



## **PROGRAMA EQ-ANP**

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria  
do Petróleo e Gás Natural**



# **O HIDROCICLONE NA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA/AREIA: UM ESTUDO COM O AUXÍLIO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**Andreza Caroline Lima Torres de Mendonça**

## **Projeto de Final de Curso**

**Orientadores**

**Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.**

**Prof. Cristiano Agenor Oliveira de Araújo, M.Sc.**

**Julho de 2013**

# **O HIDROCICLONE NA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA/AREIA: UM ESTUDO COM O AUXÍLIO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**Andreza Caroline Lima Torres Mendonça**

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Engenharia de Petróleo.

Aprovado por:

---

Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

---

Eduardo Rangel Braga, M.Sc.

---

Marcus Vinícius Mezaroba, Eng.

Orientado por:

---

Ricardo de Andrade Medronho Ph.D.

---

Cristiano Agenor Oliveira de Araújo, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Julho de 2013

Mendonça, Andreza Caroline Lima Torres

O Hidrociclone na Separação óleo/água/areia: Um Estudo com o Auxílio de Fluidodinâmica Computacional. / Andreza Caroline Lima Torres Mendonça. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

xii, 67 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e Cristiano Agenor de Oliveira Araujo.

1. CFD. 2. Hidrociclones. 3. Altos teores de óleo. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D e Cristiano Agenor de Oliveira Araujo, M.Sc.

*Leopoldino, Lindalva e Luizeth: dedico essa conquista a vocês! Pois sem meus três pilares nada disso teria sido possível! A vocês, o meu muito obrigada, e espero que de alguma forma continuemos juntos na busca de muitas outras vitórias.*

*Viver e não ter a vergonha de ser feliz, cantar, cantar e cantar,  
a beleza de ser um eterno aprendiz.  
(Gonzaguinha)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, e como não poderia ser diferente, a Deus, seguido da minha mãe Adriana, por toda dedicação como mãe, amiga, companheira e principal incentivadora. Sem seu apoio, incondicional amor, entusiasmo e seus lanchinhos, as horas intermináveis e desesperadas de estudo ao longo dos anos da faculdade não teriam sido tão proveitosas e saborosas.

A todos os familiares e amigos que torceram, rezaram e sempre acreditaram que eu chegaria até aqui, apesar da longa distância Bangu-Fundão, após essa longa jornada, que é apenas a condição inicial para que eu alcance muitos outros sonhos e objetivos.

Agradecimento especial aos meus amigos da faculdade Bernardo Busse, Hélio Vidal e Rafael Campos, pelas conversas, risadas, apoio, pelos almoços, principalmente nos solitários dias de Fundão nos meus dois últimos períodos. Sem esquecer os meus outros amigos queridos da EQ, tão importantes quanto: Carlos André (CA), Cecília, Diego, Douglas, Hermes, Larissa, Monique, Natália, Rafaella Magliano, Raquel Massad, Renata, Roberto, Rodrigo e Vivi.

Ao meu namorado, Gustavo Concer, pelo amor incondicional, paciência nos incontáveis fins de semana ao meu lado enquanto eu estudava, pelo incentivo, apoio, por todos os momentos de descontração e por comemorar cada conquista minha como se fosse dele.

A todos os amigos do LabCFD: Eduardo, Celso, Rafael, Rodrigo e Terra, pelo conhecimento repassado, pelas conversas e conselhos, não só em relação ao Projeto Final.

Agradeço também aos meus orientadores Ricardo Medronho e Cristiano Agenor, pela paciência, pelos puxões de orelha e por todo aprendizado, essenciais para que eu me tornasse uma engenheira.

Finalmente, agradeço ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao PRH 13, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Engenharia de Petróleo.

## **O HIDROCICLONE NA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA/AREIA: UM ESTUDO COM O AUXÍLIO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Andreza Caroline Lima Torres Mendonça  
Julho, 2013

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD  
Cristiano Agenor de Oliveira Araújo, Eng.

Em plataformas de produção de petróleo e gás natural, é necessário que estes produtos sejam submetidos a separações físicas, já que a mistura extraída constitui-se geralmente de uma fração oleosa, uma fração aquosa e uma quantidade de gás, associada ou não à fase oleosa, além de outras impurezas como sais presentes na água.

Estudou-se no presente trabalho, com o auxílio da Fluidodinâmica Computacional (CFD), um hidrociclone projetado para separar misturas trifásicas (água/óleo/areia). Analisou-se, em particular, como a variação da concentração de óleo na alimentação do hidrociclone interferiu em sua eficiência de separação.

As simulações numéricas foram realizadas com o programa de CFD Ansys 13.0, a malha hexaédrica utilizada neste projeto foi construída no ICEM 13.0 e obtida com base em teste de independência de malha. As soluções numéricas foram conduzidas no programa Ansys Fluent 13.0, através das abordagens Lagrangeana e Euleriana e o modelo de turbulência empregado foi o RSM. Os efeitos de quebra e coalescência foram desprezados.

Inicialmente, a simulação numérica bifásica com 40% v/v de óleo foi validada comparando os resultados obtidos com o hidrociclone projetado por Araújo (2012). Os perfis de velocidade e a eficiência granulométrica apresentam valores bem similares.

Após esta etapa, foram realizadas outras simulações variando a concentração de óleo de 30 a 80% v/v, a areia foi adicionada através da abordagem Lagrangeana em todas as simulações. Através dos resultados obtidos, foi possível concluir que o aumento da concentração de óleo ocasionou uma diminuição na eficiência de separação e um aumento na razão de fluido.

A modificação proposta mostrou resultados satisfatórios para a maioria dos sistemas estudados, sendo obtido pelo *overflow* um óleo com baixíssimo percentual de água e pelo *underflow* a parte da água junto com toda a areia injetada no sistema. Através deste hidrociclone foi possível obter uma corrente rica em óleo, outra rica em óleo e água e uma terceira rica em água e areia.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Petroleum Engineering.

## **THE HYDROCYCLONE SEPARATION IN OIL/WATER/SAND: A STUDY WITH THE AID OF COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS**

Andreza Caroline Lima Torres Mendonça

July, 2013

Supervisors: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD  
Cristiano Agenor de Oliveira Araújo, Eng.

In offshore platforms for oil and natural gas production, it is necessary that these products undergo physical separations, since the produced mixture is generally an oily fraction, an aqueous fraction and a quantity of gas, and other salts present as impurities in the water.

The present work studied with the aid of Computational Fluid Dynamics (CFD) a hydrocyclone designed to separate oil/water/sand mixtures. It was analyzed, in particular, how feed oil concentration affects separation efficiency.

The CFD program Ansys 13.0 was employed for the simulations. The meshes were composed by hexahedron elements, built using the ICEM 13.0 program. For the numerical solutions, the Ansys Fluent 13.0 was employed, using a Lagrangian - Eulerian approach, and a RSM turbulence model. The effects of drop breakage and coalescence have been neglected.

Initially, a biphasic simulation with 40% v/v oil was validated by comparing the results obtained with the hydrocyclone designed by Araújo (2012). The velocity profiles and grade efficiency curves presented very similar values.

After this step, further simulations were carried out varying the concentrations of oil from 30 to 80% v/v. Sand has been added through the Lagrangian approach for all simulations. The results show that an increase in oil concentration resulted in decreasing separation efficiency and increasing flow ratio.

The proposed modification showed satisfactory results. In the *overflow2* it was possible to obtain oil with very low water content and the whole sand injected into the system was present in the *underflow*. It was possible to obtain a stream rich in oil, other oil-rich and water-rich and a third of water and sand.



# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivo .....	2
2. Hidrociclones.....	3
2.1. Aplicação na indústria do petróleo .....	5
2.1.1. Fluidos produzidos .....	7
2.2. Escoamento interno em hidrociclones .....	8
2.3. Eficiência de um hidrociclone em separações líquido-líquido .....	10
2.4. Revisão Bibliográfica .....	13
3. Modelos matemáticos .....	17
3.1. Teorema do transporte .....	17
3.1.1. Primeiro teorema do transporte .....	19
3.1.2. Segundo teorema do transporte .....	19
3.1.3. Terceiro teorema do transporte.....	19
3.2. Equações de conservação.....	19
3.3. Descrição do fluido .....	21
3.3.1. Modelo Lagrangeano .....	21
3.3.2. Modelo Euleriano .....	22
4. Fluidodinâmica Computacional.....	23
4.1. Etapas de uma simulação em CFD .....	25
4.2. Malha .....	27
4.2.1. Malhas estruturadas .....	28
4.2.2. Malhas não estruturadas .....	29
4.3. Método numérico .....	29
4.3.1. Método dos elementos finitos.....	30

4.3.2.	Método das diferenças finitas .....	30
4.3.3.	Método dos volumes finitos .....	31
4.4.	Modelos de turbulência.....	31
4.4.1.	Modelo RSM .....	33
5.	Metodologia.....	37
5.1.	Software e Hardware .....	37
5.2.	Geometria.....	37
5.3.	Malha .....	38
5.3.1.	Teste de malha .....	41
5.4.	Simulações Numéricas.....	43
6.	Resultados e Discussão dos Resultados .....	45
6.1.	Comparação entre o hidrociclone modificado e o hidrociclone de Araújo (2012).....	45
6.2.	Simulações trifásicas utilizando o hidrociclone modificado .....	49
7.	Conclusões.....	62
8.	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	63
9.	Bibliografia.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – escoamento interno do fluido dentro do hidrociclone. Adaptado de Murthy <i>et al.</i> , 2012.....	4
Figura 2.2 - Fluxograma do processamento primário de Fluidos (Thomas <i>et al.</i> , 2001).....	6
Figura 2.3 – Componentes da velocidade global no hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	8
Figura 2.4 – Perfil de velocidade tangencial dentro de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	9
Figura 2.5 – Perfil de velocidade axial dentro de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	10
Figura 2.6 – Perfil de velocidade radial dentro de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	12
Figura 2.7 – Curva de eficiência granulométrica com $R_f = 10\%$ (Medronho, 2004).....	12
Figura 4.1 – Etapas para a solução numérica de um problema em CFD (Fortuna, 2000).....	27
Figura 4.2 – Malha estrutura uniforme (Medronho, 2011).....	28
Figura 4.3 – Malha estruturada não-uniforme (Medronho, 2011).....	28
Figura 4.4 – Malha não estruturada (Medronho, 2011).....	29
Figura 5.1 – Geometria do hidrociclone construída no programa Design Modeler.....	38
Figura 5.2 – Malha do hidrociclone construída no programa ICEM, representando a locação dos dois overflows existentes no hidrociclone proposto. ....	39
Figura 5.3 – Malha 1 (A) e malha 2 (B) empregadas no teste de malha.....	42
Figura 5.4 – Malha 3 (A) e malha 4 (B) empregadas no teste de malha.....	42
Figura 6.1 – Perfis da velocidade tangencial obtido nas simulações numéricas na posição de 25 cm para o teste de malha.....	45
Figura 6.2 – Retas a diferentes alturas ao longo do comprimento do hidrociclone para a avaliação dos perfis de velocidade tangencial.....	46
Figura 6.3 – Perfis da velocidade tangencial obtido na simulação numérica na posição 5, 25, 45 e 75 cm para o hidrociclone de Araújo (2012) e para o hidrociclone deste trabalho.....	48
Figura 6.4 – Perfis da velocidade tangencial obtido na simulação numérica na posição de 5, 25, 45 e 75 cm.....	52
Figura 6.5 – Perfis da velocidade tangencial do fluido no interior do hidrociclone variando a concentração de óleo. (A) Concentração de óleo 0,3; (B) Concentração de óleo 0,4; (C) Concentração de óleo 0,5; (D) Concentração de óleo 0,6; (E) Concentração de óleo 0,7 e (F) Concentração de óleo 0,8.....	54

Figura 6.6 – Perfis da pressão do fluido no interior do hidrociclone variando a concentração de óleo. (A) Concentração de óleo 0,3; (B) Concentração de óleo 0,4; (C) Concentração de óleo 0,5; (D) Concentração de óleo 0,6; (E) Concentração de óleo 0,7 e (F) Concentração de óleo 0,8.....57

Figura 6.7 – Linhas de corrente para o escoamento do óleo como fase dispersa com concentração de óleo igual a 50% v/v.....58

Figura 6.8 – Fração volumétrica no interior do hidrociclone variando a concentração de óleo. (A) Concentração de óleo 0,3; (B) Concentração de óleo 0,4; (C) Concentração de óleo 0,5; (D) Concentração de óleo 0,6; (E) Concentração de óleo 0,7 e (F) Concentração de óleo 0,8.....60

Figura 6.9 – Trajetória da areia analisando o tempo de residência (em segundos) no interior do hidrociclone, para o escoamento do óleo como fase dispersa com concentração igual a 50% v/v.....61

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Constantes do modelo SSG.....	36
Tabela 5.1 – Critérios de qualidade utilizados para a construção da malha.....	40
Tabela 5.2 – Valores utilizados no teste de malha.....	41
Tabela 5.3 – Propriedades físicas dos fluidos utilizados nas simulações do teste de malha.....	42
Tabela 5.4 – Configuração utilizada no Fluent para as simulações.....	44
Tabela 6.1 – Comparação dos valores das simulações para a eficiência granulométrica (G) e para a razão de fluido ( $R_f$ ).....	48
Tabela 6.2 – Resultado de eficiência granulométrica e razão de fluido obtidas a partir das simulações numéricas.....	50
Tabela 6.3 – Vazão da mistura nas saídas do hidrociclone para diferentes valores de concentração de óleo obtidas a partir das simulações numéricas.....	53

# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

Em um campo de petróleo ao longo da sua vida útil a quantidade de água produzida pelo poço aumenta, pois o campo vai se tornando mais maduro e métodos de recuperação secundária, como a injeção de água no reservatório, são utilizados para aumentar a eficiência dos mesmos. Inicialmente o volume de água produzido varia, normalmente, entre 5 a 15%; entretanto, ao longo da produção, este valor pode atingir valores entre 75 e 90%. A água extraída junto com óleo representa um dos contaminantes mais indesejados na produção de petróleo, pois acarreta problemas de corrosão na instalação.

O fluido proveniente do poço não contém somente óleo e água; além destes, há também gás e sólidos que devem ser removidos antes do processamento do produto de interesse econômico, os hidrocarbonetos. Nas plataformas onde é realizada a exploração de petróleo existem também plantas que tem como finalidade realizar o pré-processamento do óleo, água e gás. Como exemplo podem-se citar, as plantas de processamento primário que têm como objetivo realizar a separação dos componentes desejados. Essas separações são essenciais para que o petróleo e a água atendam às especificações determinadas pelos órgãos de controle ambiental antes de serem enviados às refinarias ou pólos petroquímicos, onde irá ocorrer o processamento, de forma que possam ser comercializados (Freitas, 2009).

A água oriunda de um poço de petróleo, após tratamento, pode ser reinjetada no poço ou lançada ao mar. Para que a mesma possa ser descartada no oceano ela deve se adequar aos padrões definidos pelo órgão regulador brasileiro, o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que determina que “o descarte de água produzida deverá obedecer à concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29mg/L, com máximo diário de 42mg/L” (CONAMA 393, 2007).

Os equipamentos tradicionalmente utilizados em plataformas para o tratamento de águas oleosas são os separadores gravitacionais (separador gás/óleo/água). Todavia, estes equipamentos, por dependerem apenas da gravidade, necessitam de altos tempos de residência para que a separação atinja os valores determinados pelos órgãos ambientais.

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 (Marins, 2007).

Os hidrociclones não possuem partes móveis, são equipamentos pequenos e leves, não sofrem influência provocada pelo balanço das plataformas, necessitam de pouca manutenção e aproveitam a energia do próprio escoamento para gerar o campo centrífugo. Este campo pode ser até alguns milhares de vezes maior que o campo gravitacional usado nos separadores gravitacionais, obtendo-se, assim, uma eficiência maior de separação com menores tempos de residência (Hwang, 2013).

## **1.2. Objetivo**

O presente trabalho teve por principal objetivo analisar, com o auxílio de Fluidodinâmica Computacional (CFD), uma nova proposta de hidrociclone para ser empregado na produção de petróleo no tratamento de correntes produzidas com altos teores de óleo contendo areia. O hidrociclone proposto possui três correntes de saída: uma concentrada em óleo, outra concentrada em água e, finalmente, uma concentrada em areia. Como objetivo secundário, estudou-se a influência da variação da concentração de óleo na separação da mistura água/óleo/areia sobre a eficiência do processo.

## 2. Hidrociclones

Hidrociclones são dispositivos que têm sido largamente utilizados em processos onde se busca a separação de fases de correntes com densidades distintas. A fase dispersa é constituída de um sólido, um líquido (gotas) ou um gás (bolhas), enquanto a fase contínua é sempre um líquido.

Um hidrociclone típico é constituído de uma parte cilíndrica e uma parte cônica justaposta. A alimentação é feita por um tubo que tangencia a parede lateral da parte cilíndrica e seu eixo é ortogonal ao eixo central do equipamento.

O equipamento possui duas saídas axiais, uma delas situada próxima à seção de alimentação, chamada *overflow*, e a outra situada numa seção afastada da seção de alimentação, próxima ao que seria o vértice do corpo cônico do hidrociclone, chamada *underflow* (Murthy *et al.*, 2012). Além disso, pode existir um tubo no interior do hidrociclone conhecido como *vortex finder*, que tem a função de minimizar a saída da fase mais densa pelo orifício de *overflow (bypass)*, melhorando ainda mais a eficiência do equipamento (Araújo,2012).

Os hidrociclones não possuem partes móveis e aproveitam a energia do próprio escoamento para gerar o campo centrífugo. 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*, conforme Figura 2.1 (Murthy *et al.*, 2012).



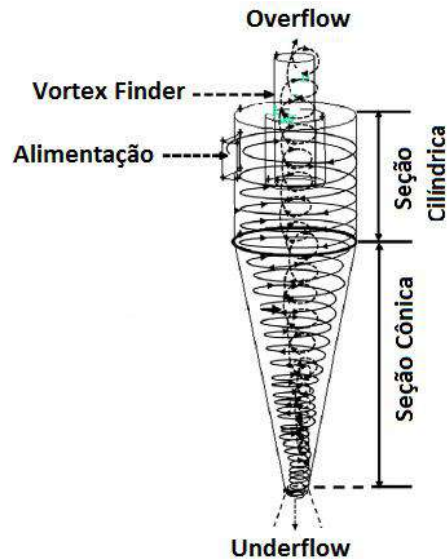


Figura 2.1 – Escoamento interno do fluido dentro do hidrociclone. Adaptado de Murthy *et al.*, 2012.

Os hidrociclones apresentam inúmeras vantagens se comparados a outros equipamentos, por esta razão, eles têm sido cada vez mais utilizados em indústrias de mineração, alimentícia e química (Hwang, 2013). Dentre suas vantagens pode-se citar:

- Pequeno tamanho e baixo peso se comparado a um separador de placas água-óleo, dimensionado para a mesma capacidade. Além disso, o tempo de residência no hidrociclone é de poucos segundos;
- Ideal para FPSOs e sistemas semi-submersíveis por não sofrerem influência provocada por movimentos periódicos típicos de instalações marítimas;
- Pode ser instalado na posição horizontal ou vertical;
- Não apresenta partes móveis;
- Normalmente, não exige o consumo de energia externa, a exceção é para sistemas que trabalham com baixa pressão e, conseqüentemente, irão necessitar de uma bomba a montante do hidrociclone;
- Necessita de pouca manutenção;
- Necessita de pouco acompanhamento operacional;
- Tolerância a pequenas flutuações na vazão.

As principais desvantagens de um hidrociclone são (Hwang, 2013):

- Só remove uma parte do óleo emulsionado, sendo assim em sistemas *offshore*, este equipamento não consegue atingir sozinho o valor exigido pela legislação;
- Facilidade de deposição de sais em suas paredes, em sistemas com potencial de geração de sais incrustantes. Logo, requer a injeção de produto anti-incrustante;
- São fabricados para resistir a erosão, mas nos sistemas com grande potencial de areia, eles podem sofrer desgaste.

No caso de separação líquido-líquido é importante saber as propriedades da fase dispersa e da 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, a maior parte do fluxo deve deixar o hidrociclone através do orifício de *underflow* (Freitas, 2009).

Nos hidrociclones que operam com separação sólido/líquido não existe qualquer preocupação com a relação à ruptura das partículas, pois mesmos as elevadas tensões de cisalhamento não são, na quase totalidade dos casos, suficientes para provocar este efeito. No entanto, quando a separação envolve líquido/líquido, a fase dispersa sob a forma de gota pode se romper formando diâmetros menores e dificultando o processo de separação (Marins, 2007).

Este problema pode acontecer quando a vazão de alimentação é aumentada, pois os grandes gradientes internos de velocidade geram altas taxas de cisalhamento. Assim, as gotas começam a ser quebradas em função do alto cisalhamento, diminuindo seu diâmetro, e, conseqüentemente, a eficiência (Araújo, 2012).

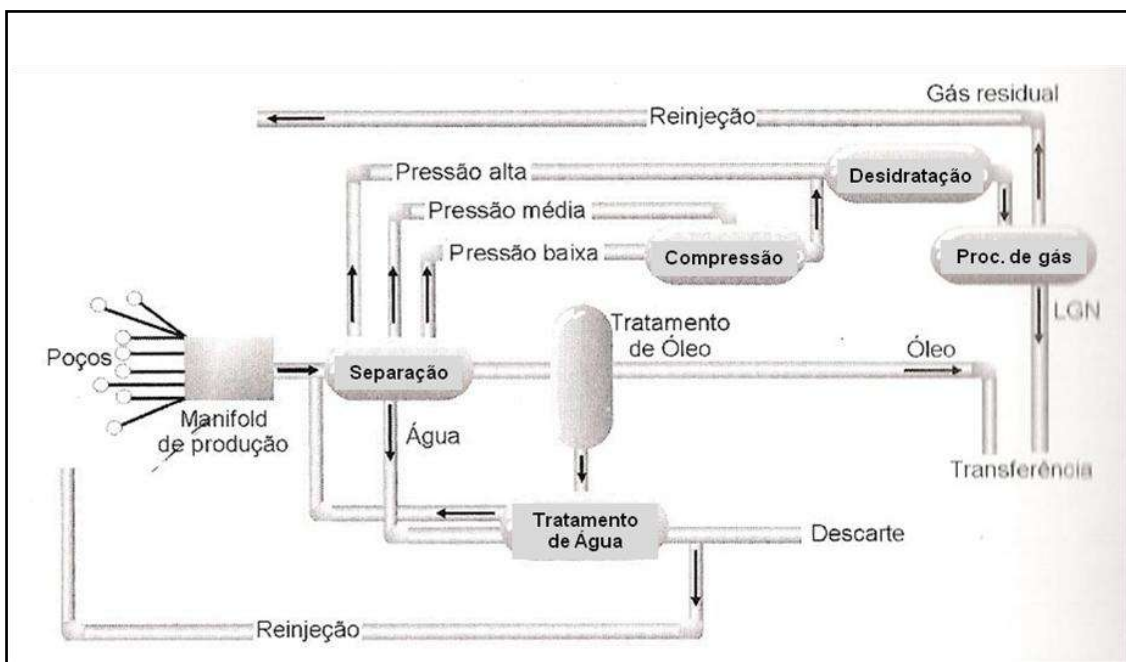
## **2.1. Aplicação na indústria do petróleo**

Na indústria do petróleo, principalmente na produção em alto mar (*offshore*), onde o preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é 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).

Essas plantas podem ser simples ou complexa, dependendo do tipo de fluidos. As mais simples efetuam apenas a separação água/óleo/gás, enquanto que as mais complexas incluem o condicionamento e compressão de gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água para reinjeção e descarte (Thomas *et al.*, 2001).

A Figura 2.2 mostra um diagrama que contém os principais componentes de uma unidade de processamento primário.



**Figura 2.2 - Fluxograma do processamento primário de Fluidos (Thomas *et al.*, 2001).**

Nos campos de petróleo, à medida que vão sendo explorados, a produção de água aumenta consideravelmente e para manter a produção de óleo em níveis satisfatórios, decantadores gravitacionais maiores são necessários. Neste contexto, o hidrociclone apresenta-se como uma boa alternativa, já que esses equipamentos apresentam grandes vantagens frente aos separadores gravitacionais conforme citado anteriormente, como menor área de convés utilizada, menor carga, maior eficiência e não são influenciados pelos movimentos oscilatórios presente nas plataformas semi-submersíveis e FPSOs (Marins, 2007).

O alto preço do petróleo no mercado e as rígidas legislações ambientais incentivam as pesquisas sobre os hidrociclones, porque devido a sua versatilidade ele 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 (Coelho *et al.*, 2011).

A presença de emulsões do tipo água em óleo (A/O) causa, dentre outros problemas, a elevação dos custos de movimentação do petróleo nas regiões de produção, devido ao aumento da sua viscosidade aparente. 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 (Coelho *et al.*, 2011).

### **2.1.1. Fluidos produzidos**

Um reservatório de óleo ao produzir óleo, água e gás natural tem as vazões expressas nas condições de superfície, também chamadas de “condições padrão”, que correspondem a pressão de 1 atm e temperatura de 20°C (Thomas, 2001).

Na engenharia de petróleo existem algumas relações que são utilizadas como indicadores, e servem também para caracterizar os estágios da vida produtiva dos reservatórios. Os mais comuns são a razão gás-óleo (RGO) a razão água-óleo (RAO) e o BSW (do inglês *basic sediments and water*) (Thomas, 2001).

Neste trabalho foca-se no índice BSW que é o quociente entre a vazão de água mais os sedimentos que estão sendo produzidos e a vazão total de líquidos e sedimentos. Este índice auxilia a desenvolver um histórico de produção que é essencial para o acompanhamento do reservatório, porque esta análise fornece os melhores subsídios para a previsão do comportamento futuro do mesmo (Thomas, 2001).

Ao se explorar um reservatório além de produzir os fluidos mencionados acima ocorre também a produção de areia. A produção de areia ocorre através de dois mecanismos, o primeiro relacionado ao comportamento mecânico da rocha que ocasiona sua ruptura e plastificação, e o segundo que está associado ao fluxo que pode

ocasionar o arraste de partículas devido a instabilidades hidrodinâmicas (Thomas, 2001).

A produção de sólidos normalmente não é decorrente apenas de um evento, mas de uma seqüência. Portanto a história da formação deve ser conhecida desde a perfuração até o momento em que o poço é utilizado. Os danos mais comuns devidos à produção de areia incluem abrasão e desgaste de equipamentos, perda da produtividade do poço, colapso de revestimento e disposição adequada dos resíduos impregnados por hidrocarbonetos (Thomas, 2001).

## 2.2. Escoamento interno em hidrociclones

O escoamento no interior de um hidrociclone é bastante complexo devido à turbulência no interior do mesmo, apesar das características construtivas serem bastante simples. Contudo, os perfis de velocidade do hidrociclone são bastante utilizados para avaliar o bom funcionamento deste equipamento. A velocidade global pode ser decomposta em três componentes: velocidade tangencial, velocidade axial e velocidade radial (Figura 2.3).

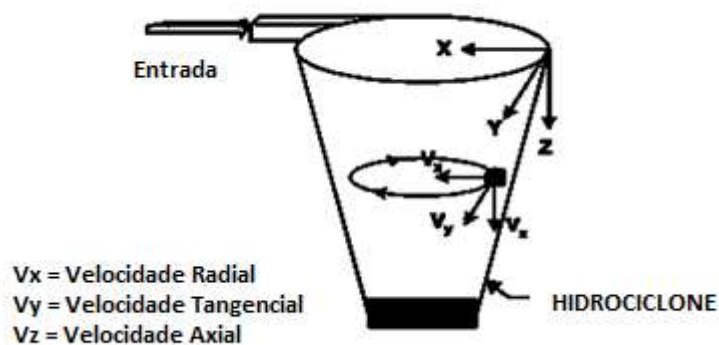


Figura 2.3 – Componentes da velocidade global no hidrociclone (Svarovsky, 1990).

Ao analisar as três componentes, observa-se que a velocidade tangencial é a componente mais importante, pois seu valor determina a intensidade do campo centrífugo. A velocidade tangencial aumenta a partir da parede com o decréscimo do raio, passando então, por um máximo, diminuindo na direção do núcleo central. As

Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 mostram o perfil qualitativo destas componentes no interior de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).

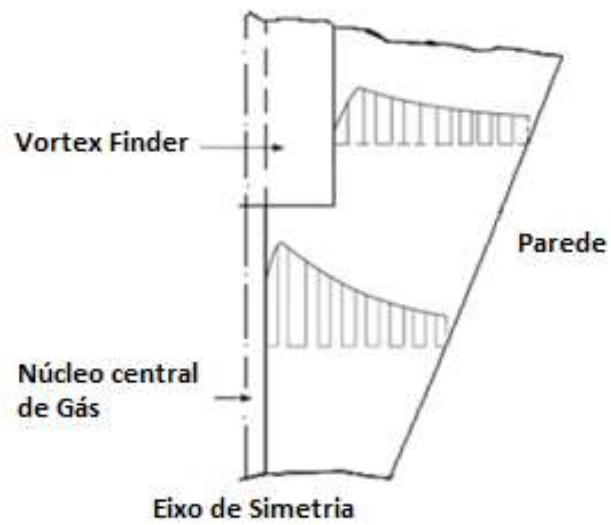


Figura 2.4 – Perfil de velocidade tangencial dentro de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).

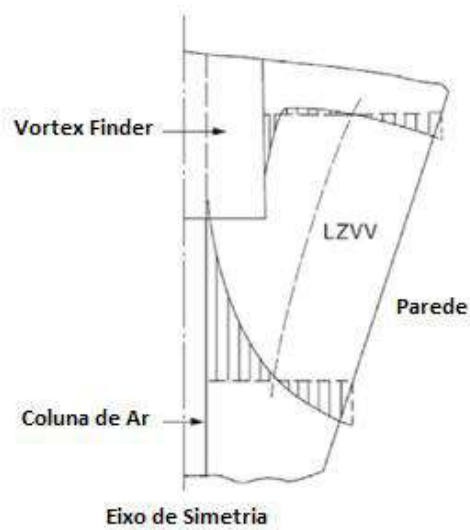


Figura 2.5 – Perfil de velocidade axial dentro de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).

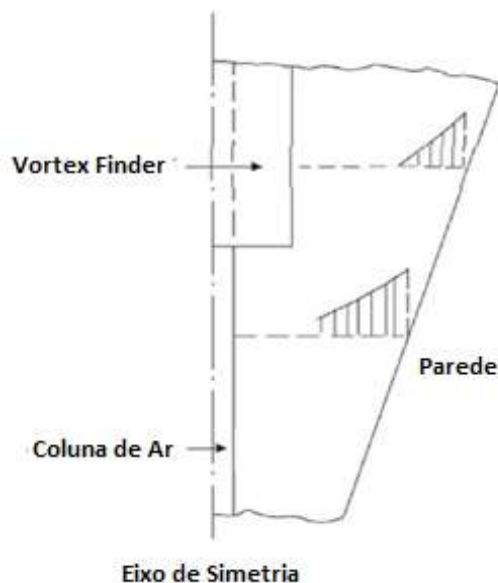


Figura 2.6 – Perfil de velocidade radial dentro de um hidrociclone (Svarovsky, 1990).

### 2.3. Eficiência de um hidrociclone em separações líquido-líquido

Para calcular a eficiência de um hidrociclone alguns parâmetros devem ser avaliados, como: eficiência granulométrica, razão de fluido, eficiência granulométrica reduzida, eficiência total do hidrociclone além das curvas de distribuição de tamanhos.

Segundo Leahy-Dios (2003), a definição tradicional de eficiência total reflete que a fração da fase dispersa é recolhida no *underflow*. Entretanto, em separações óleo/água, onde a fase dispersa é óleo, a recuperação da fase dispersa se dá pelo *overflow*, por isso, as definições de eficiência devem ser baseadas nesta corrente. Para calcular a eficiência granulométrica basta fazer a razão entre a vazão mássica de gotículas de óleo de um dado tamanho recolhida no *overflow* ( $W_{go}$ ) e a vazão mássica das gotículas de óleo deste mesmo tamanho na alimentação ( $W_g$ ), conforme fórmula abaixo.

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

Onde:

$G(d)$  = Eficiência Granulométrica;

$W_{go}(d)$  = Taxa mássica de óleo na forma de gotículas com dado tamanho  $d$  no *overflow*;

$W_g(d)$  = Taxa mássica de óleo na forma de gotículas com dado tamanho  $d$  na entrada.

Já a razão de fluido é um parâmetro que pode ser calculado relacionando a vazão mássica de água coletada no *overflow* e a vazão mássica de água alimentada no hidrociclone (Leahy-Dios, 2003).

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

Onde:

$R_f$  = Razão de fluido;

$W_{lo}$  = Vazão mássica de água coletada no *overflow*;

$W_l$  = Vazão mássica de água na alimentação.

A eficiência granulométrica reduzida ( $G'$ ) é calculada com base na razão de fluido e considera somente a quantidade de óleo de um determinado tamanho de partícula coletada no *overflow* pela ação centrífuga do hidrociclone, desconsiderando a quantidade retirada apenas por efeito de divisão de correntes, pois mesmo sem a presença do campo centrífugo, o hidrociclone é capaz de separar devido ao formato de sua geometria, ou seja, mesmo que o hidrociclone não esteja separando por ação centrífuga, haverá sempre uma eficiência granulométrica, para dado  $d$ , igual a  $R_f$ . A eficiência granulométrica reduzida pode ser representada pela equação abaixo (Araújo, 2012).

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

Onde:

$G'$  = Eficiência granulométrica reduzida;

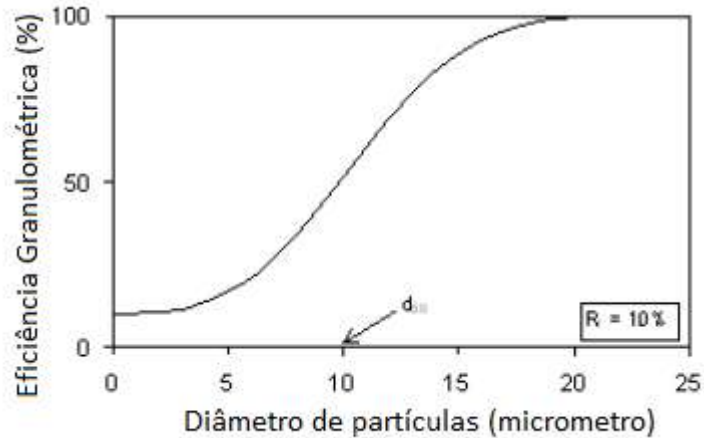
$G$  = Eficiência granulométrica;

$R_f$  = Razão de fluido.

Através da Figura 2.7 é possível observar a curva de eficiência granulométrica reduzida, iniciando em 0%, destacando o  $d_{50}$ . O  $d_{50}$  é o diâmetro da partícula (diâmetro de corte) que produz uma eficiência granulométrica de 50%. Para sistemas líquido-líquido, o diâmetro das partículas pode diminuir ou aumentar, dependendo das condições de operação, devido aos fenômenos de quebra e coalescência, respectivamente (Alves, 2011).



Para um hidrociclone operando em uma separação óleo-água, a maioria das partículas menores que  $d_{50}$  sairá no *underflow* enquanto que a maioria das que apresentam diâmetro maior que  $d_{50}$  serão separadas (Svarovsky, 1981).



**Figura 2.7 – Curva de eficiência granulométrica com  $R_f = 10\%$  (Medronho, 2004).**

A eficiência de separação dos hidrociclones pode ser calculada levando em consideração as informações a respeito da distribuição do tamanho de partículas e da razão de fluido. A eficiência total do hidrociclone ( $E_T$ ) é calculada através da razão entre vazão mássica de óleo no *overflow* e a vazão mássica de óleo na entrada do hidrociclone (Araújo, 2012).

$$E_T = \frac{W_{oc}}{W_o} \quad (2.4)$$

Onde:

$E_T$  = Eficiência total do hidrociclone;

$W_{oc}$  = Vazão mássica de óleo no *overflow*;

$W_o$  = Vazão mássica de óleo na entrada.

E a eficiência total reduzida é descrita em função da razão de fluido e da eficiência total como pode ser observado abaixo:

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2.5)$$

Onde:

$E'_T$  = Eficiência total reduzida;

$E_T$  = Eficiência Total;

$R_f$  = Razão de fluido.

A eficiência total e eficiência total reduzida são úteis na análise da influência das condições operacionais em uma dada separação, entretanto estes valores só possuem significado quando estão acompanhados por outros dados, como por exemplo, concentração de óleo na alimentação (Rego, 2008).

A fração volumétrica nas saídas é calculada pela relação entre a vazão de óleo e a vazão total (Alves, 2011).

$$f_{vc} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_{fc}} \quad (2.6)$$

$$f_{vd} = \frac{Q_d}{Q_d + Q_{fd}} \quad (2.7)$$

Onde:

$f_{vc}$  = Fração volumétrica de óleo no *overflow*;

$Q_c$  = Vazão volumétrica de óleo no *overflow*;

$Q_{fc}$  = Vazão volumétrica de água no *overflow*;

$f_{vd}$  = Fração volumétrica de óleo no *underflow*;

$Q_d$  = Vazão volumétrica de óleo no *underflow*;

$Q_{fd}$  = Vazão volumétrica de água no *underflow*.

## 2.4. Revisão Bibliográfica

Wang *et al.* (2011), analisaram o movimento para diferentes tamanhos de partículas, bem como o efeito das interações entre partícula-partícula, partícula-fluido e partículas com a parede do hidrociclone. Dois importantes estudos foram realizados neste trabalho: o primeiro foi a detalhamento dos perfis de velocidade axiais, tangenciais e radiais para os diferentes tamanhos e o segundo foi a inclusão das interações entre partículas, bem como as interações partícula-fluido (4-way acoplado, ou

seja, partícula-fluido tem efeito sobre uns aos outros, bem como partícula-partícula tem efeito uma sobre as outras).

Bradley (1965) e Svarovsky (1984) concluíram que a componente de velocidade mais importante dentro de um hidrociclone é a velocidade tangencial. Estes estudos incentivaram outros profissionais da área, estimulando o interesse pela descrição deste perfil.

Kelsall (1952) utilizou uma técnica de rastreamento microscópico, onde ele localizou visualmente pequenas partículas de alumínio em um hidrociclone transparente. Através desse estudo Kelsall analisou o perfil da velocidade tangencial e determinou que a mesma aumenta a partir da parede do hidrociclone para o centro, atingindo um valor máximo e depois diminui rapidamente. Ele dividiu o perfil de velocidade tangencial em uma parte interna e uma parte externa, a primeira com uma estreita semelhança com uma rotação de corpo sólido, também chamado de "vórtice forçado", enquanto que a segunda se comportou como um vórtice livre.

Bhaskar *et al.* (2007) estudaram o desenvolvimento de uma metodologia para simulações em hidrociclone através da validação de experimentos realizados em laboratório. Esse trabalho utilizou o modelo euleriano para a fase principal, o modelo de injeção de partículas para a fase dispersa e o modelo RSM para turbulência. As simulações foram realizadas em estado estacionário e seu objetivo era avaliar o comportamento das partículas no meio. Os resultados indicaram uma correspondência razoável entre o simulado e os valores experimentais. Os autores concluíram que a intensidade da pressão aumenta ao longo da direção radial, e é máxima perto da entrada de alimentação. A zona de pressão negativa aparece na região do vórtice forçado (região central), devido à alta velocidade.

Ma *et al.* (2000), concordando com Averous *et al.* (1997), mostraram que os modelos de k- $\epsilon$  não são adequados para representar a turbulência em hidrociclone. Porém, Dyakowski *et al.* (1993) sugeriu que este modelo pode ser utilizado em pequenos hidrociclones com equações para tensões de Reynolds adicionais. No trabalho de Dyakowski *et al.* (1993) as simulações foram realizadas utilizando concentrações em torno de 5-10% de sólidos.

Slack *et al.* (2004) e Wang *et al.* (2011) analisaram o fluxo no interior de um hidrociclone e descreveram o mesmo como um campo turbulento altamente

anisotrópico. Com base nestes estudos, eles concluíram que as simulações de grandes escalas (LES) e as simulações numéricas diretas (DNS) são as mais indicadas quando os parâmetros da turbulência forem dependentes do tempo. O problema é que estas técnicas são computacionalmente onerosas e, embora possíveis, não são práticas para aplicações industriais. Devido à dependência temporal, a maioria dos fechamentos de primeira ordem de turbulência, como o modelo  $k - \epsilon$ , se tornam inutilizáveis para realizar a previsão confiável das características do escoamento. Nestes trabalhos, foram realizadas várias tentativas para ultrapassar esta limitação. Modelos de turbulência com base no fechamento de ordem superior, como o modelo dos tensores de Reynolds (RSM), mostraram boa capacidade de previsão.

Bergstrom *et al.* (2007) estudaram o comportamento do escoamento em hidrociclones e analisaram como a eficiência do mesmo é impactada devido às alterações na magnitude da velocidade tangencial, bem como da velocidade radial e axial.

Segundo Swain *et al.* (2013), o fluxo no interior de um hidrociclone tem sido investigado experimentalmente há alguns anos. A maioria dos estudos apresentam resultados semelhantes para a componente de velocidade tangencial. Ao observar a componente de velocidade axial, os resultados são mais diversificados. A maioria dos estudos mostram uma velocidade descendente perto da parede e uma velocidade ascendente no centro. No entanto, alguns estudos relatam uma velocidade axial muito diferente ao longo de curto raio perto da linha central. Já a componente da velocidade radial, parece ser a mais problemática de ser medida, pois as diferenças nos resultados obtidos em estudos são muitas vezes maiores do que semelhanças. No entanto, estudos mais recentes concordam com um aumento da velocidade radial para dentro em direção ao centro do hidrociclone. Apesar da relação evidente entre o escoamento e a eficiência de separação, poucos trabalhos de pesquisa voltados para a área experimental podem ser encontrados na literatura.

Swain *et al.* (2013) simularam com auxílio de CFD um hidrociclone para separação sólido-líquido contendo duas fases sólidas e uma fase líquida, para isto utilizaram o modelo euleriano, foram consideradas três equações de balanço, uma para cada fase. O tamanho médio de partícula foi de 0,6117 milímetros e a menor partícula era de 0,09875 milímetros. Neste trabalho analisou-se dois modelos de turbulência: o modelo dos tensores de Reynolds (RSM) e o modelo  $k-\epsilon$  padrão. A comparação dos

dois modelos de turbulência mostrou ligeira variação na previsão do perfil de velocidade e a eficiência de separação. O desvio máximo entre os dois modelos observada perto da parede onde a tensão foi máxima para partículas de maiores dimensões.

Obeng *et al.* (2005) propuseram um ciclone com dois tubos de *overflow* concêntricos, um interno e outro externo, para separar uma mistura de partículas sólidas. A fim de analisar os efeitos de pressão de entrada, da concentração na alimentação, do comprimento e do diâmetro do *vortex finder* sobre o desempenho de um ciclone para separação de três fases, um planejamento experimental foi utilizado. As faixas utilizadas neste trabalho para as variáveis de estudo foram: pressão de entrada: 80-130 kPa; concentração de sólidos: 30-60%; comprimento do *vortex finder* interno, abaixo do *vortex finder* externo: 50-585 mm; diâmetro do *vortex finder* interno: 35-50 mm. Foram avaliadas como variáveis de resposta a vazão volumétrica de alimentação, a distribuição do tamanho de partículas no *overflow* interno e externo e a razão de fluido (recuperação de água) no *overflow* interno. Através destes resultados, foi observado que com o aumento da pressão na entrada e do *vortex finder* interno, houve um aumento do diâmetro das partículas que são separadas com 80% de eficiência no *overflow* interno. Outra variável observada foi a recuperação de água no *overflow* interno, a mesma aumenta com aumento do diâmetro do *vortex finder* interno, mas diminuiu com o alongamento do mesmo. Os resultados possuem um nível de confiança de 90%, e os modelos obtidos consideraram apenas as variáveis significativas no intervalo estudado.

### 3. Modelos matemáticos

Ao realizar o estudo de um determinado fenômeno físico é necessário realizar uma análise teórica prévia, optando por métodos teóricos ou ensaios experimentais para solucionar o problema.

Segundo Fortuna (2000), no início do estudo o problema deve ser modelado através da aplicação dos princípios físicos, descritos por leis de conservação, como conservação da massa, de energia e do movimento. Os modelos resultantes desta análise serão expressos por equações para um determinado tempo e espaço, que poderão ser utilizadas tanto para explicar como para prever o comportamento do sistema em diferentes situações.

#### 3.1. Teorema do transporte

De acordo com Hauke (2008), as leis fundamentais da mecânica, como a segunda lei de Newton, foram inicialmente desenvolvidas para sistemas de partículas ou pedaços de matéria inertes. Entretanto em fenômenos de transporte, os sistemas de partículas ou pedaços de matéria se deformam de forma complexa, com constante mudança na forma e tamanho, por este motivo seguir o movimento e evolução de dado um conjunto de partículas de fluido não é uma tarefa fácil.

A aplicação dos princípios da mecânica clássica para dinâmica dos fluidos não é uma tarefa simples. Mas com o auxílio do teorema de transporte de Reynolds, as equações da continuidade, do movimento e da energia podem ser obtidas, facilitando assim a solução dos problemas (Hauke, 2008).

Este teorema se refere à taxa de variação de uma propriedade extensiva,  $N$ , de um fluido em um volume de controle e é expressa em termos da derivada material. Seu propósito é fornecer uma ligação entre os conceitos ligados aos volumes de controle àqueles ligados a sistemas.

Um volume de fluido é um volume que contém sempre as mesmas partículas. Ele é designado por  $\mathcal{V}_t(t)$ , também chamado de volume de material, porque é delimitado por uma fronteira onde uma determinada quantidade de matéria é observada. Nesta região são estudadas as variações de massa e momento das partículas que atravessam o

sistema. Como consequência, o volume de fluido se move com a mesma velocidade do fluido,  $\vartheta$ .

No entanto, para resolver os problemas de ordem prática, é mais conveniente que as equações possam ser aplicadas a qualquer volume, arbitrariamente escolhido. As partes escolhidas deste volume podem ser fixas ou estar em movimento e a matéria pode fluir através dos seus limites ou seus limites podem seguir o fluido, e assim por diante. Isto dá origem ao conceito de volume de controle (Hauke, 2008).

Um volume de controle é um volume arbitrário selecionado para analisar um problema de transporte. Ele é designado por  $\vartheta_c(t)$  e move-se na velocidade de  $\vartheta_c$ . A relação entre as equações para um volume de fluido e para um volume de controle está baseada no teorema de transporte de Reynolds.

Segundo este teorema, a taxa de variação com o tempo da quantidade total de N é igual às variações instantâneas de N no interior do volume de controle, somadas à integral (em toda a superfície de controle) da taxa na qual N está sendo transportada através da superfície de e para a vizinhança (Hauke, 2008).

Este teorema tem como premissa transformar as equações válidas para um sistema em equações válidas para um volume de controle (Converte do sistema Lagrangeano para o Euleriano).

Para tal, será usado o símbolo N para representar qualquer uma das propriedades extensivas do sistema. Podemos imaginar N como sendo, por exemplo, a quantidade de movimento do sistema (Hauke, 2008).

A propriedade intensiva correspondente (N/massa) será designada por  $\eta$ . Assim,

$$N_{sistema} = \int \eta_{(sistema)} \rho dV \quad (3.1)$$

Com base nas equações de sistemas e por meio de uma comparação entre sistema e volume de controle, obtemos uma relação fundamental entre a taxa de variação de qualquer propriedade extensiva arbitrária, N, de um sistema e a variação destas propriedades associadas com um volume de controle (Hauke, 2008).

Seja  $V(t)$  ser um volume arbitrário que limite  $S(t)$ , que se move a uma velocidade  $w$  e o vetor normal ao limite é denotado por  $n$ . Temos,

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} N(x, t) dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} dV - \int_{S(t)} N(x, t) \omega \cdot n dS \quad (3.2)$$

### 3.1.1. Primeiro teorema do transporte

O primeiro teorema de transporte consiste em aplicar o teorema de transporte de Reynolds para um volume de fluido. Sendo,  $\vartheta(t) = \vartheta_f(t)$ ,  $S(t) = S_f(t)$  e  $\omega = \vartheta$ .

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} N(x, t) dV = \int_{V_f(t)} \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} dV - \int_{S_f(t)} N(x, t) \vartheta \cdot n dS \quad (3.3)$$

### 3.1.2. Segundo teorema do transporte

Consiste em aplicar o teorema de transporte de Reynolds para um volume de controle. Sendo,  $\vartheta(t) = \vartheta_c(t)$ ,  $S(t) = S_c(t)$  e  $\omega = \vartheta^c$ .

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} N(x, t) dV = \int_{V_c(t)} \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} dV - \int_{S_c(t)} N(x, t) \vartheta^c \cdot n dS \quad (3.4)$$

### 3.1.3. Terceiro teorema do transporte

O terceiro teorema de transporte relaciona a taxa de variação das integrais dos volumes de fluidos e dos volumes de controle. Sendo  $\vartheta_c(t)$  um volume de controle arbitrário, o volume de fluido  $\vartheta_f(t)$  deve coincidir com o volume de controle no tempo  $t$ :

$$V_f(t) = V_c(t) \quad (3.5)$$

$$\int_{V_f(t)} \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} dV = \int_{V_c(t)} \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} dV \quad (3.6)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} N(x, t) dV = \frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} N(x, t) dV + \int_{S_c(t)} N(x, t) (\vartheta - \vartheta^c) \cdot n dS \quad (3.7)$$

## 3.2. Equações de conservação

De acordo com Medronho (2004), os fenômenos relacionados ao escoamento de fluidos são descritos através das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, no presente trabalho independentemente do tipo de escoamento, estas equações foram sempre resolvidas numericamente pelo *software* da Ansys empregado.



O estudo teórico do escoamento em hidrociclones é realizado pelas equações diferenciais parciais não lineares de difícil resolução analítica.

Conforme Hauk (2008), a equação da conservação de massa descreve o balanço da massa em função da posição e do tempo para um dado volume de controle. Para um sistema sem reação química ou nuclear, a equação da conservação de massa, aplicando o terceiro teorema do transporte, é dada pela equação abaixo.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho dV + \int_{S_c(t)} \rho [(\vartheta - \vartheta^c) \cdot n] dS = 0 \quad (3.8)$$

O primeiro termo do lado esquerdo representa o termo de acúmulo, é o termo temporal, analisa a variação da massa dentro do volume de controle. Os outros termos do lado esquerdo são os termos convectivos, que representam o fluxo de massa que atravessa a superfície de controle, já o termo do lado direito referente à geração é nulo porque não há reação química ou nuclear no sistema estudado.

Segundo Hauke (2008), a equação de conservação da quantidade de movimento é obtida através de um balanço de forças externas, sendo fornecido pelo somatório da força de inércia, força de pressão, força viscosa e força de campo, todas descritas por unidade de volume. A equação da conservação da quantidade de movimento para um volume de fluido pode ser definida pela equação abaixo.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho \vartheta dV = \int_{S_f(t)} \tau n dS + \int_{V_f(t)} \rho f_m dV \quad (3.9)$$

A equação da conservação de momento, aplicando o terceiro teorema do transporte para um dado volume de controle é dada pela equação abaixo.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c(t)} \rho \vartheta dV + \int_{S_c(t)} \rho \vartheta [(\vartheta - \vartheta^c) \cdot n] dS = \int_{S_c(t)} \tau n dS + \int_{V_c(t)} \rho f_m dV \quad (3.10)$$

Nas equações apresentadas,  $\tau$  é o tensor tensão,  $n$  é o vetor normal à superfície de controle,  $\rho$  é a densidade do fluido;  $\vartheta$  é o vetor velocidade,  $f_m$  é a força de campo por unidade de massa e  $t$  é o tempo.

### 3.3. Descrição do fluido

A mecânica dos fluidos estuda a evolução das variáveis do fluido, tais como a velocidade e a viscosidade. Através do estudo do movimento das partículas que formam o fluido é obtido um modelo simples do comportamento do mesmo ao longo do escoamento e este pode ser bastante útil para compreender a física do problema.

Tradicionalmente, existem duas maneiras de descrever o movimento de fluidos: a descrição de Lagrange e a descrição Euleriana.

#### 3.3.1. Modelo Lagrangeano

De acordo com Almeida (2009), no método lagrangeano a fase contínua é resolvida utilizando uma metodologia clássica, como por exemplo, o método de volumes finitos, e a fase dispersa é tratada acompanhando-se o movimento, pelo domínio, de um grupo de partículas com as mesmas características.

Para Hauke (2008), em mecânica dos fluidos, a referida descrição é particularmente adequada para os fluidos multifásicos, onde as partículas apresentam concentrações diluídas em relação à fase dispersa.

Matematicamente, a descrição de Lagrange fornece a posição de cada partícula de fluido  $x$  em cada instante de tempo  $t$ . Uma vez que um fluido contém teoricamente um número finito de partículas, cada partícula é selecionada especificando sua posição inicial  $x_0$  no tempo  $t = 0$ .

Nesta descrição, a aceleração de partículas de fluido é determinada como na cinemática dos corpos rígidos, onde  $x = x(t, x_0)$  representa a posição da mesma partícula com o tempo. Assim,

$$\vartheta(t, x_0) = \frac{dx(t, x_0)}{dt} \quad (3.11)$$

$$a(t, x_0) = \frac{d\vartheta(t, x_0)}{dt} = \frac{d^2x(t, x_0)}{dt^2} \quad (3.12)$$

A solução das equações que descrevem o movimento da fase dispersa 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, definindo-se a sua nova

posição. Essas etapas são repetidas até que as partículas saiam do domínio ou atinjam o número limite de cálculos.

### 3.3.2. Modelo Euleriano

Segundo Hauke (2008), o modelo Euleriano (volume de controle) é o mais indicado para o estudo das propriedades do fluido em escoamento. Este método consiste em fixar-se o tempo e observar as propriedades do fluido em vários pontos pré-estabelecidos podendo-se assim obter uma “visão” do comportamento do escoamento naquele instante. Repetindo-se este procedimento para alguns instantes diferentes pode-se ter um entendimento do comportamento do escoamento ao longo do tempo.

Esta formulação consiste em dar o campo velocidade  $\vartheta$  em cada ponto  $x$  espacial e instante de tempo  $t$ ,

$$\vartheta = \vartheta(x, t) \quad (3.13)$$

Deste modo, esta descrição não fornece informações sobre o movimento de cada partícula individualmente, e sim informações em pontos fixos específicos.

Nesse caso, a aceleração das partículas de fluido não pode ser calculada como a derivada parcial da velocidade de fluido ao longo do tempo, porque  $\vartheta(x, t)$  representa a velocidade de muitas partículas diferentes através do mesmo ponto  $x$ . Então, para o cálculo da aceleração da partícula de fluido, a derivada substantiva é utilizada:

$$a(x, t) = \frac{D\vartheta(x,t)}{Dt} \quad (3.14)$$

## 4. Fluidodinâmica Computacional

Existem três métodos distintos para solucionar um problema de engenharia, são eles: métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação em laboratório. Dentre eles, a resolução através das simulações numéricas quase não apresenta restrições, o que já não é o caso das outras duas ferramentas disponíveis.

Os experimentos em laboratório trabalham com a configuração do problema próxima do real, sendo esta a grande vantagem deste método. Todavia, os mesmos podem apresentar altíssimos custos e quando estão envolvidas questões graves de segurança ou grande dificuldade da reprodução do real, torna-se difícil a sua realização.

Formam as classes dos métodos teóricos os métodos analíticos e os numéricos. Para Maliska (2004), os métodos analíticos só podem ser aplicados a problemas em que as hipóteses simplificadoras requeridas por estes métodos, como a simplificação das equações de conservação, da geometria e das condições de contorno, não os desviam do fenômeno físico real. As simulações numéricas podem ser aplicadas para a resolução de problemas complexos, em geometrias também complexas, com condições de contorno gerais, podendo assim simular escoamentos que não podem ser facilmente medidos ou obtidos experimentalmente. Sendo a principal vantagem a apresentação de resultados com grande rapidez e redução significativa nos prazos e custos, redução do número de experimentos realizados em laboratório e dos custos associados aos experimentos.

A Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* — CFD) é uma ferramenta que, através da simulação numérica, resolve problemas que envolvem processos físicos e/ou químicos que apresentam escoamento de fluidos, com ou sem presença de calor.

Segundo Fortuna (2000), através de métodos computacionais, ao aplicar discretização de equações diferenciais parciais de transporte que caracterizam o escoamento, esta ferramenta obtém a solução de um problema matemático. Por isso, este método pode efetuar previsões dos campos de concentrações, velocidades, pressões, temperaturas e propriedades turbulentas, quando submetidos a condições de contorno adequadas, ao utilizar modelos matemáticos baseados nos princípios de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo.

De acordo com Versteeg & Malalasekera (1995), CFD tem se tornado muito eficaz para a solução de muitos problemas e tem sido cada vez mais utilizado em diferentes aplicações, como na simulação computacional de difusão de substâncias em bacias hidrográficas e aquíferos, na previsão de tempo, no planejamento e gestão de recursos hídricos e na indústria de petróleo, dentre outros.

O início do estudo com CFD teve início nos anos 1960 quando a indústria aeroespacial utilizou técnicas dessa ferramenta em projetos de fabricação de motores de avião a jato. Mais recentemente, os mesmos métodos foram aplicados ao projeto de motores de combustão interna, câmaras de turbinas a gás e fornos de combustão. Além disso, atualmente, os fabricantes de veículos a motor rotineiramente prevêm forças de arraste, escoamento do ar ao redor dos veículos e o ambiente no interior do carro com CFD (Versteeg & Malalasekera, 1995).

É evidente que os custos de investimento para a utilização de CFD não são pequenos, entretanto este método pode produzir um número muito grande de resultados sem praticamente nenhuma despesa adicional quando comparado ao experimento em laboratório.

Além disso, a utilização de CFD permite o estudo de fenômenos 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 (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Para Versteeg & Malalasekera (1995), o uso de CFD em projetos de sistemas fluidos apresenta várias vantagens em relação à abordagem baseada unicamente em experimentos como:

- 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 além do seu limite de desempenho normal (ex. estudos de segurança e cenários de acidentes);
- Nível praticamente ilimitado de detalhes de resultados.

Segundo Nascimento (2008), é importante ressaltar que em alguns casos as simulações numéricas do escoamento podem ter pouca ou nenhuma representatividade quando comparada a realidade física, visto que uma série de erros pode ocorrer, desviando o resultado numérico do resultado exato. Dentre esses desvios, pode-se citar:

- Erros de arredondamento (devido ao arredondamento de dízimas periódicas ou números reais com infinitas casas decimais em operações matemáticas);
- Erros de discretização (relacionada à malha computacional utilizada);
- Erros de modelagem (provenientes de simplificações do modelo, condições de contorno aproximadas ou fenômeno físico representado por modelos inapropriados);
- Erros de convergência (associados à diferença entre o valor obtido e o real).

De acordo com Coelho (2011), CFD é uma ferramenta numérica, portanto seus resultados só serão válidos quando os modelos físicos utilizados nas equações e nas condições de contorno forem adequados. Além disso, a precisão das soluções numéricas é dependente da qualidade das discretizações utilizadas e dos erros associados ao algoritmo.

Já para Alves (2011), a utilização da técnica de CFD e de outras soluções numéricas não retira a importância da solução analítica e da realização de procedimentos experimentais, pois os resultados experimentais servem para a validação de modelos numéricos existentes e também para o desenvolvimento de novos modelos. Por sua vez, soluções analíticas simplificadas podem ser usadas como condição inicial em problemas mais complexos que serão resolvidos através de CFD ou quaisquer outros métodos de simulação numérica.

#### **4.1. Etapas de uma simulação em CFD**

Ao iniciar um estudo com o auxílio de CFD é necessário fazer um levantamento das variáveis relevantes ao processo, determinando as grandezas físicas que atuam e como atuam no sistema, realizando simplificações e eliminando variáveis insignificantes para a solução do problema.

Após este estudo, a modelagem do problema físico é iniciada, e o problema passa a ser expresso através das leis de conservação de massa, momento e energia. A modelagem deve ser capaz de explicar o sistema e prever o comportamento do sistema para diferentes situações.

Ao finalizar a etapa de modelagem matemática, o domínio das simulações é definido e então discretizado, sendo dividido em um número finito de pontos para que as equações para a solução numérica possam ser aplicadas. A discretização (geração da malha) é necessária porque as soluções numéricas não podem ser obtidas sobre uma região contínua, somente dentro de sub-regiões dentro do domínio, que são denominados elementos. Segundo Leahy-Dios (2003), a escolha da malha a ser utilizada deve levar em consideração o tipo e a complexidade do escoamento e da geometria, lembrando que a boa distribuição dos elementos é primordial para a obtenção de uma solução numérica representativa do escoamento.

Após a geração da malha, é realizada a especificação do problema, introduzindo no *software* as condições iniciais e de contorno, as propriedades físicas dos fluidos e os parâmetros de escoamento que serão utilizadas na resolução do problema, obtendo assim um conjunto de equações algébricas.

Finalmente, as equações são resolvidas gerando a solução numérica que deve ser analisada através do estudo das variáveis de interesse. De acordo com Coelho (2011), 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.

As etapas para a obtenção da solução numérica para um problema de mecânica dos fluidos descritos acima, podem ser visualizados na Figura 4.1.

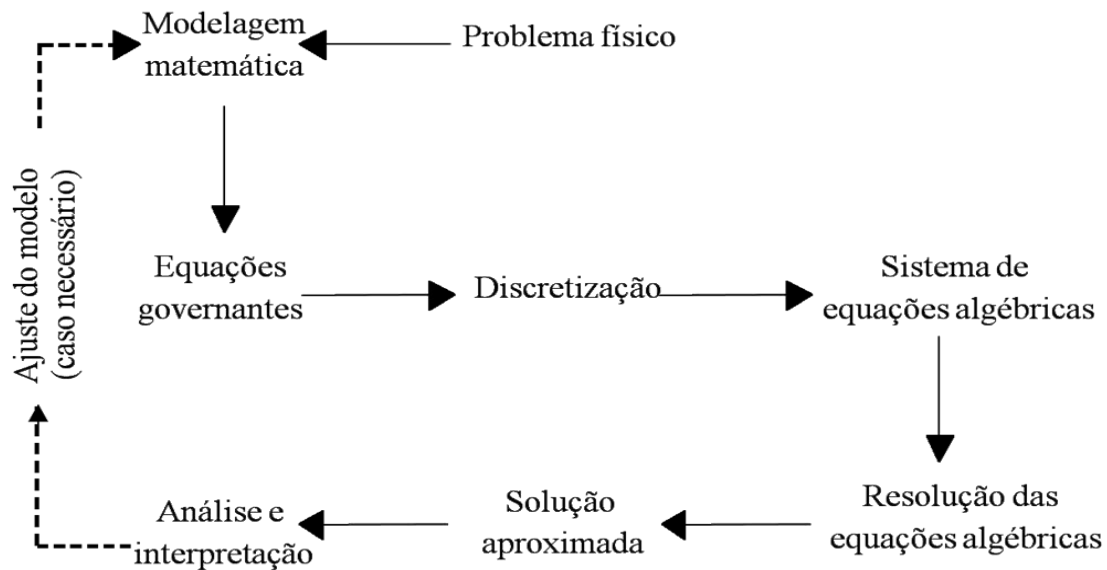


Figura 4.1 – Etapas para a solução numérica de um problema em CFD (Fortuna, 2000).

## 4.2. Malha

Segundo Oliveira (2004), a malha (ou *grid*) é a representação discreta do domínio geométrico do problema em questão, onde as equações, que descrevem o fenômeno físico, são resolvidas. As equações dos balanços são aplicadas aos elementos do domínio, a solução das equações de um elemento serve como condição de contorno para o elemento vizinho. Por isso, é necessária uma malha apropriada, com refinamento nas regiões de elevados gradientes de variação, de modo que essas variações sejam detectadas.

De acordo com Alves (2009), através do avanço tecnológico foi possível criar diversos tipos de malhas para representar um dado problema. As malhas são compostas por um conjunto de elementos, e quanto maior for o número de pontos discretos da malha (nós), mais condizente com a realidade ela será. Todavia o aumento do grau de refinamento da malha faz com que a mesma necessite de maior esforço computacional para a resolução das simulações, entretanto existe um grau de refinamento ótimo a partir do qual os resultados numéricos praticamente não variam mais. A fim de determinar o número ideal de elementos realiza-se um teste de malha.

As malhas são divididas basicamente em dois grupos que são caracterizados pela conectividade dos pontos: malhas estruturadas e malhas não estruturadas.



### 4.2.1. Malhas estruturadas

As malhas estruturadas são malhas ortogonais que obedecem a um sistema coordenado, cada elemento tem sempre o mesmo número de elementos adjacentes, exceto quando esse elemento pertence ao contorno.

Segundo Oliveira (2004), as malhas estruturadas podem ser classificadas em uniformes (Figura 4.2) e não uniformes (Figura 4.3). As uniformes são caracterizadas por possuírem pontos igualmente espaçados, já as não uniformes possuem pontos espaçados de acordo com a necessidade do domínio. Possibilitando a aglutinação ou maior espaçamento dos pontos em áreas específicas, de acordo com a variação espacial do problema.

Esse tipo de malha é facilmente gerada, porém existe uma limitação para o uso da mesma em geometrias mais complexas, as malhas de elementos hexaédricos são um exemplo deste tipo de malha.

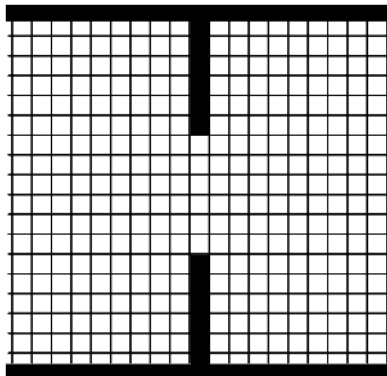


Figura 4.2 – Malha estrutura uniforme (Medronho, 2011).

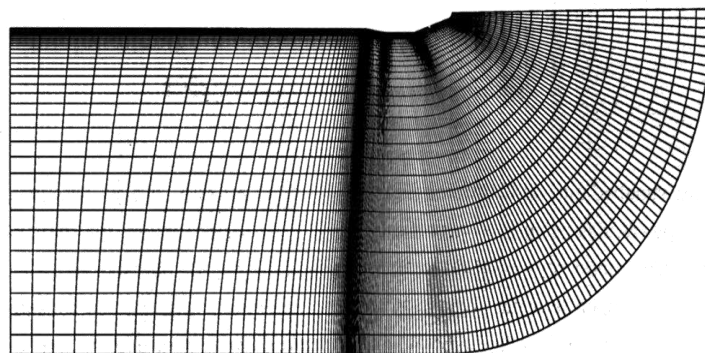


Figura 4.3 – Malha estruturada não-uniforme (Medronho, 2011).

### 4.2.2. Malhas não estruturadas

De acordo com Maliska (2004), as malhas não estruturadas não apresentam restrição ao número de elementos vizinhos, são não ortogonais, requerem informações sobre a conexão entre seus elementos e podem assumir diferentes formatos. Por serem mais flexíveis, essas malhas conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas, podendo ser utilizadas em qualquer domínio estabelecido (Figura 4.4).

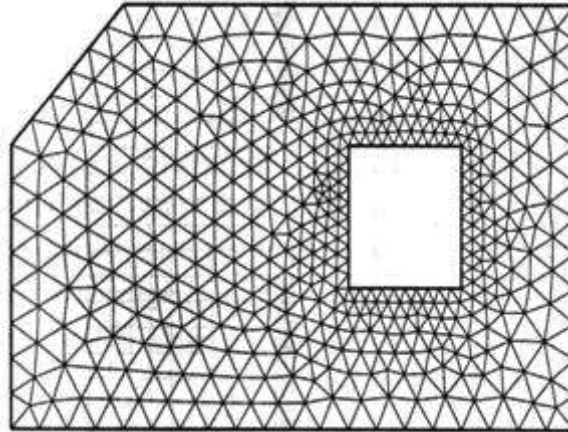


Figura 4.4 – Malha não estruturada (Medronho, 2011).

Ao selecionar o tipo de malha a ser usada, o tipo de elemento também deve ser definido. Em problemas bidimensionais, os elementos são polígonos: triângulos, quadriláteros, pentágonos e hexágonos, dentre outros, sendo mais comum o uso de triângulos, que são elementos mais simples. No caso tridimensional, os elementos são poliedros: tetraedros, pirâmides e prismas, dentre outros, sendo os tetraedros os elementos mais usados (Rego, 2008).

### 4.3. Método numérico

Segundo Maliska (1995), o método numérico aparece com o objetivo de fornecer a resolução de equações diferenciais, esta resolução é obtida através da substituição das derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Portanto, o método numérico discretiza o domínio em estudo, transformando as equações diferenciais definidas para o domínio contínuo em um sistema de equações algébricas.

Diferentemente dos métodos analíticos que fornecem solução exata e fechada para qualquer ponto do domínio na resolução das equações diferenciais, os métodos numéricos só resolvem essas equações para um determinado número de pontos que pertencem a malha. Sendo assim, quanto maior o número de pontos existente na malha, mais próximo da solução exata estará a solução numérica.

Ainda, de acordo com Maliska (1995), na área da fluidodinâmica computacional, existem três métodos tradicionais para a discretização de um domínio: método dos elementos finitos, método das diferenças finitas, e método dos volumes finitos.

#### **4.3.1. Método dos elementos finitos**

Segundo Coelho (2011), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método que analisa modelos matemáticos de problemas físicos em meios contínuos. Nesse método, o domínio de integração é dividido em um número finito de pequenas regiões denominadas de elementos finitos, transformando assim o contínuo em discreto. A continuidade da solução é obtida através das condições de contorno de cada elemento, porque neste método em cada elemento a solução é aproximada por uma função polinomial. Ao finalizar a integração dessas funções é obtido um conjunto de equações algébricas não lineares.

O MEF consegue discretizar facilmente geometrias arbitrárias e mais complexas, por isso este pode ser facilmente aplicado em malhas não estruturadas. Neste método cada elemento de sua malha é subdivisível, sendo esta uma das suas principais vantagens.

#### **4.3.2. Método das diferenças finitas**

De acordo com Coelho (2011) e Freitas (2009), no Método das Diferenças Finitas (MDF), as equações de conservação na forma diferencial são aproximadas por equações algébricas em cada nó da malha, local onde se deseja calcular a solução do problema. Essas aproximações são obtidas utilizando, por exemplo, a expansão em série de Taylor ou interpolação polinomial. Quando este último recurso é utilizado, os valores das variáveis são calculados em locais diferentes dos nós das malhas.

O MDF tem sua utilização restrita a geometrias simples e pode ser aplicado com eficiência e simplicidade para malhas estruturadas.

#### **4.3.3. Método dos volumes finitos**

Pinto e Lage (2001) estudaram as discretizações realizadas pelo MVF e pelo MDF. O primeiro método possui base física e utiliza a equação diferencial nos subdomínios da malha através da integração em cada volume, já o segundo tem dedução puramente matemática aplicando a equação diferencial em nós discretos da malha, apesar dessa diferença esses métodos são confundidos porque muitas vezes geram equações discretizadas iguais. Em ambos os casos, problemas de instabilidade ou convergência são mais raros de acontecer, pois é possível garantir que cada volume de controle obedece à lei de conservação.

Segundo Maliska (2004), o Método dos Volumes Finitos (MVF) é caracterizado pela utilização da forma integral das equações de conservação para a obtenção das equações aproximadas. As equações de conservação são aplicadas em cada um dos finitos volumes de controle gerados com a subdivisão do domínio e, no centróide de cada volume, é calculado o valor das variáveis.

Uma das principais vantagens deste método é que o mesmo pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, até mesmo para geometrias complexas. Além disso, a integração das equações diferenciais são obtidas através dos balanços de conservação das propriedades físicas diretamente sobre a malha, o que facilita a obtenção de equações para a solução numérica.

De acordo com Maliska (2004), este método é utilizado na maioria dos *softwares* de CFD disponíveis no mercado, esse método é utilizado para a solução de problemas de escoamento de fluidos e transferência de calor.

#### **4.4. Modelos de turbulência**

A observação natural do escoamento de fluidos revela imediatamente a notável complexidade de suas estruturas. Os escoamentos turbulentos são comuns e apresentam um perfil caótico e aleatório. Sendo caracterizados pelos altos números de Reynolds, alto grau de vorticidade, comportamento dissipativo e por possuírem flutuações

aparentemente randômicas e tridimensionais, ou seja, estas flutuações ocorrem em todas as direções do escoamento, na maioria das vezes de forma anisotrópica (Moraes, 2006).

Um modelo de turbulência é um conjunto de equações, expressões e coeficientes empíricos, usado nas soluções numéricas das equações de Navier-Stokes e da energia média de Reynolds. Apesar da generalidade das equações de Navier-Stokes, a diversidade de escalas presentes ainda hoje limita, a alguns casos, a simulação numérica direta de escoamentos turbulentos. Ao analisar o problema, Reynolds percebeu que as propriedades dos escoamentos turbulentos poderiam ser descritas pela superposição de um termo flutuante a um valor médio, portanto os campos presentes nas equações governantes foram divididas em componentes médias e componentes flutuantes, ou turbulentas (Freire *et al.*, 2006).

O resultado desse procedimento consistiu em uma nova equação na qual os efeitos do campo turbulento estão isolados dos termos descritivos do escoamento médio, a aplicação desta estratégia levou ao surgimento de novas variáveis dinâmicas, sendo seu número maior do que o número de equações governantes disponíveis. A estratégia de Reynolds resultou, então, em um problema matematicamente indeterminado, o qual é usualmente referenciado como o problema de “fechamento” da turbulência. Em um procedimento rigoroso, manipulações algébricas aplicadas às equações de Navier-Stokes fornecem equações adicionais, que, por sua vez, apresentam novas incógnitas de ordem superior. Tal comportamento é tipicamente observado nos sistemas estocásticos não-lineares (Freire *et al.*, 2006).

Os modelos de fechamento podem ser normalmente classificados como (Freire *et al.*, 2006):

- Modelos algébricos: Esses modelos são baseados na hipótese de Boussinesq, que estabelece o conceito de viscosidade turbulenta,  $\nu_t$ . Nesses modelos, uma equação algébrica, baseada em escalas turbulentas características, é empregada para a determinação do valor da viscosidade turbulenta.
- Modelos a uma equação: Nesses modelos, uma equação diferencial de transporte é resolvida para uma determinada propriedade turbulenta. Em geral, a energia cinética turbulenta ( $k$ ) é adotada como a propriedade turbulenta de referência. Uma segunda propriedade, normalmente um comprimento de escala ( $l$ ), é então

fornecida por meio de uma expressão algébrica. Os modelos a uma equação empregam, igualmente, a hipótese de viscosidade turbulenta.

- Modelos de duas equações: Os modelos a duas equações utilizam duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas, configurando-se, assim, como modelos de fechamentos completos. Esses modelos adotam, tipicamente, uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta ( $k$ ), juntamente com uma equação de transporte para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa ( $\varepsilon$ ), ou mesmo, em alguns casos, uma frequência de passagem de grandes estruturas turbulentas ( $\omega$ ). Tais modelos, em conjunto com os modelos algébricos e os modelos de uma equação, formam os chamados *modelos de viscosidade turbulenta*.
- Modelo para tensões de Reynolds: Também chamados de *modelos de fechamento de segunda ordem*, esses modelos utilizam equações de transporte explícitas para o tensor de Reynolds. Entretanto, mesmos nesses modelos, ainda se faz necessário à adoção de uma equação de transporte complementar para  $\varepsilon$  ou  $\omega$  de modo a obter o fechamento completo do problema. Estes modelos não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta.

De acordo com Schuenck *et al.* (2006), o modelo dos tensores de Reynolds representa de forma mais adequada o fluxo reverso da fase menos densa que ocorre no núcleo central em direção ao *overflow*, capturando as formas dos redemoinhos existentes no escoamento, sendo por esta razão, o modelo mais apropriado para escoamentos utilizando hidrociclones.

Desta forma optou-se no presente trabalho pela utilização do modelo de tensão de Reynolds (RSM) por este ser o mais utilizado em simulações de CFD envolvendo hidrociclones.

#### **4.4.1. Modelo RSM**

A aleatoriedade da dinâmica turbulenta, juntamente com seu número praticamente infinito de graus de liberdade, levou a idéia de que somente tratamentos estatísticos seriam capazes de formular modelos preditivos de escoamentos. Esta visão começou a se estabelecer na comunidade primordialmente a partir de um artigo de Osborne Reynolds, publicado ainda no século XIX. Neste trabalho, Reynolds (1895)

introduziu uma decomposição dos parâmetros que caracterizam o escoamento em componentes “médias” e “flutuantes” (Freire *et al.*, 2006).

Nesta decomposição, é a parte flutuante que essencialmente carrega toda a dinâmica do escoamento via sua dependência temporal, a decomposição possibilita a modelagem numérica ao introduzir uma formulação estatística para a descrição da dinâmica dos escoamentos turbulentos. Contudo ao adotar uma quantidade restrita de parâmetros ocorre a perda de informação potencialmente importante (Freire *et al.*, 2006).

Existem inúmeros modelos com esta abordagem, geralmente estes se diferem pelos valores de suas constantes. O modelo SSG (Speziale-Sarkar-Gatski), segundo Schuenck *et al.* (2006) *apud* Freitas (2007), é recomendado para calcular o escoamento em ciclones e hidrociclones. Esse modelo é capaz de representar mais adequadamente o fluxo reverso que ocorre no núcleo central, capturando as formas dos turbilhões presentes.

A equação de transporte para os tensores de Reynolds pode ser escrita da seguinte forma (Freire *et al.*, 2006):

$$\frac{D\overline{u'_i u'_j}}{Dt} = D_{ij} + \wp_{ij} + \mathcal{F}_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (4.1)$$

Em que:

$$\frac{D\overline{u'_i u'_j}}{Dt} = \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \quad (4.2)$$

representa o transporte convectivo do tensor de Reynolds ao longo do escoamento médio ( $\overline{u_k}$ ) e  $u'_i(x, t)$  e  $u'_j(x, t)$  são as flutuações da velocidade.

O termo  $\wp_{ij}$  representa a taxa de produção da tensão turbulenta à medida que esta é transportada ao longo do escoamento, sendo afastadas dos gradientes da velocidade média.  $\mathcal{F}_{ij}$  esta diretamente relacionada com a taxa de criação referente às forças instantâneas de corpo  $f'_i(x, t)$ . Uma vez que os gradientes de velocidade média são maiores em algumas direções do que em outras, e que a existência de contornos físicos ou forças de empuxo causam um amortecimento seletivo das flutuações turbulentas em direções específicas, a turbulência gerada pelos termos acima é, em geral, anisotrópica (Freire *et al.*, 2006).

$$\phi_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_k'} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \quad (4.3)$$

$$\mathcal{F}_{ij} = \overline{u_i' f_j'} + \overline{u_j' f_i'} \quad (4.4)$$

O  $\Phi_{ij}$  representa o termo de correlação entre as flutuações de pressão e velocidade, esse termo não contribui para o nível global da energia turbulenta, servindo apenas como um agente de redistribuição da energia entre os componentes normais da tensão de Reynolds. E por último, o termo  $\varepsilon_{ij}$  que representa a taxa de dissipação do tensor de Reynolds devido a viscosidade  $\nu$  (Freire *et al.*, 2006).

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij1} + \Phi_{ij2} \quad (4.4)$$

Sendo:

$$\Phi_{ij1} = -\varepsilon \cdot \rho \left[ C_{s1} a_{ij} + C_{s2} \left( a_{ik} a_{kj} - \frac{1}{3} a_{kl} a_{kl} \delta_{ij} \right) \right] \quad (4.5)$$

e

$$\begin{aligned} \Phi_{ij1} = & -C_{r1} P a_{ij} + C_{r2} P a_{ij} \rho k S_{ij} \sqrt{a_{kl} a_{kl}} + C_{r4} \left( a_{ik} S_{kj} + S_{ik} a_{kj} - \frac{2}{3} a_{kl} S_{kl} \delta_{ij} \right) + \\ & C_{r5} \rho k (a_{ik} w_{kl} + w_{ik} a_{kj}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

A equação para o termo  $\varepsilon$  é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \cdot \rho) + \frac{d}{dx_k} (\rho U_k \cdot \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{e1} P - C_{e2} \varepsilon \cdot \rho) + \frac{d}{dx_k} \left[ \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \left( \mu + \rho C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] \quad (4.7)$$

sendo

$$a_{ij} = \frac{\overline{u_j u_k}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \quad (4.8)$$

e

$$w_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.9)$$

Onde  $a_{ij}$  representa o Tensor de Reynolds,  $S_{ij}$  é o tensor da taxa de deformação e  $w_{ij}$  representa a vorticidade. Na Tabela 4.1, encontram-se os valores das constantes utilizadas no modelo SSG.



**Tabela 4.1 - Constantes do modelo SSG.**

$C_\mu$	$\delta\varepsilon$	$C_s$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{s1}$	$C_{s2}$	$C_{r1}$	$C_{r2}$	$C_{r3}$	$C_{r4}$	$C_{r5}$
0,10	1,36	0,22	1,45	1,83	1,70	-1,05	0,90	0,80	0,65	0,625	0,20

## 5. Metodologia

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

### 5.1. Software e Hardware

Neste trabalho as simulações foram realizadas utilizando o pacote computacional da ANSYS, Inc., versão 13.0. Os *softwares* de CFD utilizados foram o *Design Modeler*, para a elaboração da geometria, o *ICEM* para confecção da malha, o *FLUENT* para modelagem do problema numérico e posteriormente sua resolução e o *CFD-POST* para a visualização dos resultados.

Para a execução das simulações foi utilizado um computador com processador Intel Core i7 2,8GHz, 4,0GB de memória RAM e 500,0GB de memória física.

### 5.2. Geometria

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi tomada como base a geometria desenvolvida por Araújo (2012). O hidrociclone de Araújo (2012) foi modificado para a realização das simulações numéricas visando à obtenção de correntes ricas em água, óleo e areia.

Através da Figura 5.1 é possível visualizar o hidrociclone construído no *Design Modeler* (Ansys 13.0).

O corpo do hidrociclone é formado por três partes: uma seção cilíndrica e duas cônicas. A parte cilíndrica possui um diâmetro de 70mm, já a primeira seção cônica apresenta um raio de 20mm e um ângulo de  $5,0^\circ$  e a segunda seção um ângulo de  $2,0^\circ$ .

O *overflow1*, o *overflow2* e o *underflow* possuem, respectivamente, 10mm, 7mm e 12,5mm de raio. O diâmetro do tubo superior é menor que o diâmetro do orifício inferior, o que é uma característica de hidrociclones aplicados na separação líquido-

líquido. A distância do *vortex finder* ao tubo de *overflow2* é de 0,5mm e sua profundidade é de 4mm.

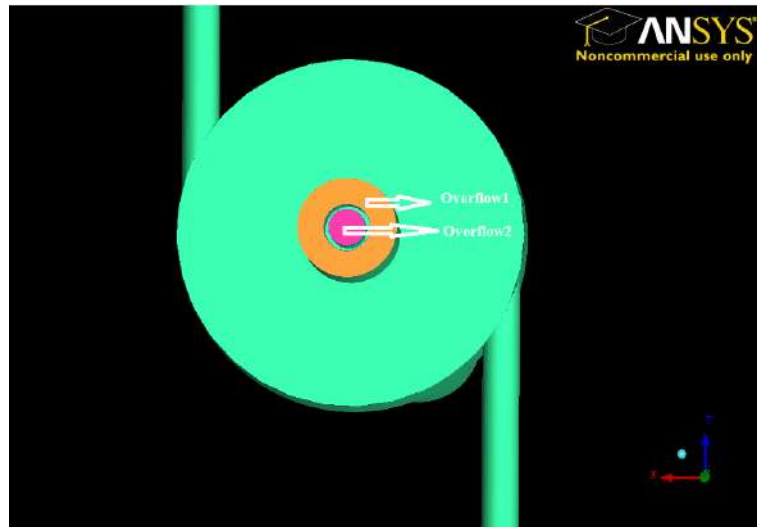
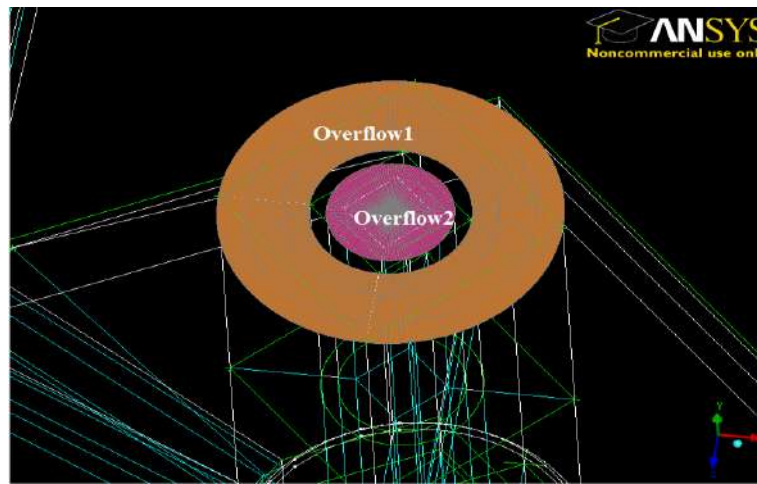
A alimentação é realizada por duas entradas cilíndricas de 7,5mm de raio e 45mm de comprimento, essas entradas são diametralmente opostas apresentando um eixo normal ao do equipamento, estas também são posicionadas tangencialmente à parede do cilindro, o que proporciona a uniformização do campo de pressão e de velocidade em torno do eixo deste equipamento.



**Figura 5.1 – Geometria do hidrociclone construída no programa *Design Modeler*.**

### **5.3. Malha**

Ao término da construção da geometria modificada, iniciou-se a confecção da malha do hidrociclone no *ICEM* (ANSYS 13.0) utilizando distribuição geométrica regular ao longo de todo domínio, que se baseia na estratégia de criação de blocos que gera uma malha estruturada hexaédrica, além da criação da malha neste software também foi inserido o segundo *overflow* proposto no presente trabalho, com 7mm de diâmetro.



**Figura 5.2 – Malha do hidrociclone construída no programa ICEM, representando a localização dos dois overflows existentes no hidrociclone proposto.**

As malhas estruturadas são geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos. 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.

Para a elaboração de uma malha de boa qualidade alguns parâmetros foram considerados e seus valores respeitaram os critérios indicados pelo manual da ANSYS 13.0. Através da Tabela 5.1 é possível observar os limites dos valores utilizados na construção da malha.

**Tabela 5.1 – Critérios de qualidade utilizados para a construção da malha.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Critérios</b>
<b>Aspect Ratio</b>	< 100
<b>Volume Change</b>	< 5
<b>Determinant 2X2X2</b>	> 0
<b>Quality</b>	> 0,3

O parâmetro *Aspect Ratio*, grau de achatamento, diz respeito à razão entre o comprimento da maior e da menor aresta da face de um elemento, esta diferença não pode ser maior que 100 (Manual CFD, versão 13.0).

O *Volume Change* para um dado elemento é definido como à razão entre o maior volume da sua vizinhança e o volume do dado elemento, isto quer dizer, este parâmetro avalia a diferença do volume do elemento em relação ao seu vizinho. O valor default é entre 0 e 20, neste trabalho o valor máximo utilizado foi igual a 5 (Manual CFD, versão 13.0).

O parâmetro *Determinant (2x2x2 stencil)* apresenta com range default o valor de 0 a 1, onde o valor 1 indica que o elemento é totalmente regular. Já o valor 0 indica que há alguma irregularidade em alguma das arestas. Quando o *Determinant (2x2x2 stencil)* apresenta valores negativos indica que os elementos estão invertidos ou sobrepostos (Manual CFD, versão 13.0).

A qualidade da malha desempenha um papel significativo na precisão e estabilidade do cálculo numérico e sua qualidade é essencial independente do tipo de malha usada em seu domínio. O *Quality* é um importante indicador de qualidade de malha, pois permite verificar a qualidade ortogonal dos elementos da mesma. Os piores elementos deverão ter uma qualidade ortogonal mais próxima a 0 e as melhores células terão uma qualidade ortogonal mais próximo de 1 (Manual CFD, versão 13.0).

No hidrociclone existem regiões críticas onde ocorre aumento abrupto da área de escoamento após a passagem do fluido ou onde há grandes variações de velocidade. As regiões de entrada e saída de fluido são um exemplo deste tipo de região e precisam ser refinadas. Por isso, foram construídos elementos menores nestas regiões, já que são regiões onde ocorre aumento abrupto da área de escoamento. Foi necessário também o refinamento de toda a região próxima à parede do hidrociclone, visto que nessas regiões ocorrem de grandes gradientes de velocidade.

### 5.3.1. Teste de malha

A fim de garantir que a malha utilizada não estivesse interferindo nos resultados da simulação, e também não houvesse um aumento do esforço computacional de forma desnecessária com um número excessivo de iterações que tornam as simulações ainda mais demoradas, um teste de malha foi realizado, partindo-se de uma malha mais refinada para uma menos refinada.

Foram desenvolvidas quatro malhas de elementos hexaédricos com diferentes graus de refinamento, como pode ser visto nas Figuras 5.3 e 5.4. Todas as malhas confeccionadas seguiram os mesmos critérios de construção mencionados acima, diferenciando, somente entre elas o número de elementos e nós, conforme apresentado na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Valores utilizados no teste de malha.**

<b>Malha</b>	<b>Nº de elementos</b>	<b>Nº de nós</b>
1	1.255.276	1.234.772
2	1.134.948	1.117.182
3	838.102	821.742
4	563.398	550.922

Neste teste, optou-se por realizar simulações bifásicas (água/óleo) realizadas em regime pseudo-transiente. O modelo de turbulência utilizado foi o RSM (*Reynolds Stress Model*), o escoamento no interior do equipamento foi considerado isotérmico e incompressível, e as condições de contorno foram as mesmas utilizadas por Araújo (2012) em seus testes de simulação computacional.

Nas entradas, foram estabelecidos como velocidade do fluido 4m/s, diâmetro da gota de óleo igual a 250 µm, o *overflow1*, *overflow2* e *underflow* foram utilizados trabalhando com uma pressão de 1,0 bar. Os parâmetros dos fluidos utilizados nessas simulações encontram-se na Tabela 5.3. Efeitos de quebra e coalescência foram desconsiderados no presente estudo.

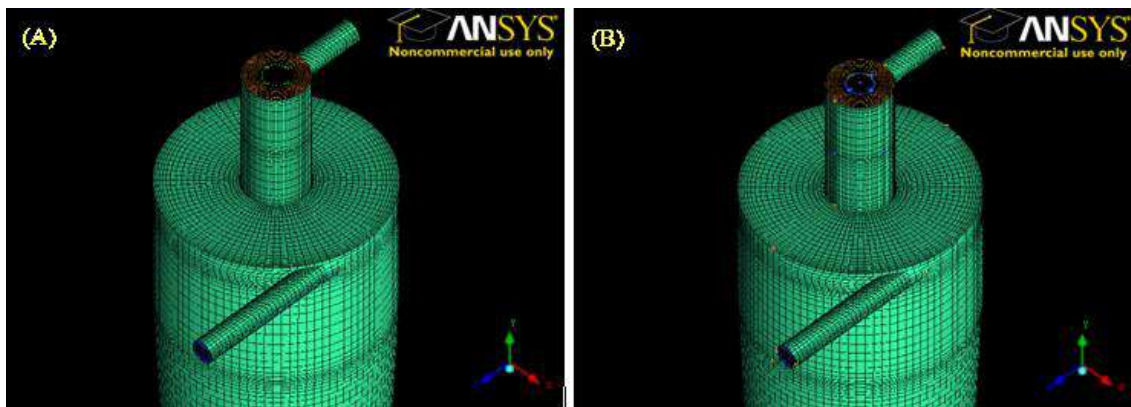


Figura 5.3 – Malha 1 (A) e malha 2 (B) empregadas no teste de malha.

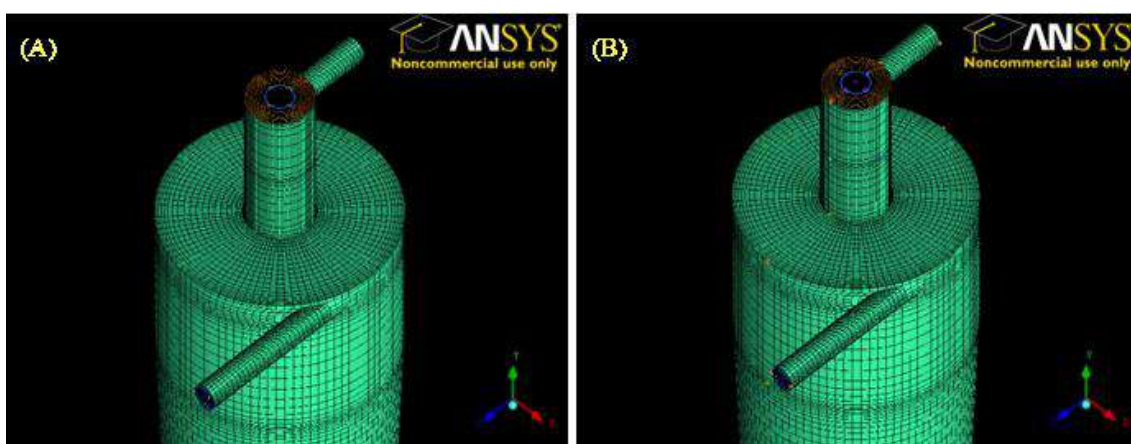


Figura 5.4 – Malha 3 (A) e malha 4 (B) empregadas no teste de malha.

Tabela 5.3 – Propriedades físicas dos fluidos utilizados nas simulações do teste de malha.

	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
Água	996,5	0,885 x 10 <sup>-03</sup>
Óleo	840	13,2 x 10 <sup>-03</sup>
Areia	1470	-

#### **5.4. Simulações Numéricas**

Todas as simulações foram realizadas no *Fluent* (ANSYS 13.0). O modelo de turbulência utilizado foi o Reynolds Stress Model, proposto por Gibson & Launder (1978).

Quanto à abordagem multifásica, as simulações utilizando água/óleo foram realizadas primeiramente utilizando o modelo euleriano, utilizado para a resolução das equações da continuidade e do movimento. Ao final destas simulações, a areia foi adicionada ao hidrociclone utilizando a modelagem lagrangeana. A concentração de areia utilizada foi igual a 5% v/v na entrada do equipamento.

A Tabela 5.4 apresenta o detalhamento dos parâmetros empregados nas simulações.



**Tabela 5.4 – Configuração utilizada no Fluent para as simulações.**

<i><b>Parâmetro</b></i>	<i><b>Método</b></i>
Tipo de Solver	Pressure Based
Modelo multifásico	Euleriano
Modelo da viscosidade	RSM
Reynolds-stress model	<i>Linear Pressure Strain</i>
Reynolds-stress option	<i>Wall Reflection Effects</i>
Near-wall treatment	<i>Standard Wall Functions</i>
RSM multiphase model	<i>Mixture</i>
<i><b>Condições de contorno</b></i>	
<i><b>Zona</b></i>	<i><b>Tipo</b></i>
Entrada	<i>velocity-inlet</i>
overflow	<i>pressure-outlet</i>
Underflow	<i>pressure-outlet</i>
Parede	<i>wall (no-slip)</i>
<i><b>Método de solução</b></i>	
<i><b>Acoplamento Pressão Velocidade</b></i>	
Esquema	Multiphase Coupled
<i><b>Discretização Espacial - esquema de interpolação</b></i>	
Gradiente	<i>Least Square Cell Based</i>
Momento	2º ordem <i>Upwind</i>
Fração Volumétrica	1º ordem <i>Upwind</i>
Energia Cinética Turbulenta	1º ordem <i>Upwind</i>
Taxa de dissipação turbulenta	1º ordem <i>Upwind</i>
Tensores de Reynolds	1º ordem <i>Upwind</i>
Regime	Pseudo-transiente

O balanço de massa para ambas as fases do problema foi um parâmetro adotado para a análise de convergência, no caso estes balanços deveriam possuir um erro relativo inferior a 0,5% e também foi analisando os resíduos da continuidade, sendo este inferior a  $10^{-5}$ .

Em função dos *softwares* utilizados para a resolução do problema não possuem modelos de quebra e coalescência razoáveis para descrever o problema físico em questão e da dificuldade de implementação destes algoritmos no *software*, estes efeitos não foram considerados neste estudo.

## 6. Resultados e Discussão dos Resultados

### 6.1. Comparação entre o hidrociclone modificado e o hidrociclone de Araújo (2012)

Para selecionar a malha utilizada no presente trabalho, foi observado o perfil de velocidade tangencial, porque segundo Svarovsky (1990) a magnitude do campo centrífugo no interior do hidrociclone é determinado pela intensidade da velocidade tangencial. As malhas com elementos superiores a 800 mil apresentaram valores bem semelhantes, por isso, para a realização deste trabalho optou-se pela malha de 800mil elementos (Figura 6.1), pois a mesma demanda menor tempo de simulação e esforço computacional.

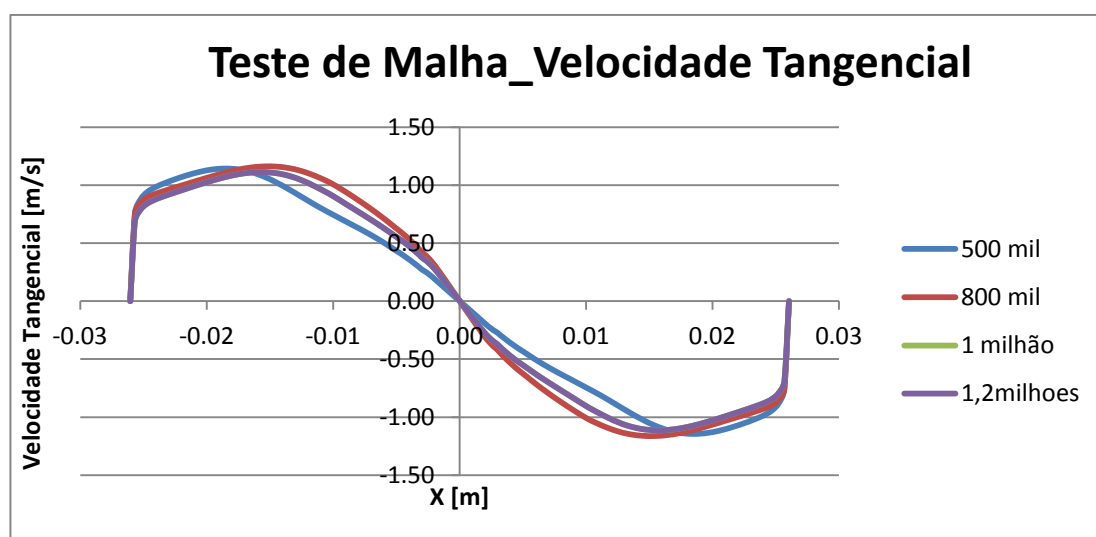


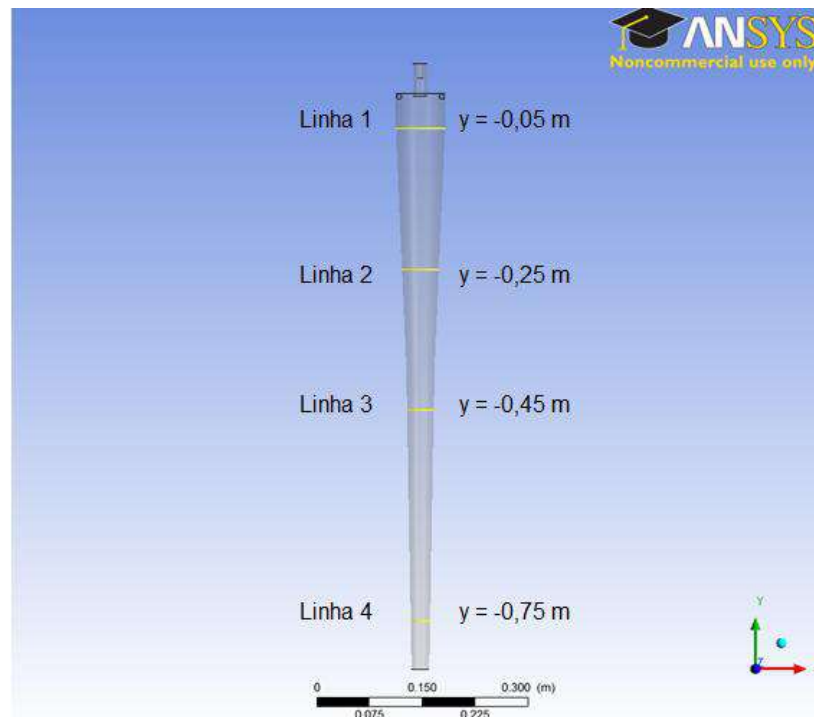
Figura 6.1 – Perfis da velocidade tangencial obtido na simulação numérica na posição de 25 cm para o teste de malha.

No presente trabalho, foi realizada a comparação do hidrociclone modificado com o hidrociclone elaborado por Araújo (2012). As diferenças destes dois trabalhos estão restritas à inserção de um segundo *overflow* no hidrociclone do presente trabalho, à malha e ao tipo de regime empregado, sendo o regime estacionário para o trabalho de Araújo (2012) e pseudo-transiente para este trabalho.

No regime pseudo-transiente é possível alcançar os efeitos do estado estacionário iterativo usando a sub-relaxação a partir do mesmo campo inicial, tendo um tamanho de passo eficaz. Cálculos do estado estacionário, alternativamente, podem ser interpretados como soluções pseudo-transientes com variação espacial em diferentes intervalos de

tempo. Essa abordagem é bastante eficaz, em problemas de estabilidade, como fluxos com alto número de redemoinhos como em um hidrociclone (Versteeg & Malalasekera, 1995).

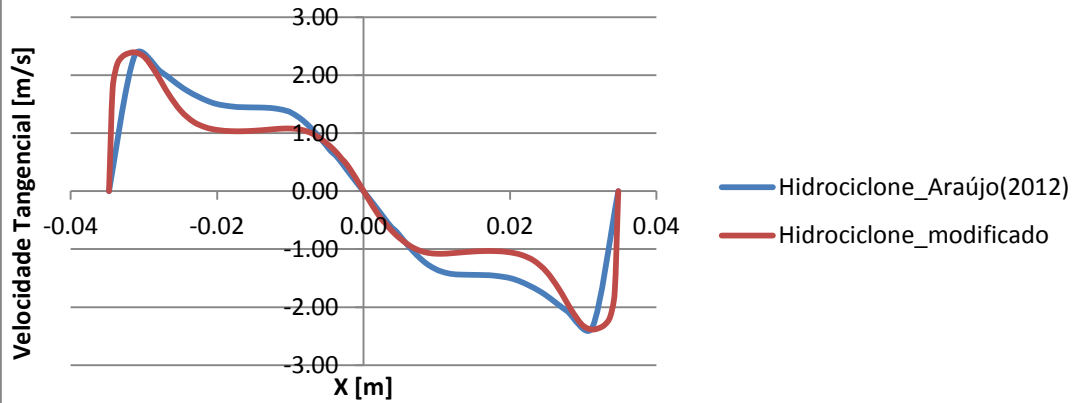
A fim de avaliar as mudanças dos perfis de velocidade tangencial no interior do equipamento, comparando o hidrociclone estudado com o desenvolvido por Araújo (2012), diferentes alturas ao longo do comprimento do hidrociclone foram selecionadas conforme mostra a Figura 6.2.



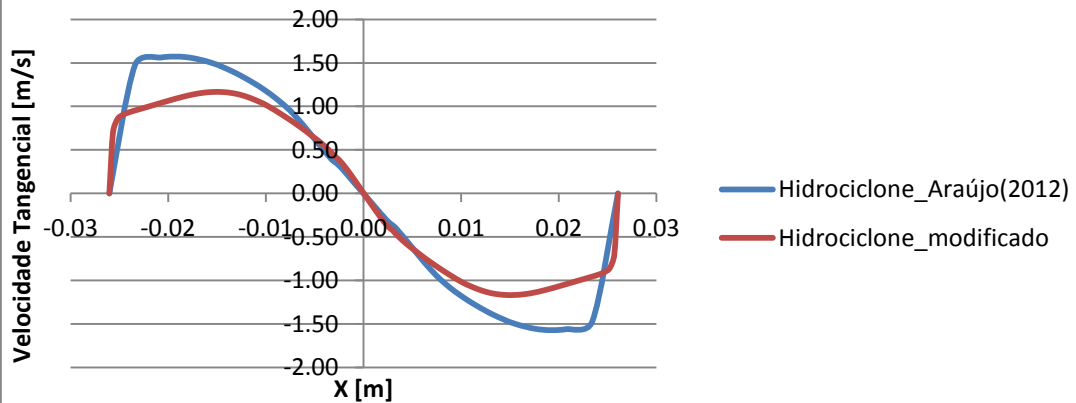
**Figura 6.2 – Retas a diferentes alturas ao longo do comprimento do hidrociclone para a avaliação dos perfis de velocidade tangencial.**

A Figura 6.3 mostra os perfis de velocidades obtidos por Araújo (2012) e neste trabalho nas linhas mostradas na Figura 6.2.

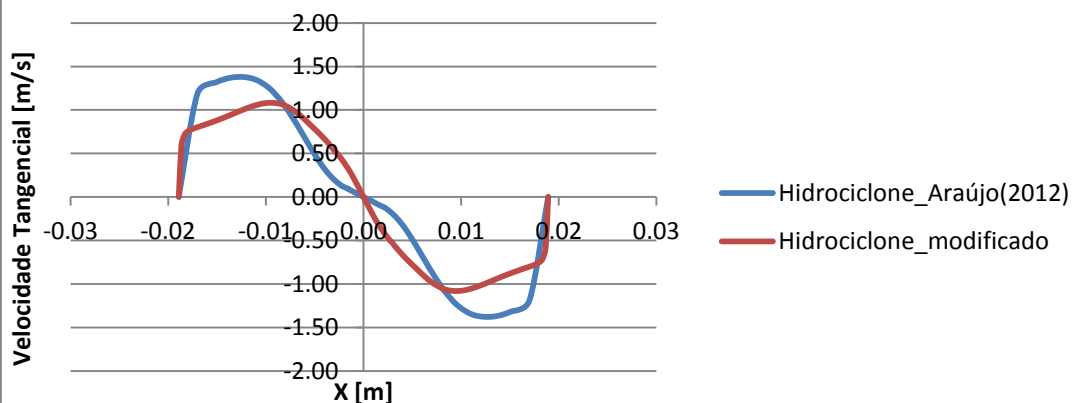
### Velocidade Tangencial\_Linha1\_5cm



### Velocidade Tangencial\_Linha2\_25cm



### Velocidade Tangencial\_Linha3\_45cm



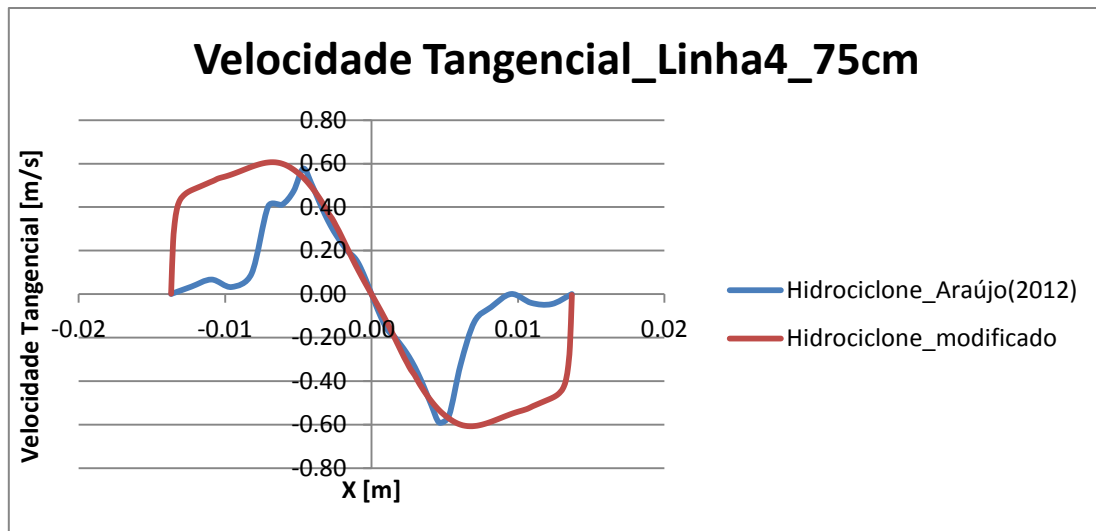


Figura 6.3 – Perfis da velocidade tangencial obtido na simulação numérica na posição de 5, 25, 45 e 75 cm para o hidrociclone de Araújo (2012) e para o hidrociclone deste trabalho.

Ao analisar a Figura 6.3, obtém-se perfis semelhantes para os regimes estacionário e pseudo-transiente para as linhas 1, 2 e 3. Contudo, ao comparar a linha mais próxima do underflow, linha 4, os desvios foram maiores que os encontrados para as linhas 1, 2 e 3. Este resultado pode estar relacionado com a diferença de resolução do problema da recirculação entre estas duas regiões abordadas no regime estacionário e pseudo-transiente. Pois, devido aos elevados gradientes de velocidade e também devido às flutuações existentes no campo de pressão no interior do hidrociclone, é possível que a descrição do escoamento também dependa da evolução temporal e não só da discretização da malha (Araújo, 2012).

A Tabela 6.1 apresenta uma comparação entre os valores simulados por Araújo (2012) e os obtidos neste trabalho para a eficiência granulométrica (G) para a gota de 250  $\mu\text{m}$  e para razão de fluido (Rf).

Tabela 6.1 – Comparação dos valores das simulações para a eficiência granulométrica (G) e para a razão de fluido (Rf)

Hidrociclone	G (%)	Rf (%)
Araújo (2012)	99,661	3,514
Modificado	98,857	3,148

Ao analisar a Tabela 6.1, é possível verificar que os resultados simulados para o hidrociclone modificado, com dois *overflows*, são bem similares aos obtidos por Araújo (2012), com um *overflow*. Através destes resultados, pode-se concluir que a adição de um segundo *overflow* não acarretou em perda de eficiência e nem em aumento da razão de fluido.

## **6.2. Simulações trifásicas utilizando o hidrociclone modificado**

Inicialmente foi proposto neste trabalho variar o índice de BSW. Contudo, este parâmetro varia de poço para poço explorado. Por este motivo, foi empregada a variação da concentração volumétrica do óleo na entrada do hidrociclone.

Foram realizadas seis simulações numéricas, inicialmente bifásicas (água/óleo), variando a concentração volumétrica de óleo na entrada de 30 a 80% v/v. Através destas simulações foi possível obter as vazões mássicas de óleo e água no *overflow1*, *overflow2* e na entrada. Com base nestas vazões, foram calculadas as eficiências granulométricas (razão entre as vazões de óleo no *overflow* e na alimentação) e as razões de fluido (razão entre as vazões de água no *overflow* e na alimentação), conforme Tabela 6.2.

Ao analisar as simulações obtidas, é possível verificar que o aumento da concentração de óleo na entrada diminui a eficiência granulométrica e aumenta a razão de fluido. Este fenômeno pode estar relacionado com o aumento da viscosidade e a diminuição da densidade, além da variação significativa no número de Reynolds e da diminuição do número de espirais descendentes.

O resultado obtido é o oposto do que ocorre em uma separação ideal, conforme descrito por Nascimento (2008), pois, em uma separação ideal, a eficiência deve ser máxima e a razão de fluido mínima. Nesta condição, o óleo é recuperado com elevada concentração.

**Tabela 6.2 – Resultado de eficiência granulométrica e razão de fluido obtidas a partir das simulações numéricas.**

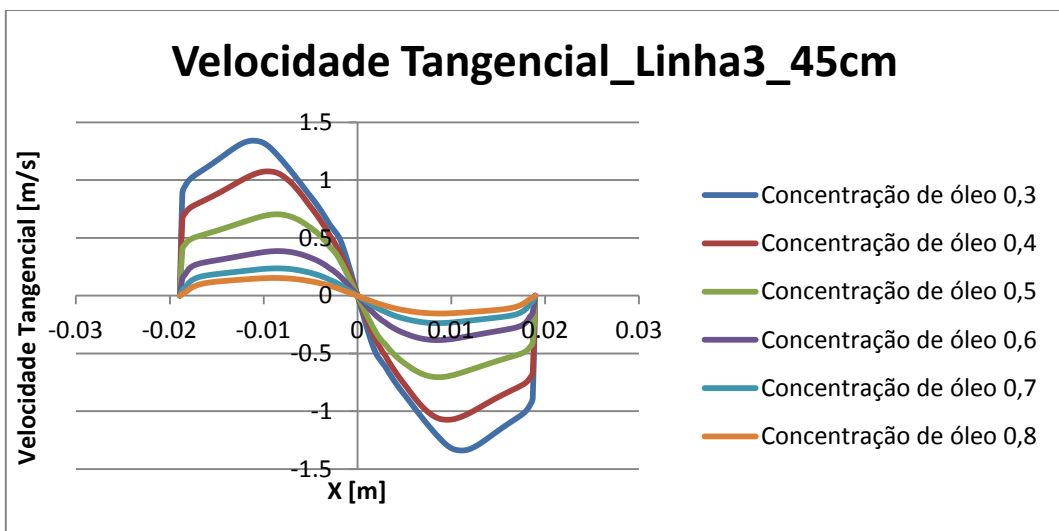
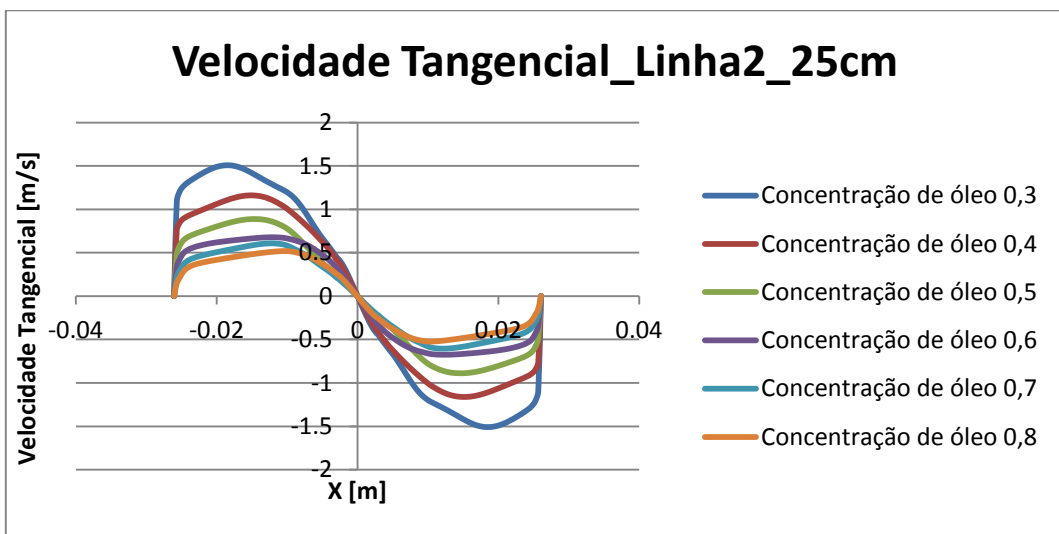
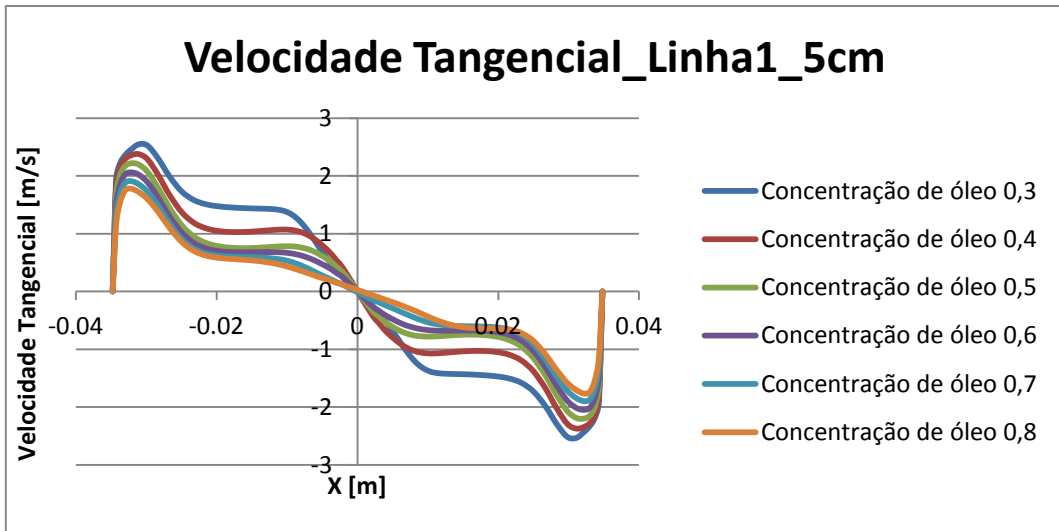
<b>Concentração de óleo (%)</b>	<b>Vazão de óleo (kg/s)</b>	<b>G <i>overflow1</i> (%)</b>	<b>Recuperação de óleo <i>Overflow1</i> (kg/s)</b>	<b>Vazão de água (kg/s)</b>	<b>Razão de fluido <i>overflow1</i> (%)</b>
<b>30</b>	0,1089	96,120	0,1047	0,2179	2,197
<b>40</b>	0,1179	95,710	0,1128	0,2097	3,147
<b>50</b>	0,1473	85,557	0,1260	0,1748	3,817
<b>60</b>	0,1768	71,194	0,1259	0,1398	8,211
<b>70</b>	0,2063	66,903	0,1380	0,1049	19,474
<b>80</b>	0,2357	66,403	0,1565	0,0699	26,896

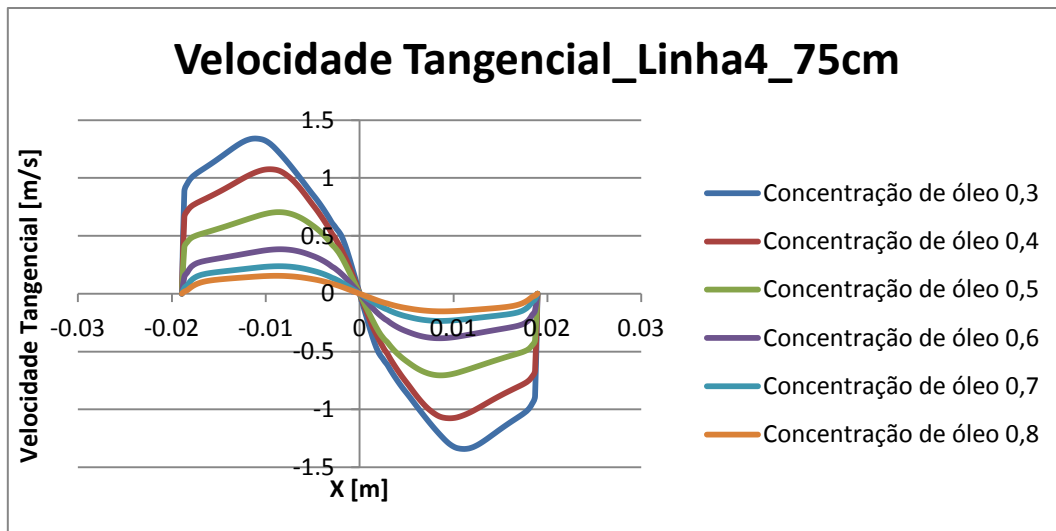
<b>Concentração de óleo (%)</b>	<b>Vazão de óleo (kg/s)</b>	<b>G <i>overflow2</i> (%)</b>	<b>Recuperação de óleo <i>Overflow2</i> (kg/s)</b>	<b>Vazão de água (kg/s)</b>	<b>Razão de fluido <i>overflow2</i> (%)</b>
<b>30</b>	0,1089	3,880	0,0042	0,2179	0,000
<b>40</b>	0,1179	4,190	0,0049	0,2097	0,001
<b>50</b>	0,1473	10,586	0,0156	0,1748	0,032
<b>60</b>	0,1768	11,348	0,0201	0,1398	0,372
<b>70</b>	0,2063	12,120	0,025	0,1049	2,444
<b>80</b>	0,2357	12,049	0,0284	0,0699	4,026

Primeiramente foi observado o perfil de velocidade tangencial, pois esse parâmetro determina diretamente a intensidade do campo centrífugo no interior do hidrociclone, ou seja, o seu poder de separação, conforme observado em Nascimento (2008).

Ao comparar os resultados obtidos (Figura 6.4) para o perfil de velocidade tangencial, com os descritos por Nascimento (2008), observa-se uma alteração neste perfil próximo a parede, principalmente para as linhas 1 e 2, entretanto este resultado é bastante semelhante ao descrito por Rego (2008). Para as linhas mais afastadas da entrada, como linhas 3 e 4, o perfil da velocidade tangencial comporta-se como o esperado por Nascimento (2008), pois as velocidade tangencial aumentam a partir da parede com o decréscimo do raio, passando então, por um máximo, diminuindo na direção do núcleo central.







**Figura 6.4 – Perfis da velocidade tangencial obtido na simulação numérica na posição de 5, 25, 45 e 75 cm.**

Através destes gráficos, foi observado que a intensidade da velocidade tangencial diminuiu ao longo do hidrociclone, principalmente próximo do orifício do *underflow*. Notou-se também, que para as linhas mais próximas do *underflow* os perfis se tornavam mais distintos. Tal comportamento pode estar associado à diminuição da distância entre a parede e o eixo central à medida que se avança em direção ao *underflow*, conforme descrito por Araújo (2008).

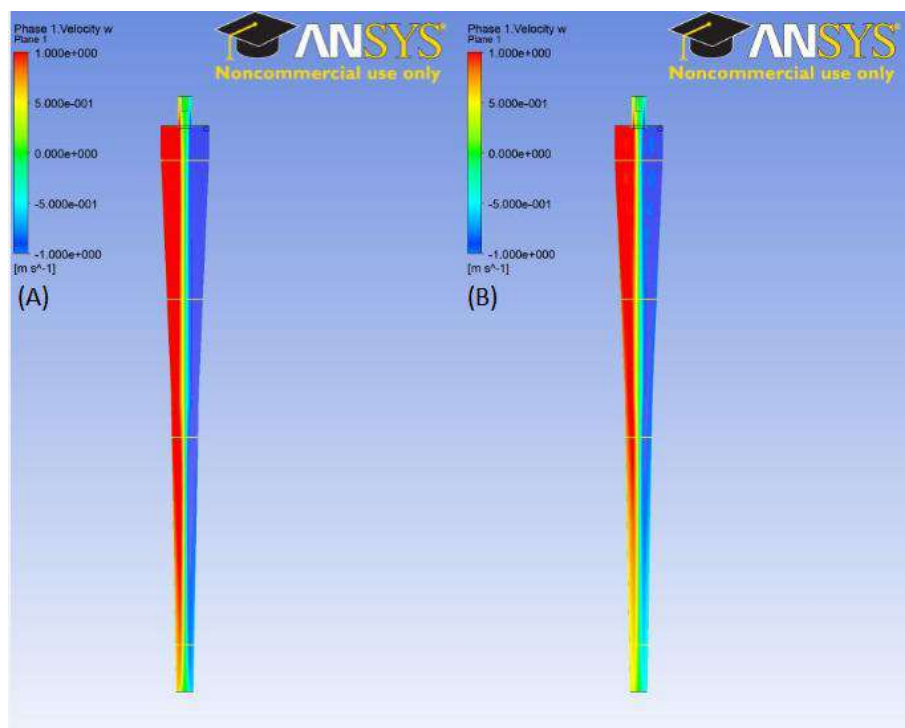
Ao analisar os perfis de velocidade tangencial para as diferentes concentrações de óleo, percebe-se também uma diminuição do gradiente da velocidade ao longo do hidrociclone com o aumento do percentual de óleo. Este fato pode estar relacionado à diminuição do fluxo direcionado para o *underflow* (Tabela 6.3) gerando assim, um menor número de espirais descendentes. Como também, ao aumento da viscosidade e à diminuição da densidade da mistura devido ao aumento da concentração de óleo.

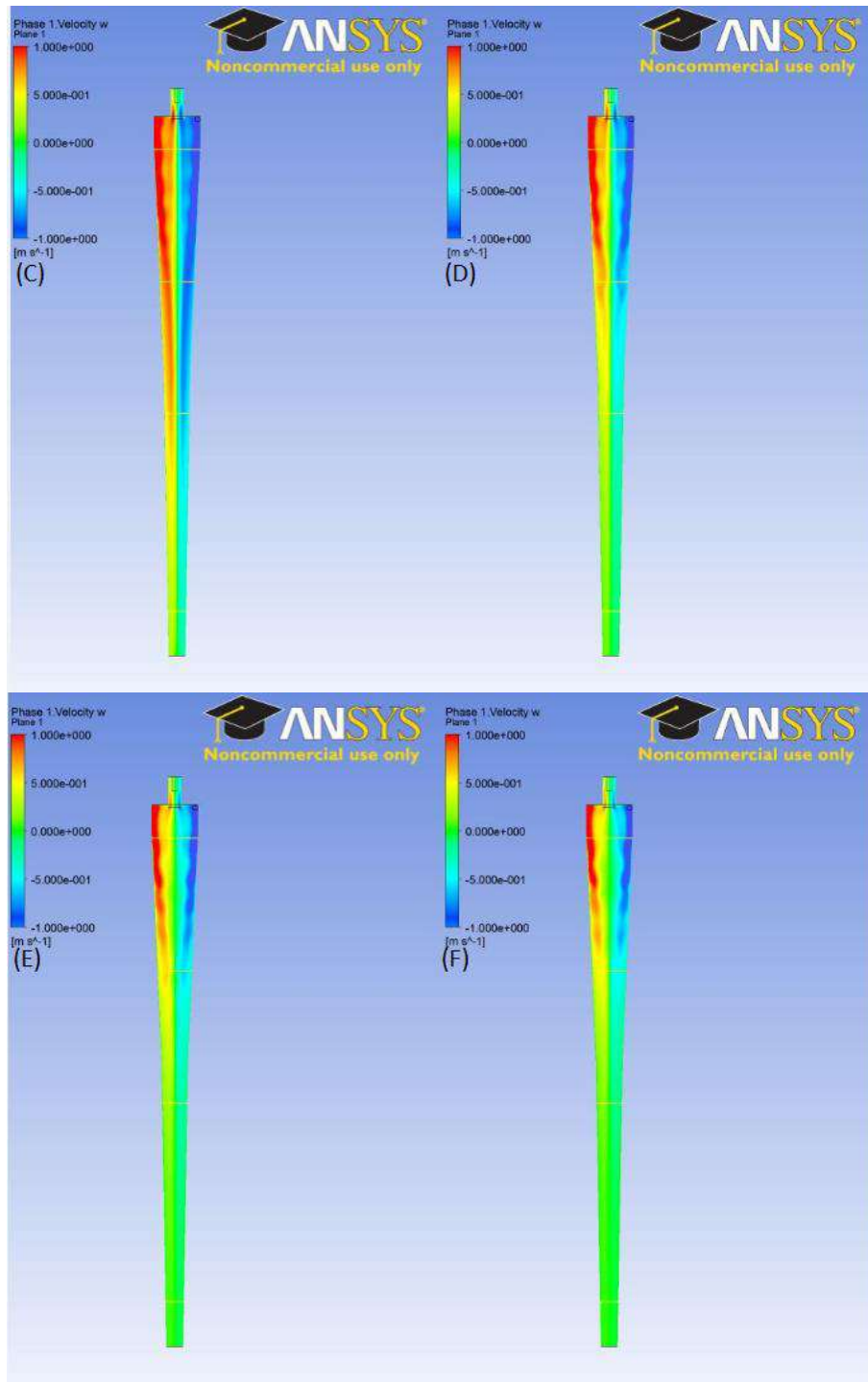
Outros fluxos secundários no interior dos hidrociclones podem também afetar o desempenho do equipamento e devem ser levados em consideração. É o caso das camadas limite junto às paredes do equipamento e das zonas de recirculação (Moraes, 2006).

**Tabela 6.3 – Vazão da mistura nas saídas do hidrociclone para diferentes valores de concentração de óleo obtidas a partir das simulações numéricas.**

<b>Concentração de óleo (%)</b>	<b>Vazão da mistura na entrada (kg/s)</b>	<b>Vazão da mistura no overflow1 (kg/s)</b>	<b>Vazão da mistura no overflow2 (kg/s)</b>	<b>Vazão da mistura no underflow (kg/s)</b>
<b>30</b>	0,333077	0,0974449	0,00363466	0,239248
<b>40</b>	0,327587	0,119404	0,00493933	0,203253
<b>50</b>	0,322097	0,132686	0,0156536	0,173852
<b>60</b>	0,316608	0,137343	0,0205811	0,15877
<b>70</b>	0,311118	0,158412	0,027567	0,125142
<b>80</b>	0,305629	0,175327	0,0312155	0,0990388

Através da Figura 6.5 pode-se observar o plano do perfil de velocidade tangencial do hidrociclone. Conforme observado por Svarovsky (1984), as velocidades tangenciais apresentam seus maiores valores próximos à região central. A análise desse perfil é importante porque como descrito anteriormente, a eficiência de separação é dependente deste campo de velocidade, pois seu valor determina diretamente a intensidade do campo centrífugo .



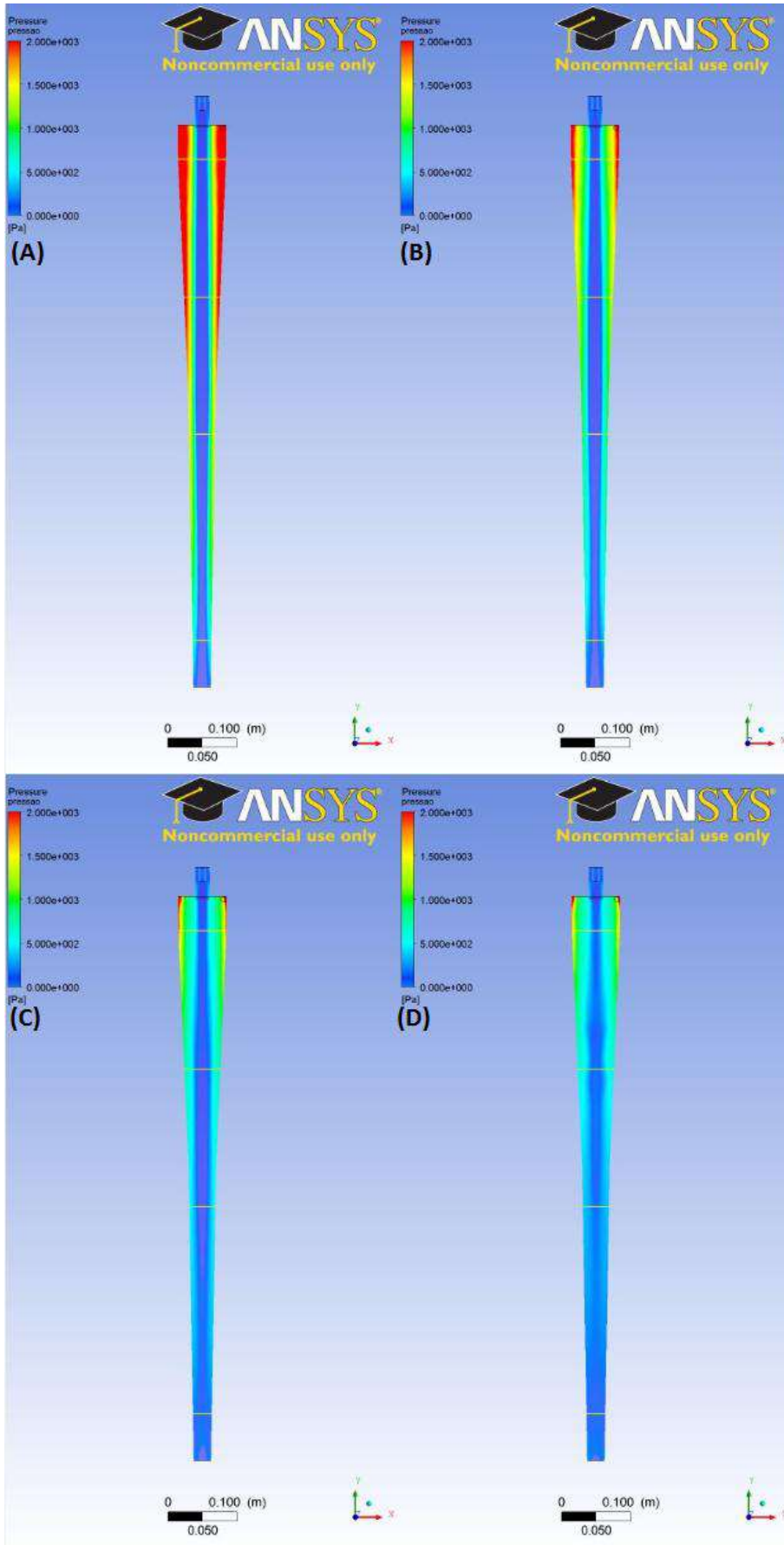


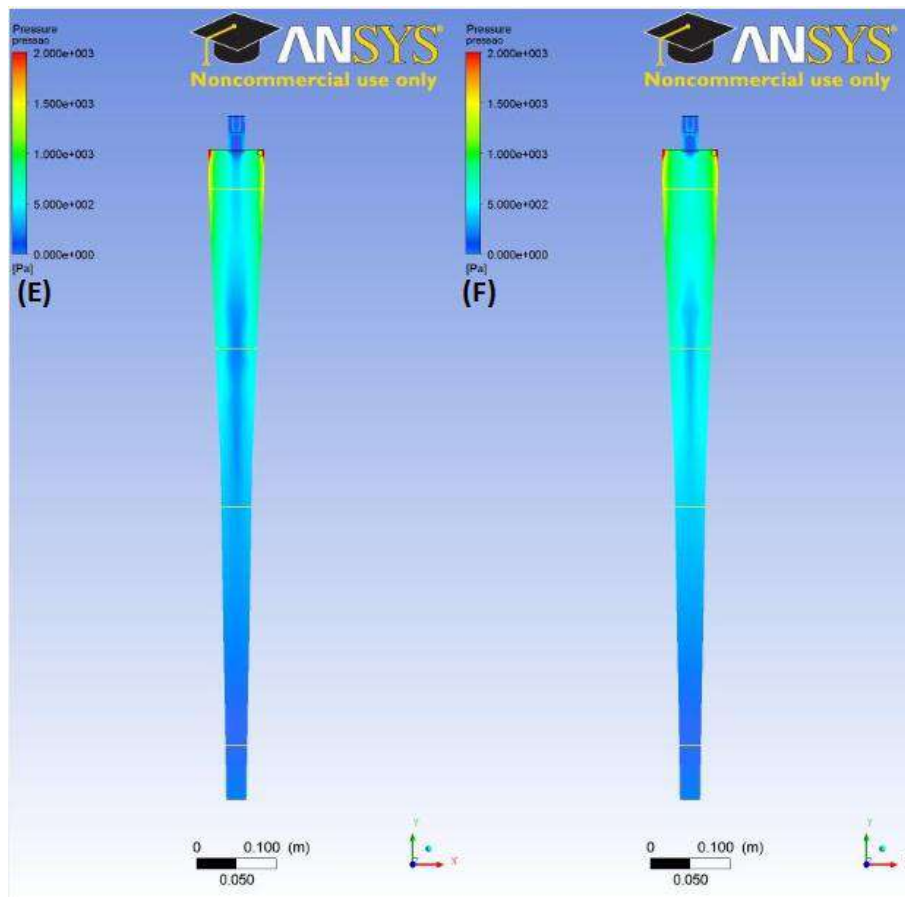
**Figura 6.5 – Perfis da velocidade tangencial do fluido no interior do hidrociclone variando a concentração de óleo. (A) Concentração de óleo 0,3; (B) Concentração de óleo 0,4; (C) Concentração de óleo 0,5; (D) Concentração de óleo 0,6; (E) Concentração de óleo 0,7 e (F) Concentração de óleo 0,8.**

Conforme descrito por Almeida (2009), ao analisar o perfil de pressão, através de um corte em um plano vertical, pode-se verificar que a pressão dentro do equipamento diminui radialmente das paredes para a região central.

O gradiente de pressão tem uma relação direta com a velocidade tangencial, pois quanto maior a intensidade da velocidade tangencial, menor será a pressão no centro do equipamento e maior será a quantidade de fluido menos denso que sairá por esta região, sendo este gradiente também responsável pela separação das fases em um hidrociclone.

No presente trabalho, houve redução da intensidade do campo centrífugo com o aumento da concentração de óleo. Essa redução ocorreu devido à diminuição da intensidade do vetor velocidade tangencial observada ao longo do estudo, ocasionando assim a diminuição do gradiente de pressão conforme definido por Almeida (2009). O perfil de pressão para as diferentes concentrações de óleo é mostrado na Figura 6.6.

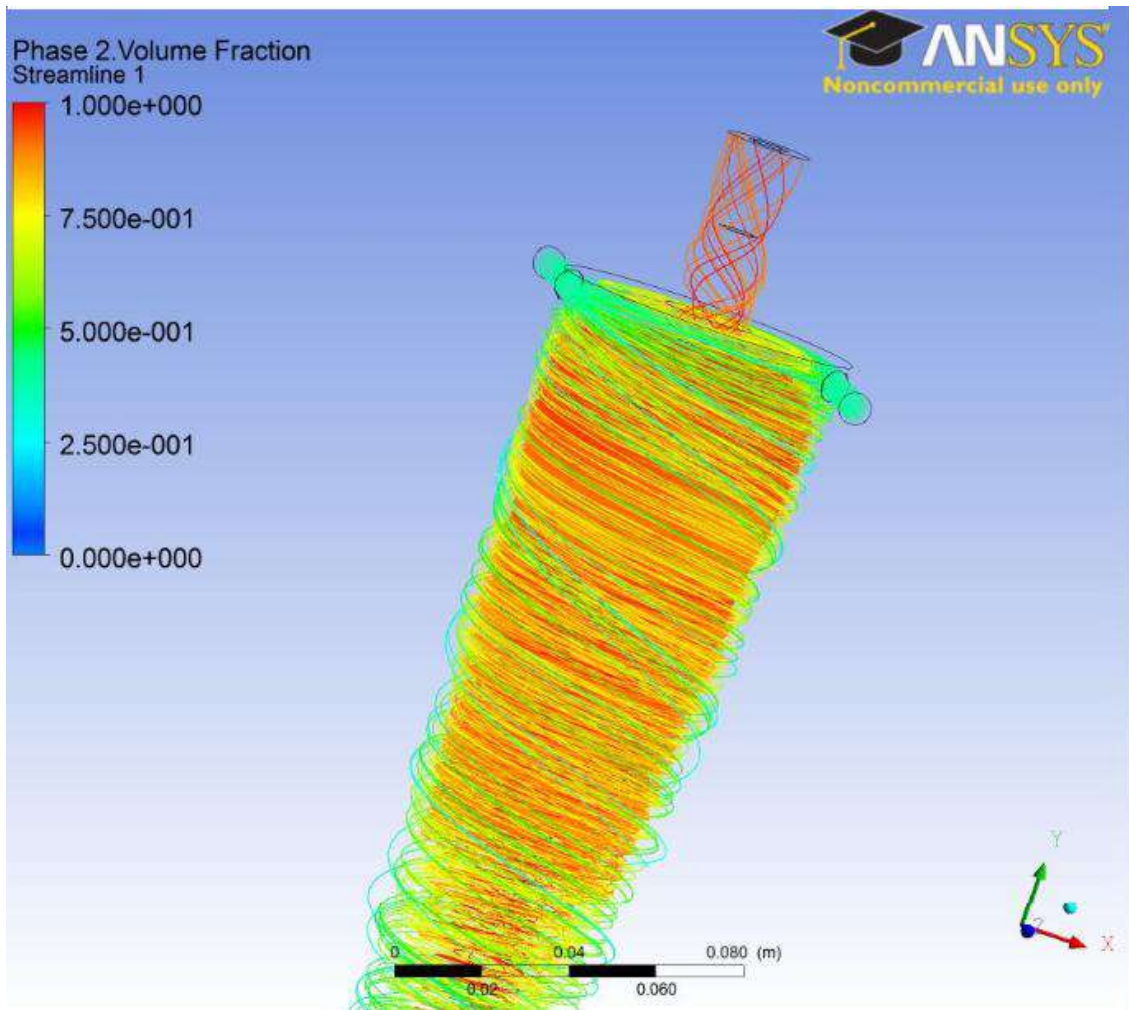




**Figura 6.6 – Perfis da pressão do fluido no interior do hidrociclone variando a concentração de óleo. (A) Concentração de óleo 0,3; (B) Concentração de óleo 0,4; (C) Concentração de óleo 0,5; (D) Concentração de óleo 0,6; (E) Concentração de óleo 0,7 e (F) Concentração de óleo 0,8.**

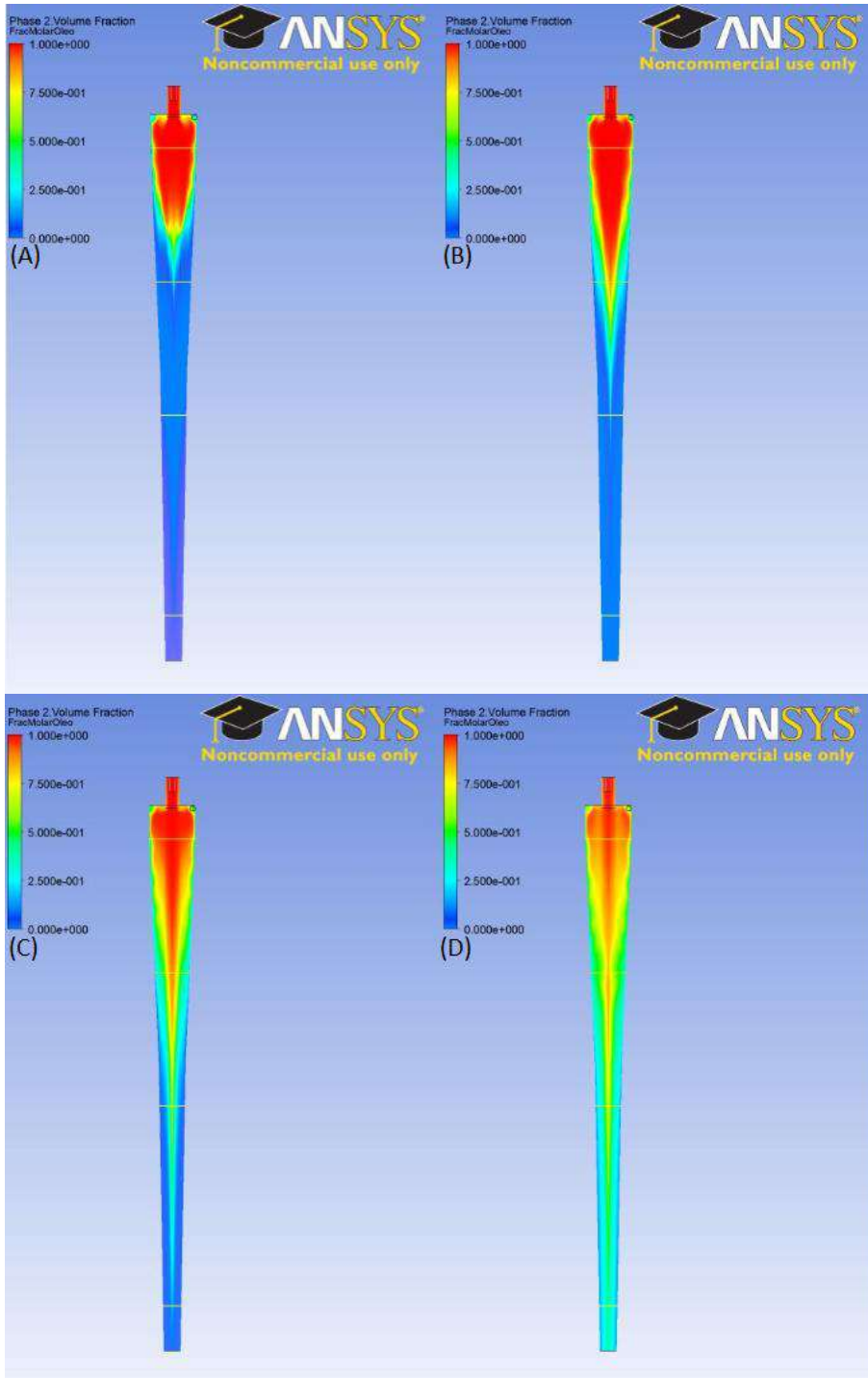
O escoamento das fases no interior do equipamento é outro parâmetro utilizado para consolidar os resultados simulados com a realidade. Através da Figura 6.7, pode-se visualizar o comportamento das linhas de corrente em espiral ascendente e descendente no interior do hidrociclone.

Ao analisar as linhas de corrente obtidas, observa-se uma diminuição das mesmas como o aumento da concentração de óleo, este fato está relacionado com o aumento da viscosidade e da razão de fluido no interior do equipamento, fazendo com que mais fluido deixe o equipamento pelo *overflow1* e *overflow2* do que pelo *underflow*.

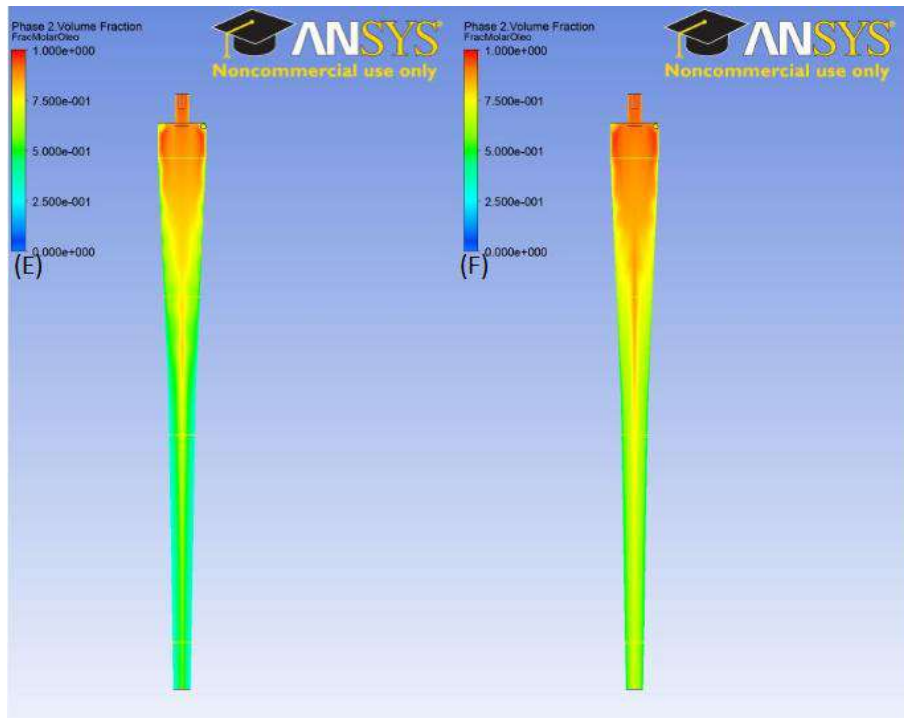


**Figura 6.7 – Linhas de corrente para o escoamento do óleo como fase dispersa com concentração de óleo igual a 50% v/v.**

Com auxílio da Figura 6.8, através de um plano vertical é possível visualizar que a fração volumétrica do óleo é maior no *overflow1*, *overflow2* e no centro do equipamento. Estas regiões concentram maior quantidade de óleo porque as gotículas do mesmo por serem menos densas que a água são empurradas para esta região, devido a menor pressão no eixo do equipamento, como citado por Almeida (2008) e Nascimento (2008). Uma vez que esta fase se encontra em torno do eixo central do hidrociclone, o vórtice secundário promove o arrasto da mesma em direção ao tubo de *overflow1* e *overflow2*, possibilitando a separação.

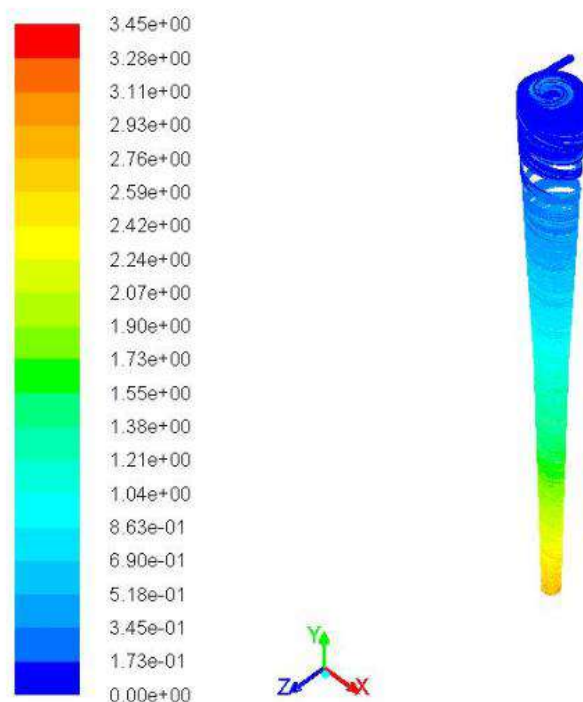






**Figura 6.8 – Fração volumétrica no interior do hidrociclone variando a concentração de óleo. (A) Concentração de óleo 0,3; (B) Concentração de óleo 0,4; (C) Concentração de óleo 0,5; (D) Concentração de óleo 0,6; (E) Concentração de óleo 0,7 e (F) Concentração de óleo 0,8.**

Ao adicionar areia, pelo método lagrangeano, nas simulações bifásicas, tornando as mesmas trifásicas (areia/água/óleo), notou-se que a areia foi removida completamente pelo *underflow* independente da concentração de óleo simulada, conforme mostrado na Figura 6.9 abaixo.



**Figura 6.9 – Trajetória da areia analisando o tempo de residência (em segundos) no interior do hidrociclone, para o escoamento do óleo como fase dispersa com concentração igual a 50% v/v.**

Os resultados obtidos através da simulação numérica estão de acordo com os fenômenos físicos que ocorrem durante a operação do hidrociclone, sendo assim, recomenda-se a realização de experimentos, adotando as condições utilizadas nas simulações, para confirmar experimentalmente os resultados simulados.

## 7. Conclusões

Ao comparar os resultados obtidos por Araújo (2012), pode-se concluir que a modificação proposta no hidrociclone (introdução de um segundo *overflow*) não acarretou em perda de eficiência e nem no aumento da razão de fluido.

Através dos resultados obtidos, foi possível concluir que a concentração de óleo influencia de forma apreciável a eficiência e a razão de fluido do hidrociclone estudado. Com o aumento da concentração de óleo ocorreu uma diminuição da eficiência e um aumento da razão de fluido.

Ao introduzir a areia nas simulações, 100% desta foi recuperada no *underflow*.

A modificação proposta mostrou resultados satisfatórios para a maioria dos sistemas estudados, sendo obtido no *overflow2* um óleo com baixíssimo percentual de água. Através deste hidrociclone foi possível obter um corrente rica em óleo, outra rica em óleo e água e uma terceira rica em água e areia. A corrente que é recuperada no *underflow* pode ser separada com o auxílio de outro hidrociclone.

Para plataformas de petróleo onde o espaço é um fator crítico, os hidrociclones se mostraram ótimas opções para substituição dos separadores trifásicos, visto que os mesmos apresentam elevada eficiência de separação para uma grande faixa de variação da concentração de óleo vinda do poço.

## 8. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Variar a queda de pressão no hidrociclone e avaliar sua influência na eficiência de separação neste equipamento;
- Avaliar a utilização de outro hidrociclone, operando em série, para separar a água da areia obtida no *underflow* do hidrociclone projetado neste trabalho;
- Variar a velocidade de entrada variando a área de entrada do hidrociclone, pois assim a vazão não é alterada, e observar sua influência na eficiência de separação deste equipamento para diferentes concentrações de óleo;
- Modelar e avaliar o efeito de quebra e coalescência de gotas no interior do hidrociclone, comparando estes resultados com os obtidos neste trabalho sem esta abordagem;
- Determinar a vazão crítica para as diferentes concentrações de óleo, no caso, o ponto onde o aumento desta diminui a eficiência de separação;
- Construir o hidrociclone projetado e realizar experimentos a fim de validar a modelagem implementada e os resultados obtidos.

## 9. Bibliografia

- ALMEIDA, L. C.; **Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo**, Projeto de Final de Curso: Escola de Química / UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.
- ALVES, J. V. B.; **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química: EQ/UFRJ, 2011.
- ARAÚJO, C. A. O.; **Hidrociclones para a Separação de Misturas de Alto Teor de Óleo Disperso em Água**, Exame de Qualificação para Doutorado em Engenharia Química: EQ/UFRJ, 2012.
- AVEROUS, J.; FUENTES, R.; **Advances in the numerical simulation of hydrocyclone classification**, Can. Metall. Q. 36 (5), 309–314, 1997.
- BERGSTROM, J.; VOMHOFF, H.; **Experimental hydrocyclone flow field studies**, Sep. Purif. Technol. 53, 8-20, 2007.
- BRADLEY D., D.J.; **The hydrocyclone**, International Series of Monographs in Chemical Engineering, Vol. 4, 1<sup>st</sup> Edition, Pergamon Press, London, 1965.
- BHASKAR, K. U.; MURTHY, Y. R.; RAJU, M.R.; TIWARI, S., SRIVASTAVA, J.K.; RAMAKRISHNAN, N.; **CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone**, Miner. Eng. 20, 60–71, 2007.
- COELHO, D. B.; **O Perfil de Velocidades Tangenciais em Hidrociclones**, Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – DEQ/UFRN, 2011.
- COELHO, D. B., ALVES, J., MEDRONHO, R.; **Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas**, 6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2011.
- DYAKOWSKI, T.; WILLIAMS, R.A.; **Modelling turbulent flow within a small-diameter hydrocyclone**, Chem. Eng. Sci. 48, 1143–1152, 1993.
- FREIRE, A. P. S.; ILHA, A.; COLAÇO M. J.; **Turbulência**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica, 2006.

- FREITAS, A. G. B.; **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química: Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.
- FORTUNA, A. D. O.; **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. São Paulo: Edusp, 2000.
- HAUKE, G.; **An Introduction to Fluid Mechanics and Transport Phenomena**, Zaragoza: Springer, 2008.
- HWANG, Kuo-Jen; HWANG, Ya-Wen; YOSHIDA, Hideto; **Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics**, Chemical Engineering Science, 85, 62-68, 2013.
- KELSALL, D. F.; **A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone**, Trans. Inst. Chem. Engineers, 30, 87–107, 1952.
- LEAHY-DIOS, A.; **Estudo da Separação Água-Óleo em Hidrociclones Através de Fluidodinâmica Computacional – Influência do Ângulo da Seção Cônica**, Projeto final de curso, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2003.
- LEAHY-DIOS, Alana, MEDRONHO, R. A.; **Simulação Numérica da Separação Água-Óleo em Hidrociclones**. Anais do 2o. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro, 2003.
- MA, L.; INGHAM, D.B.; WEN, X.; **Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones**, J. Aerosol. Sci., 31 (9), 1097-1119, 2000.
- MALISKA, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- MARINS, L. P. M.; **Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso**, Rio de Janeiro. 121 p. Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ, 2007.
- MEDRONHO, R. A.; **Hidrociclones**, Apostila, Rio de Janeiro: UFRJ, 2004.
- MEDRONHO, R. A. Notas de aula da disciplina EQE-029 – Fluidodinâmica Computacional, Escola de Química/UFRJ, 2011.

- MORAES, C. A. C.; **Curso de Hidrociclones e Sistemas de Separação Ciclônica**, Rio de Janeiro: Cenpes. Universidade Cooperativa. Agosto 2006.
- MURTHY, Y.R.; BHASKAR, K.U.; **Parametric CFD studies on hydrocyclone**, Powder Technology, 2012.
- NASCIMENTO, J. T.; **Uso de CFD na Otimização de Proporções Geométricas de um Hidrociclone para Separação Óleo/Água**. 61 p. Projeto de Final de Curso: Escola de Química / UFRJ. Rio de Janeiro, 2008.
- OBENG, D.P.; MORRELL, S.; NAPIER-MUNN, T.J.; **Application of central composite rotatable design to modelling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone**, Int. J. Miner. Process. 76, 181-192, 2005.
- OLIVEIRA, D. S. T.; **Otimização de um Hidrociclone para Separação de Esferas Ocas na Perfuração com Duplo Gradiente** 2004. 63 f. Monografia (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- PINTO, J. C.; LAGE, P. L. D. C.; **Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2001.
- REGO, F. C. D. A.; **Estudo do hidrociclone cilíndrico de uma unidade de flotação centrífuga com auxílio de fluidodinâmica computacional**, Dissertação de Mestrado - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- Rego, F. C. A., MEDRONHO, R. A.; **Estudo do Hidrociclone Cilíndrico de uma Unidade de Flotação Centrífuga com Auxílio de CFD**. Anais do ENEMP 2007, XXXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Aracaju/SE, 2007.
- SLACK, M.D.; DEL PORTE, S.; ENGELMAN, M.S.; **Designing automated computational fluid dynamics modeling tools for hydrocyclone design**, Miner. Eng. 17, 705–711, 2004.
- SVAROVSKY, L.; **Hydrocyclones**, Holt, Rinehart and Winston, London, 1984.
- SVAROVSKY, L.; **Solid-Liquid Separation**, 3rd Ed., Butterworths, London, 1990.
- SWAIN, S.; MORANTHY, S.; **A 3-dimensional Eulerian-Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone**, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 2021-2932, 2013.

THOMAS, J. E., et al.; **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, 1ª Edição, Rio de Janeiro: Ed. Interciência: PETROBRAS, 2001.

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

WANG, Zhen-bo; YI, Ma; YOU-HAI, Jin; **Simulation and experiment of flow field in axial-flow hydrocyclone**, Chemical Engineering Research and Design, 89, 603-610, 2011.