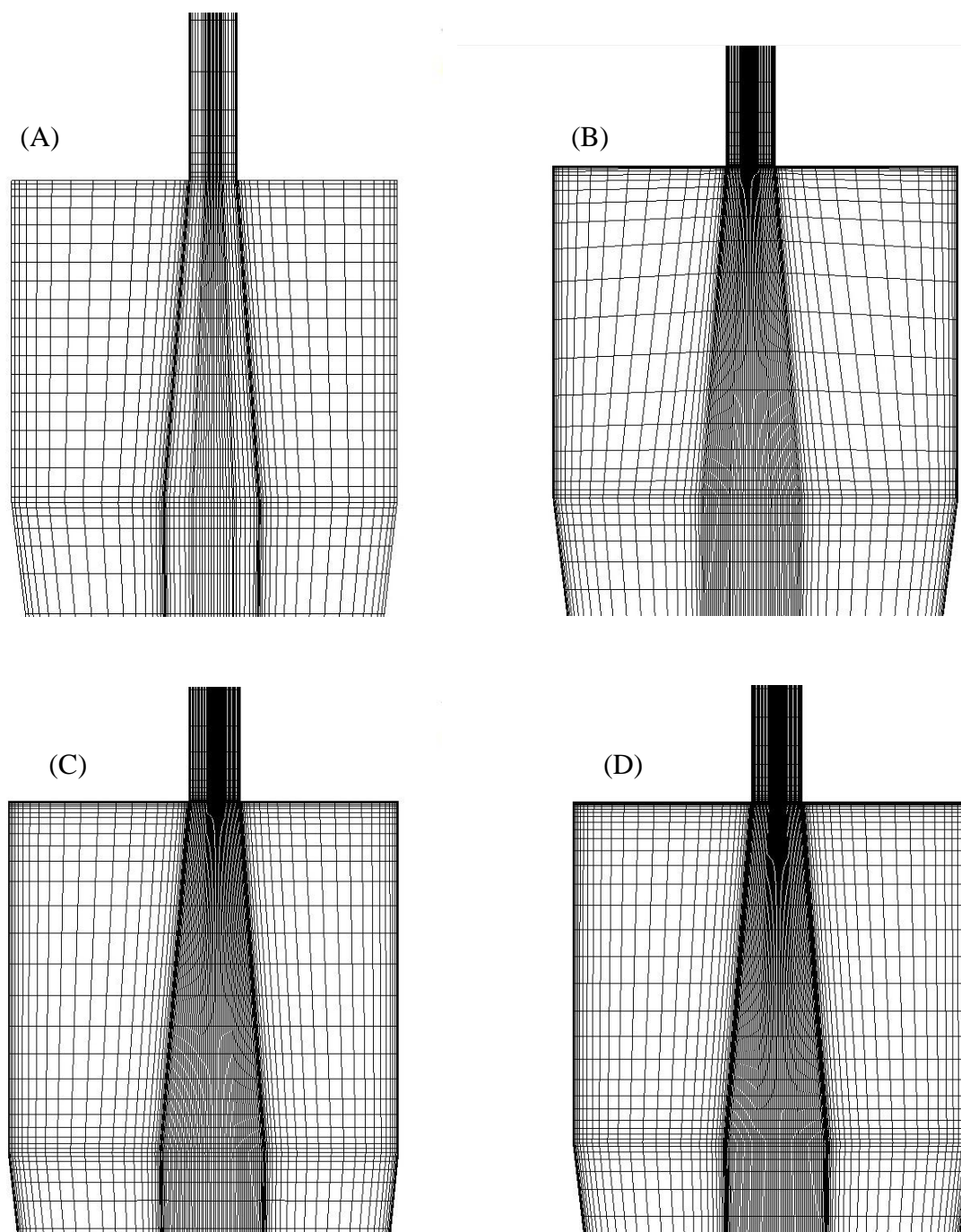


Figura 6.6. Detalhe do refinamento na região do *vortex core*. (A) Malha 1, (B) Malha 2, (C) Malha 3, (D) Malha 4.

Os testes de malha foram simulados com uma fase contínua (sistema monofásico), ou seja, somente água foi utilizada como fluido, com objetivo de reduzir o tempo de processamento. O modelo de turbulência utilizado foi o RSM (*Reynolds Stress Model*), e a densidade e a viscosidade da água foi de $998,2 \text{ kg.m}^{-3}$ e $1,003 \text{ cP}$, respectivamente.

As condições de contorno foram as mesmas utilizadas por Marins *et al* (2010) em seus testes experimentais. Na entrada foi estabelecido como vazão volumétrica do fluido $6,3 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, no *overflow* foi estabelecido uma pressão de 1,2 bar e no *underflow*, uma pressão de 2,05 bar (função *pressure outlet*, permite que o fluido entre e saia do domínio estabelecido).

6.4. Simulação Bifásica

As simulações utilizando óleo foram realizadas através de dois modelos matemáticos diferentes: modelagem lagrangeana e euleriana.

Para o modelo lagrangeano as condições de contorno utilizadas foram as mesmas utilizadas para o teste de malha, porém, foi utilizada a função *Discrete Phase Model* do software Fluent. Essa função permite a utilização de distribuições de partículas para o cálculo das trajetórias das partículas, e assim calcular as eficiências. Foram adicionados ao programa as propriedades do óleo, como pode ser visto na Tabela 6.4 (viscosidade e densidade) e quatorze tamanhos de partículas com os seguintes diâmetros: 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e $70 \mu\text{m}$.

Para o modelo euleriano, a Tabela 6.3 mostra as condições de contorno utilizadas. Para obter a curva de distribuição foram realizados quatro simulações com tamanhos de partículas diferentes. Com base no diâmetro de corte em 50% de eficiência de separação (d_{50}) do modelo lagrangeano, foram realizadas duas simulações com os diâmetros maiores do que o d_{50} e duas simulações com os diâmetros menores.

Tabela 6.3: Condições de contorno utilizadas nas simulações do modelo Euleriano.

Parâmetro	Informação
Vazão Volumétrica	6,3 m ³ /h
Fase aquosa	contínua
Fração molar inicial da água	0,999
Densidade da água	1000 kg/m ³
Viscosidade da água	1,003 cp
Fase oleosa	dispersa
Fração molar de óleo na entrada	0,001
Densidade do óleo	871 kg/m ³
Viscosidade do óleo	13 cP
Modelo de turbulência	RSM
Modelo matemático	Euleriano
Regime	Pseudo-transiente
Resíduo máximo	1,0e-04 s
Condição de contorno - overflow	1,2 bar
Condição de contorno - underflow	2,5 bar

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Teste de Malha

Os perfis de velocidade tiveram resultados relativamente próximos, não havendo grandes diferenças entre a menor malha (200.000 elementos) e a maior malha (1.000.000 de elementos) (Figura 7.1). Entretanto, outros parâmetros foram analisados para escolher uma malha melhor. Marins *et al* (2010) definiu uma pressão na entrada do hidrociclone de 3,02 bar, e uma DPR de 1,87. A Tabela 7.1 mostra os valores desses parâmetros das malhas simuladas, além do parâmetro Razão de Fluido (Rf).

Tabela 7.1. Resultado dos parâmetros do teste de malha.

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Elementos	214.500	537.141	738.274	1.038.866
Pi (bar)	2,76	2,92	2,89	2,84
Rf	28,72	30,95	25,76	27,51
DPR	2,20	1,98	2,00	2,07

Os parâmetros acima também não apresentaram valores discrepantes, porém optou-se a malha 2 (500.000 elementos) para realizar as simulações, devido ser uma malha com uma quantidade de elementos.

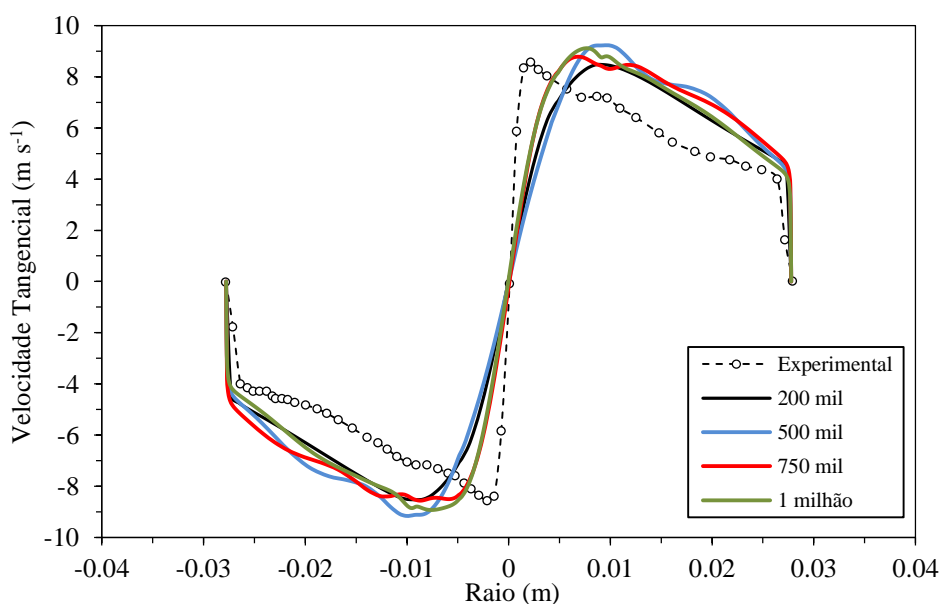


Figura 7.1. Gráfico comparativo das velocidades tangenciais para o teste de malha.

7.2. Resultados Gerais

Para avaliar os resultados de uma simulação de um hidrociclone em CFD, é importante analisar alguns fatores essenciais, como o perfil de velocidade tangencial e o perfil de pressão dentro do equipamento. Esses fatores determinam a boa funcionalidade do equipamento, o qual é destinado para separação de duas fases de um sistema.

Foi observado primeiramente o perfil de velocidade tangencial, pois esse parâmetro determina o campo centrífugo no interior do hidrociclone, ou seja, o poder de separação do equipamento. A velocidade tangencial foi analisada experimentalmente por Marins *et al* (2010) em seis locais diferentes abaixo do overflow (180, 200, 220, 320, 440 e 600 mm). As Figura 7.2, 7.3 e 7.4 mostram uma comparação do perfil medido experimentalmente por Marins *et al* (2010) e o perfil da malha simulada. Pode-se perceber que o perfil do hidrociclone simulado tem um comportamento bastante semelhante ao perfil experimental.

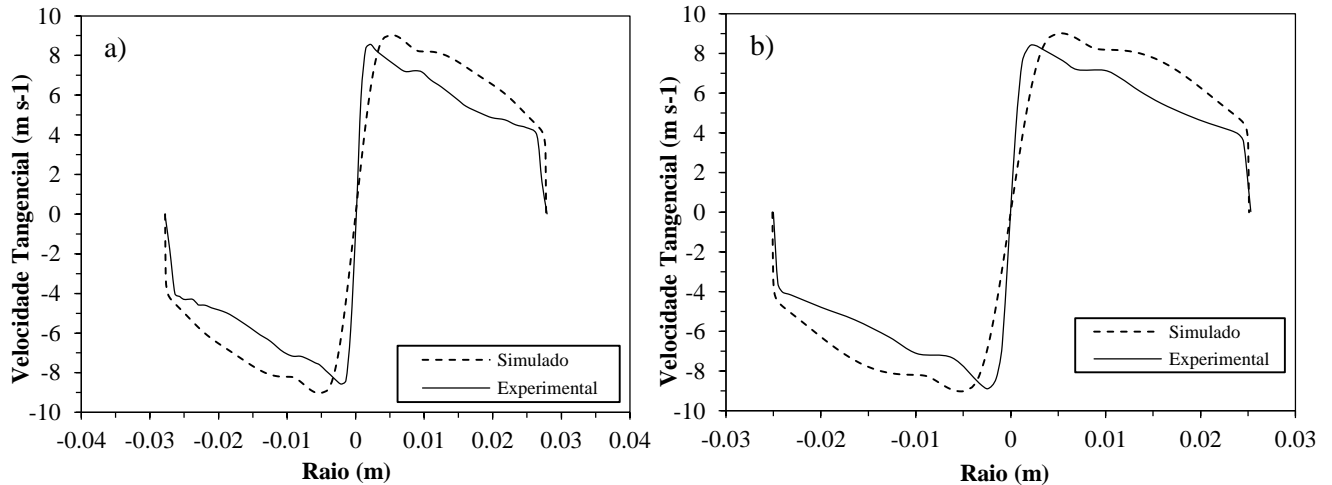


Figura 7.2. Gráfico comparativo da velocidade tangencial experimental e do simulado:

a) Posição 180 mm. b) Posição 200 mm.

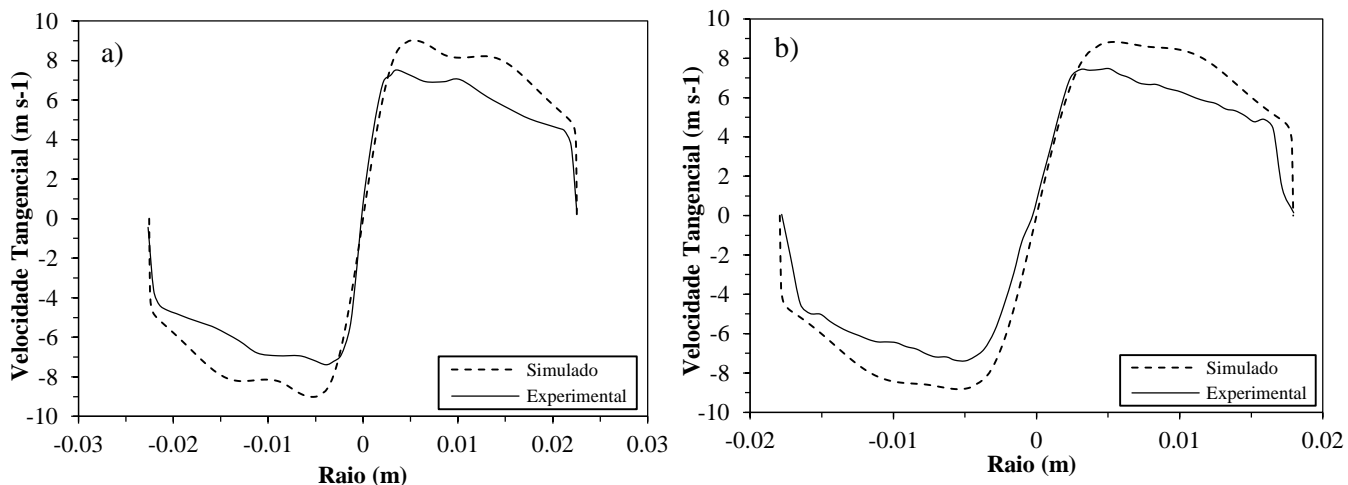


Figura 7.3. Gráfico comparativo da velocidade tangencial experimental e do simulado:
 a) Posição 220 mm. b) Posição 320 mm.

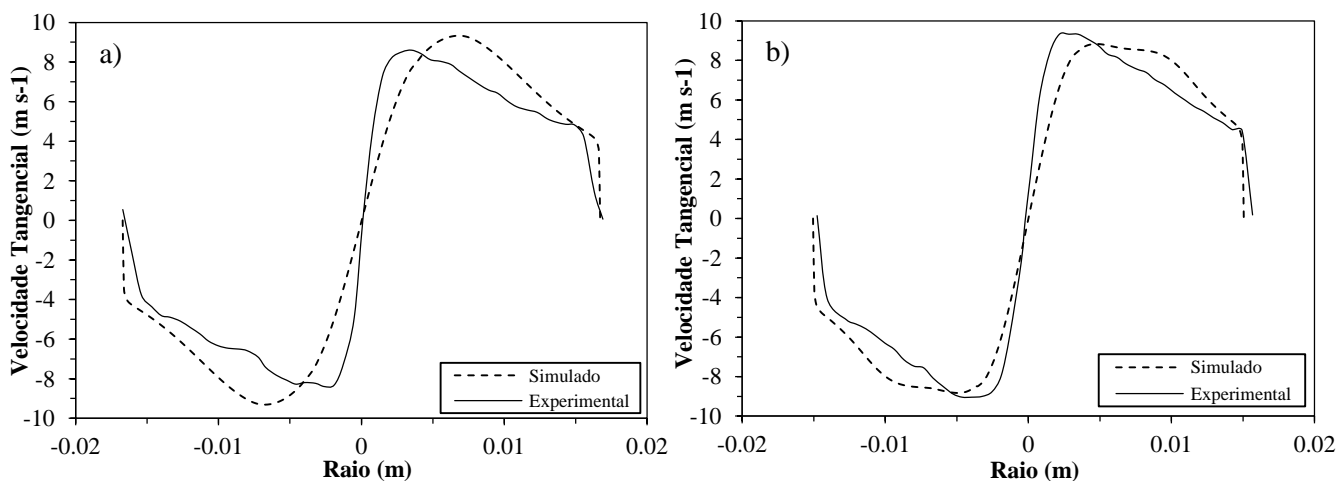


Figura 7.4. Gráfico comparativo da velocidade tangencial experimental e do simulado:
 a) Posição 440 mm. b) Posição 600 mm.

A Figura 7.5 mostra o plano do perfil de velocidade tangencial do hidrociclone. Percebe-se que, como descrito na literatura (Svarovsky, 1984; Heiskanen, 1993), as velocidades tangenciais apresentam seus maiores valores próximos à região central. A eficiência de separação é dependente deste campo de velocidade, pois seu valor determina diretamente a intensidade do campo centrífugo (v^2/r).

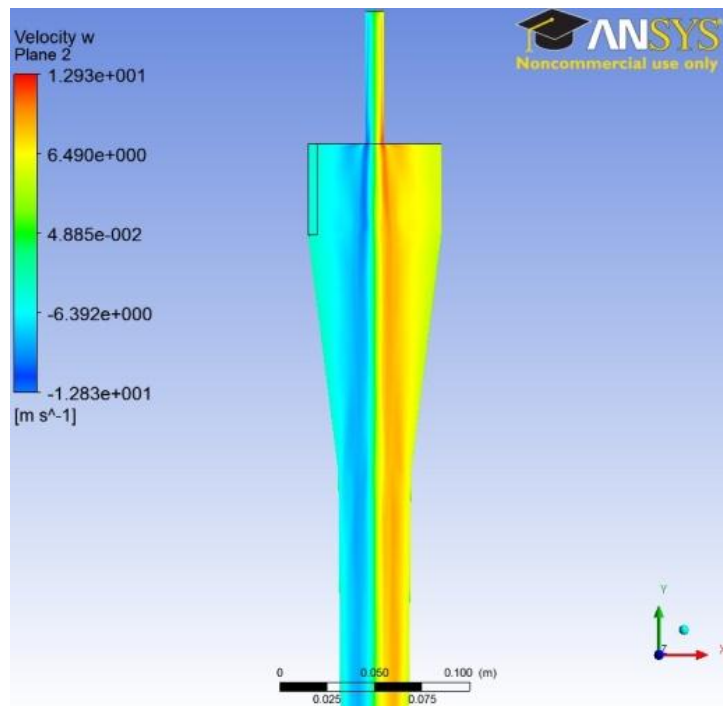


Figura 7.5. Plano do perfil de velocidade tangencial do fluido.

O perfil de pressão pode ser visualizado pela Figura 7.6. Através de um corte em um plano vertical, pode-se verificar que a pressão dentro do equipamento diminui com o raio das paredes para a região central. Esse gradiente de pressão é o responsável pela separação das fases em um hidrociclone, pois a pressão menor no centro puxa a fase menos densa para essa região (Almeida, 2009).

A Tabela 7.2 apresenta uma comparação entre os valores experimentais medidos por Marins *et. al* (2010) e os obtidos neste trabalho para a pressão na entrada do hidrociclone e a razão de quedas de pressão (DPR). A razão de queda de pressão é dada pela Equação 7.1. Como pode ser verificado, os resultados simulados representam bem os experimentais.

$$DPR = \frac{(P_i) - (P_o)}{(P_i) - (P_u)} \quad (7.1)$$

Onde: P_i = Pressão na entrada

P_o = Pressão no *overflow*

P_u = Pressão no *underflow*

Tabela 7.2. Comparação dos valores experimentais e da simulação para a pressão na entrada (P_i) e a razão entre as quedas de pressão (DPR).

Resultado	P_i (bar)	DPR
Experimental	3,02	1,87
Simulado	2,92	1,98

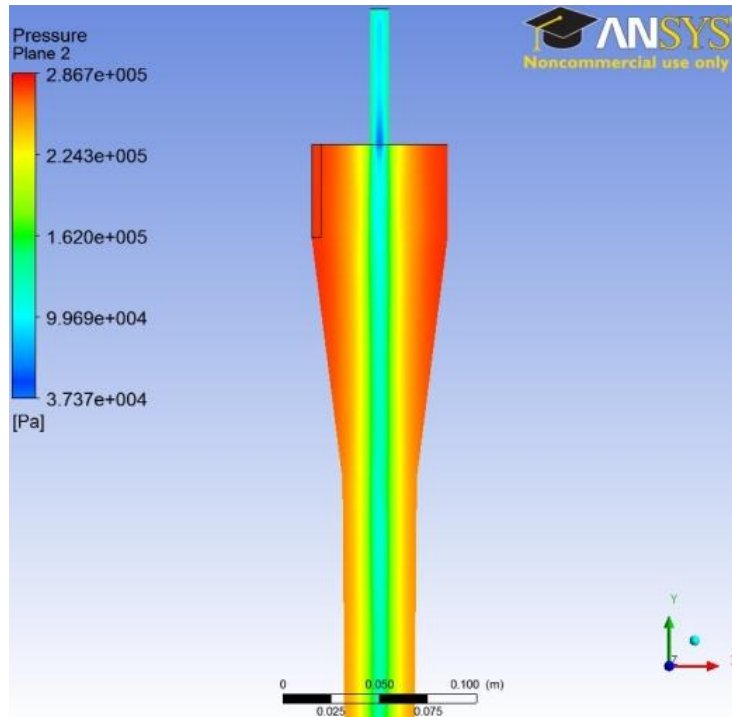


Figura 7.6. Plano do perfil de pressão do hidrociclone.

Outro parâmetro importante para verificar se o resultado simulado condiz com a realidade, é analisar o escoamento das fases no interior do equipamento. A Figura 7.7 representa as linhas de corrente para o escoamento em relação à fase dispersa (partículas de óleo). Essa figura permite visualizar com clareza o comportamento em espiral ascendente e descendente no interior do hidrociclone e da formação do vórtice.

O hidrociclone simulado apresentou boa eficiência utilizando-se partículas de óleo na fase dispersa com tamanhos na faixa de 30 a 70 μm . A Figura 7.8 mostra um plano vertical em que é possível ver que a fração volumétrica de óleo é maior no overflow e na região central. Isso acontece realmente, pois com pressão menor no

vortex core, as partículas de óleo que são menos densas são empurradas para essa região, e o movimento ascendente faz com que o óleo saia pelo overflow.

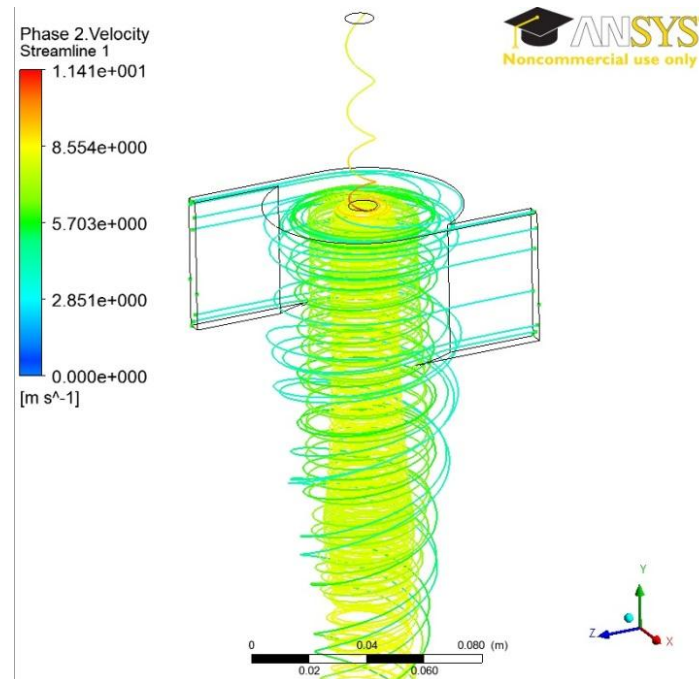


Figura 7.7. Linhas de corrente para o escoamento do óleo como fase dispersa.

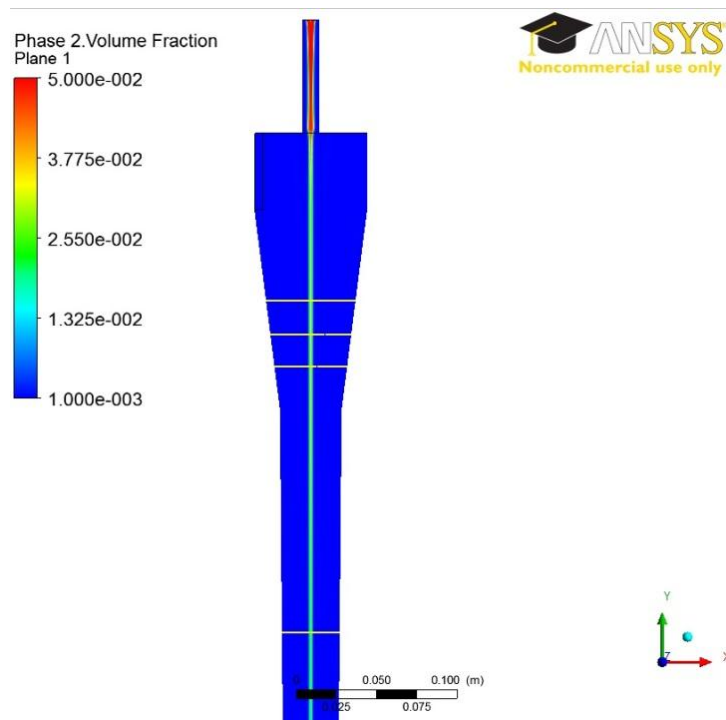


Figura 7.8. Fração volumétrica de óleo no plano vertical XY.

7.3. Eficiência pelo Modelo Lagrangeano

Uma distribuição de partículas foi utilizada no software Fluent para criar uma curva de eficiência. Para cada tamanho de partícula o programa calculava uma de cada vez, a vazão mássica na entrada, no underflow e no overflow. Através das Equações 2.1 e 2.3 foi gerado o gráfico abaixo (Figura 7.10).

Pelo gráfico, é possível obter o diâmetro da gota de óleo com 50% de eficiência de separação ($d_{50} = 23 \mu\text{m}$, e $d'_{50} = 24 \mu\text{m}$). Na literatura existe uma relação entre a eficiência granulométrica reduzida (G' teórico) e os diâmetros de gotas (Equação 7.2).

$$G' = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{d}{d'_{50}} \right)^n \right] \quad (7.2)$$

A Figura 7.9 representa a linearização da equação acima, resultando na Equação (7.3). A partir desta equação e com os dados da Figura 7.10, foi possível encontrar o valor de n , que foi igual a 2,94 (coeficiente angular da reta), e assim calcular o valor de G' teórico.

$$\ln(-\ln(1 - G')) = \ln(0,693) + n \cdot \ln \left(\frac{d}{d'_{50}} \right) \quad (7.3)$$

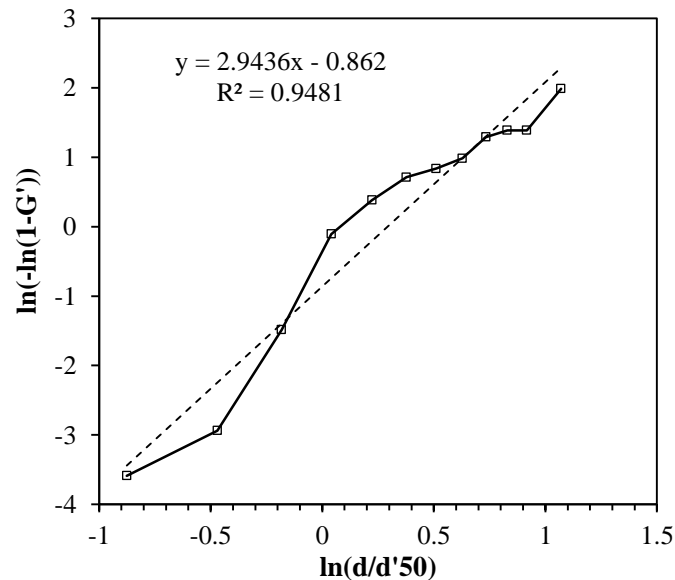


Figura 7.9. Linearização para encontrar parâmetro n (Modelo Lagrangeano).

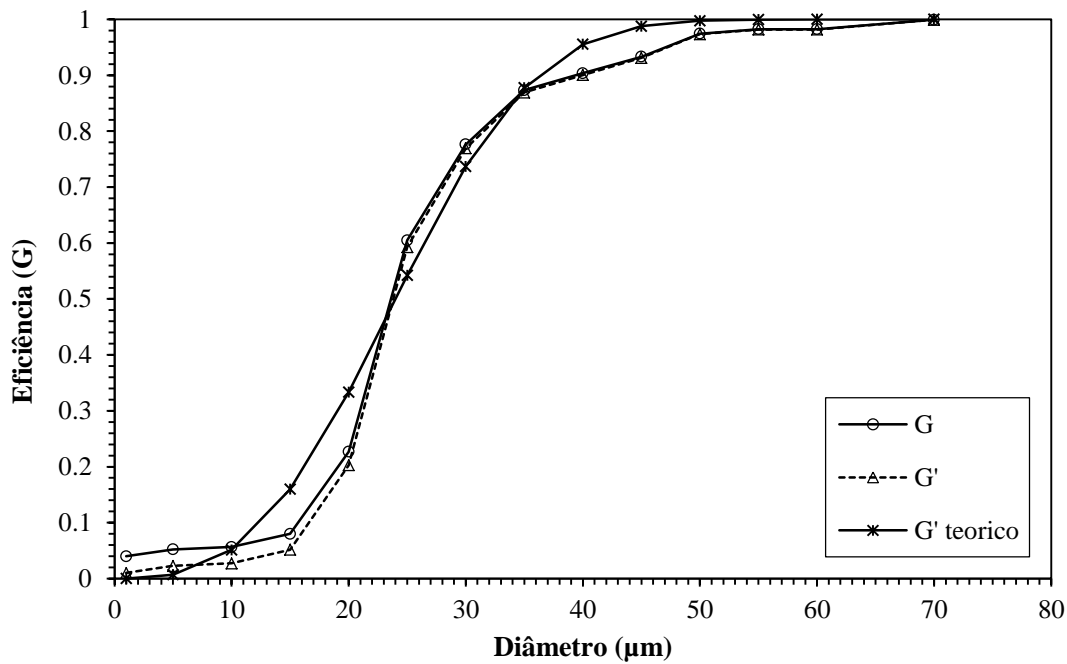


Figura 7.10. Relação entre os diâmetros das gotas e respectivas eficiências (Modelo Lagrangeano).

7.4. Eficiência pelo Modelo Euleriano

O modelo Euleriano foi aplicado com base no resultado do Modelo Lagrangeano. O diâmetro da gota de óleo com 50% de eficiência de separação (d_{50}) do modelo Lagrangeano, serviu de ponto central para as simulações do modelo Euleriano. Assim, foram simulados dois diâmetros acima deste d_{50} (30 e 35 μm) e dois diâmetros abaixo (15 e 10 μm). Cada simulação para um determinado diâmetro foram utilizadas as mesmas equações que o modelo Lagrangeano, foi gerado o gráfico em seguida (Figura 7.12).

Para esse modelo, o d_{50} e o d'_{50} encontrados foram 18 e 22 μm , respectivamente. Utilizando a Equação (7.2), encontrou-se o parâmetro n , que foi igual a 2,38 (Figura 7.11).

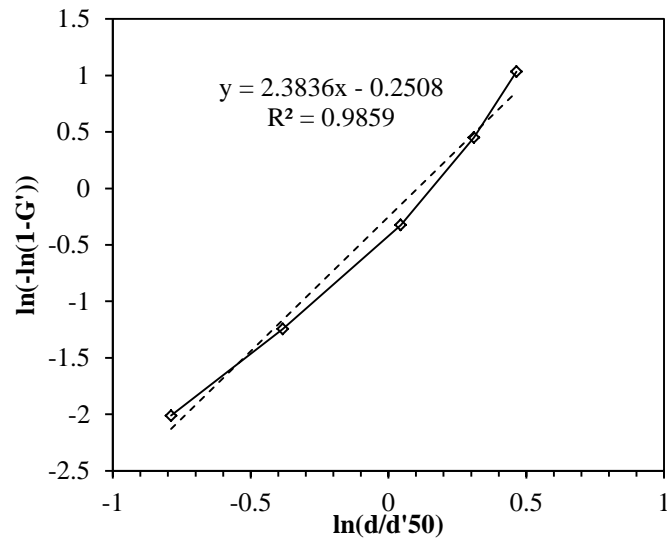


Figura 7.11. Linearização para encontrar parâmetro n (Modelo Euleriano).

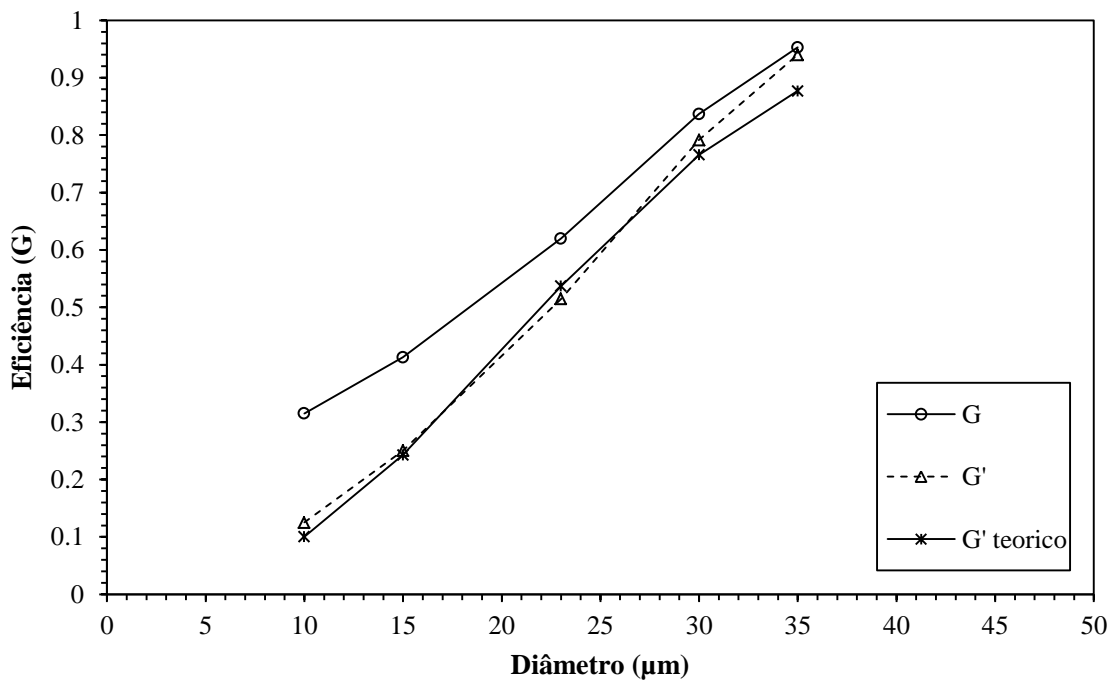


Figura 7.12. Relação entre os diâmetros das gotas e respectivas eficiências (Modelo Euleriano).

7.5. Eficiência Global do Hidrociclone

A Equação (7.4) abaixo foi utilizada para saber a eficiência global do hidrociclone para qualquer distribuição. Para verificar a eficiência do hidrociclone em estudo foram utilizadas as distribuições de tamanhos de gotas de óleo empregadas por Colman e Thew (1980); Husveg et al. (2007) e Husveg (2011) e distribuição pessoal.

$$G' = 1 - \exp\left(-0,693 \left(\frac{k (-\ln(1-y))^{\frac{1}{m}}}{d'_{50}}\right)^n\right) \quad (7.4)$$

As distribuições de tamanho de gotas foram ajustadas ao modelo de Rosin-Rammler (Equação 7.5) e seus parâmetros podem ser encontrados na Tabela 7.3.

$$y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{k}\right)^m\right] \quad (7.5)$$

Tabela 7.3. Distribuições de tamanhos de gotas empregadas neste trabalho.

Tipo de Distribuição	k (µm)	m	Mediana da distribuição (µm)	Referência
Fina	26	1,9	21	Husveg (2007, 2011)
Média	51	2,5	45	Colman e Thew (1980)
Grossa	168	1,8	130	§

§ = Dados do laboratório dos autores deste trabalho.

Com os dados da tabela acima, foi possível calcular as eficiências das três distribuições (E'_{Total}), utilizando o programa Fluent. Os parâmetros das distribuições acima (k e m) foram utilizados na Equação 7.3, com o parâmetro n encontrado do modelo Lagrangeano e do Euleriano (2,94 e 2,38 respectivamente.)

Desse modo, substituindo os parâmetros para cada modelo, a Equação 7.4 pôde ser integrada, resultando em uma equação que representa a eficiência global reduzida (Equação 7.6). Os resultados podem ser observados na Tabela 7.4.

$$E'_T = \int_0^1 G' dy \quad (7.6)$$

Tabela 7.4. Eficiências obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas (fina, média e grossa).

Tipo de Distribuição	Mediana da distribuição (μm)	E'_{Total}	E'_{Total} (Langrangeano)	E'_{Total} (Euleriano)
Fina	21	0,437	0,3232	0,3513
Média	45	0,809	0,8046	0,8033
Grossa	130	0,987	0,9604	0,9604

O resultado obtido mostrou que os dois modelos utilizados, o Lagrangeano e o Euleriano, foram adequados para esse hidrociclone. Ambos os modelos apresentaram valores bem próximos de eficiência, e que quanto maior o tamanho da partícula, mais o resultado dos modelos se aproximam. Por esse motivo, para o hidrociclone em estudo as simulações pelo modelo Lagrangeano pode e deve ser utilizado, além dos resultados serem coerentes, as simulações são bem mais rápidas do que o modelo Euleriano.

8. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas representaram bem aos dados experimentais do perfil de velocidades tangenciais, razão entre a queda de pressão (DPR) e pressão na entrada do hidrociclone medidos por Marins *et. al* (2010), utilizando distribuições granulométricas de águas oleosas bem distintas.

O resultado obtido mostrou que os dois modelos utilizados, o Lagrangeano e o Euleriano, foram adequados para esse hidrociclone. Ambos os modelos apresentaram valores bem próximos de eficiência, e que quanto maior o tamanho da partícula, mais o resultado dos modelos se aproximam.

A utilização de gotas de óleo como fase dispersa em uma concentração volumétrica baixa (0,1 %) nesse trabalho, confirmou a utilização do modelo Lagrangeano para concentrações diluídas da fase dispersa.

Por esse motivo, para o caso do hidrociclone estudado, as simulações pelo modelo Lagrangeano pode e deve ser utilizado, além dos resultados serem coerentes, as simulações são bem mais rápidas do que o modelo Euleriano.

Para trabalhos futuros, a sugestão seria utilizar alguma técnica de planejamento de experimentos para otimizar esta geometria, com o intuito de melhorar a eficiência do equipamento para distribuições menores de partículas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, J. <http://aguirreeng.blogspot.com/2010/09/malhas-estruturadas-e-nao-estruturadas.html>, 2010 (Acessado no dia 27/08/2011).

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

ANDERSON Jr., J. D. **Computational Fluid Dynamics – The Basics with Applications**. Mc Graw-Hill Inc, 1995.

COLMAN, D. A., Thew, M. T. **Hydrocyclone to give a highly concentrated sample of a lighter dispersed phase**. Paper presented at an International Conference on Hydrocyclones, p. 209 - 223, Cambridge, U.K., October, 1980.

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

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

HUSVEG, T. **Distribuição de tamanhos de partículas**. Informação pessoal, 2011.

HUSVEG, T., RAMBEAU, O., DRENGSTIG, T. **Performance of a deoling hydrocyclone during variable flow rates**. Minerals Engineering 20 368-379, Norway, 2007.

LEAHY-DIOS, A., MEDRONHO, R. A. **Simulação Numérica da Separação água-óleo em hidrociclones**. In: Anais do 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2003.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004

MARINS, L. P. M., DUARTE, D. G., LOUREIRO, J. B. R., MORAES, C. A. C. **LDA and PIV characterization of the flow in hydrocyclone without an air-core**. Journal of Petroleum Science and Engineering, Cenpes/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

MORAES, C. A. C. **Curso de Hidrociclones e Sistemas de Separação Ciclônica**. Rio de Janeiro: Cenpes. Universidade Cooperativa. Agosto 2006.

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

OLIVEIRA, R. C. G. **Estudos de Variáveis Operacionais e Interfaciais na Flotação de Óleo por Gás Dissolvido**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.

SILVA, R. P. **Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicações em Projetos de Separadores Gravitacionais**. Dissertação de Mestrado, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.

SILVA, R. P. **Relatório de Estágio Supervisionado**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2002.

SOUZA NETO, E., OLIVEIRA, D. S. T., LOMBA, R. F. T., LAGE, A. C. V. M., MEDRONHO, R. A., **Hydrocyclone for hollow spheres recovering from drilling fluids**. In: EMPROMER 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. Rio de Janeiro, 2005.

SU, J. **Introdução a Modelos de Turbulência**. ED. 2005, 2006.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**, Holt, Rinehart and Winston, London, 1984.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 3rd Ed., Butterworths, London, 1990.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method**, Longman, London, 1995.

YOUNG, G. A. B., WARLEY, W. D., TAGGART, D.L., ANDREWS, S.L., WORRELL, J. R. **Oil-water separation using hydrocyclones. An experimental search for optimum dimensions**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 11p. 37-50, 1994.