

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

ANDRÉA GONÇALVES BUENO DE FREITAS

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRATAMENTO DE
ÁGUA OLEOSA USANDO HIDROCICLONES

São Cristóvão (SE)
2009

ANDRÉA GONÇALVES BUENO DE FREITAS

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRATAMENTO DE
ÁGUA OLEOSA USANDO HIDROCICLONES**

**Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Química, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química.**

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. ANA ELEONORA ALMEIDA PAIXÃO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. RICARDO ANDRADE MEDRONHO

**São Cristóvão (SE)
2009**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

F862m Freitas, Andréa Gonçalves Bueno de
Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa
usando hidrociclone / Andréa Gonçalves Bueno de Freitas. –
São Cristóvão, 2009.
124 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) –
Universidade Federal de Sergipe, 2009.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Ana Eleonora Almeida Paixão

1. Engenharia Química. 2. Hidrociclone. 3. Água oleosa.
I. Título.

CDU 66.0

Folha de Aprovação

AGRADECIMENTOS

Neste momento de conclusão do mestrado, agradeço a Deus em sua infinita sabedoria, e também:

À Nossa Senhora da Purificação que me empresta seu dia para me tornar Mestre.

À minha família mais próxima: Poliana, Elifas Neto e Paloma. E à biológica: papai Elifas (in memorian), mamãe Rosemary, Anamaria, Adriana e Marcelo.

À família conquistada nesta caminhada Gisélia e Rômulo, Rocélia e Eduardo, Rosiane e Flávio, Gisele e Márcio; à irmã adotiva: Maria José Dantas.

Aos meus padrinhos Irma e Mário César, ao meu lado desde o nascimento com orações e ações, tornando meus domingos no Rio de Janeiro, dias de carinho e bênçãos.

Aos padrinhos e madrinhas de meus filhos - Vanda e Avelar, Paulo e Mônica, Gisélia e Rômulo - que sempre presentes, me acompanham em mais essa vitória.

À Ana Eleonora Almeida Paixão, mainha-acadêmica, orientadora de mestrado que esses dois anos participou da rotina de minha “Nada mole vida”.

Ao Gabriel Francisco da Silva, paiinho-acadêmico, que me adotou desde a Iniciação Científica, e aguarda ansiosamente minha maioridade acadêmica.

À Helenice Leite Garcia pela leitura criteriosa durante todo o processo de construção deste trabalho.

Ao Ricardo Andrade Medronho (UFRJ), que me apresentou ao CFX, ao hidrociclone e que me aceitou como filha acadêmica nordestina.

Ao Pedro Leite de Santana, participante das bancas de qualificação e de defesa do Mestrado.

Ao Carlos Henrique Ataíde (UFU) por ter aceito o convite de participar da Banca de Defesa.

À Gabrielle (Gaby) pela grande ajuda no CFX (LABINDEQ/UFS), Weberson (Dide) o primeiro estagiário de CFX.

Aos alunos e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e do Departamento de Engenharia Química.

Aos alunos do Laboratório de Engenharia Química (LADEQ-UFRJ): Diego Alvim Gomez, Liane, Amanda, Natalia, Elie, Maria, Jô. Aos sergipanos presentes na UFRJ: Rogério Pagano, João Severo Baptista Junior e Domingos Fabiano.

Aos amigos: Inaura, Aloísio, Diego e Glesy, Jose Carlos Curvelo Santana (Simão), Viviane e Maria Clara, Rita, Waleska, Elisângela, Glauciene, Daiane, Claudia Ramos Santana e Rosivânia.

Aos colegas do Hospital Universitário – UFS que convivem comigo todos os dias.

E finalmente às minhas amigas bruxas, que me orientam e acompanham nesse novo caminho, me apresentando a esse universo tão rico de aprendizado.

RESUMO

O aumento da poluição industrial tem levado os órgãos de controle ambiental a rever a legislação em vigor e a limitar de forma mais rigorosa o descarte de efluentes industriais. Em contrapartida, as empresas têm melhorado os sistemas de tratamento de seus efluentes, aplicando novas tecnologias. Na indústria de petróleo, na separação óleo-água, são usados flotores e hidrociclones. A flotação procura recuperar o resíduo de óleo através de separação gravitacional, enquanto que os hidrociclones procuram acelerar este processo com o uso da força centrífuga. Os hidrociclones em estudo são equipamentos constituídos de uma parte cilíndrica e duas partes cônicas justapostas, nas quais a alimentação é constituída por duas entradas em voluta, diametralmente opostas, apresentando um eixo normal ao do equipamento e posicionada tangencialmente à parede lateral do cilindro. O separador tem duas aberturas para saída, posicionadas axialmente ao equipamento, uma delas, chamada *overflow*, situada próxima à seção de alimentação e a outra, chamada *underflow*, situada próxima ao vértice do corpo cônico do hidrociclone. A análise do comportamento fluidodinâmico do hidrociclone foi conduzida através da simulação numérica do tratamento da água produzida, aplicando-se métodos de Fluidodinâmica Computacional (CFD). Na ferramenta computacional utilizada, CFX, é possível construir a geometria, desenhar a malha numérica, ajustar os parâmetros de simulação, resolver e analisar os resultados, podendo ser aplicado para diversos tipos de escoamento. Realizou-se um planejamento experimental com o objetivo de analisar a influência da geometria na eficiência de separação do hidrociclone, ou seja, saber quais variáveis eram mais relevantes para a eficiência de separação. Para avaliar o desempenho do equipamento foram calculadas a Razão de Fluido (R_f) e a Eficiência Granulométrica Reduzida (G'), para cada geometria. Devido ao grande número de variáveis testadas, quais sejam – D_c , D_o , D_u , H_c , VF e $L1$ – optou-se por não analisar o efeito de cada uma em separado, mas a interações destas. As diferentes simulações numéricas foram consideradas como experimentos computacionais. Em todos os 19 experimentos computacionais, as simulações foram iniciadas com o modelo de turbulência $k-\epsilon$, estas últimas utilizadas como valores iniciais para as simulações com o modelo de turbulência SSG, pois este último é o que melhor representa o escoamento no hidrociclone. As análises feitas no *Essential Regression* mostram que as variáveis que mais influenciam a eficiência de separação são os diâmetros de *overflow* e de *underflow*. As eficiências granulométricas reduzidas ficaram bem distribuídas na faixa 0-96%, o que mostra que a escolha do tamanho de gota testado (250 μm) foi adequada. Os maiores valores de razão de fluido foram obtidos para $D_o/D_u \cong 1,0$ e os menores, excluindo-se $R_f = 0$, para $D_o/D_u \cong 0,2$. Nos intervalos estudados, os maiores valores de Eficiência Granulométrica Reduzida são obtidos com os maiores valores de D_o e os menores de D_u . Os menores resultados de Razão de Fluido são obtidos com os menores valores de D_o e os maiores valores de D_u .

Palavras-chave: Hidrociclone, Água oleosa, CFX, Eficiência Granulométrica Reduzida, Razão de Fluido.

ABSTRACT

The increase of the industrial pollution has been carrying the organs of environmental control to review the legislation in force and to limit in a more rigorous form the discards of industrial effluent. As opposed, the companies have been improving the treatment systems of their effluent, applying new technologies. In the petroleum industry, in the oil-water separation, are used floatation chamber and hydrocyclones. The floatation seeks to recover the oil residue through gravitational separation, while the hydrocyclones try to accelerate this process with the use of the centrifugal force. The hydrocyclones in study are equipment constituted of a cylindrical part and two conic parts joint, in which the supply is constituted by two entrances involute, diametrically opposite, presenting a normal axis to the equipment and positioned tangentially to the lateral wall of the cylinder. The separator has two openings for exit, axis positioned to the equipment, one of them, called overflow, placed near to the supply section and to another, called underflow, placed near to the vertex of the conic body of the hydrocyclone. The analysis of the fluid-dynamic behavior of the hydrocyclone was led through the numeric simulation of the treatment of water produced, applying methods of Computational Fluid-dynamic (CFD). In the used computational tool, CFX, it is possible to build the geometry, draw the numeric mesh, adjust the simulation parameters, solve and to analyze the results, being able to be applied for several kinds of flow. It accomplished an experimental planning with the goal of analyzing the influence of the geometry in the separation efficiency of the hydrocyclone, in other words, know which variables were more important for the separation efficiency. To evaluate the performance of the equipment were calculated the Flow Ratio (R_f) and the Reduced Grade Efficiency (G'), for each geometry. Due to the great number of tested variables, whatever – D_c , D_o , D_u , H_c , VF e $L1$ – it opted to not analyze the effect of each one in separated, but the interactions of these. The different numeric simulations were considered as computational experiments. In all the 19 computational experiments, the simulations were initiated with the turbulence model $k-\epsilon$, these last used as initial values for the simulations with the turbulence model SSG, because this last is what best represents the flow in the hydrocyclone. The analyses done in the Essential Regression show that the variables which the most influence the separation efficiency are the overflow and underflow diameters. The reduced grade efficiencies stayed well distributed in the range 0-96%, what shows that the choice of the size of tried drop ($250\ \mu\text{m}$) was adequate. The greatest reason values of fluid were obtained for $D_o/D_u \cong 1.0$ and the minors, excluding $R_f = 0$, for $D_o/D_u \cong 0.2$. In the studied intervals, the greatest Reduced Grade Efficiency values are obtained with the biggest values of D_o and the smallest of D_u . The smallest results of Flow Ratio are obtained with the smallest values of D_o and the biggest values of D_u .

Key-words: Hydrocyclone, Oil-water, CFX, Reduced Grade Efficiency, Flow Ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de funcionamento do hidrociclone para separação água-óleo	10
Figura 2 - Componentes da velocidade no hidrociclone	14
Figura 3 – Escoamento interno do fluido dentro do hidrociclone	15
Figura 4 (a) – Perfis de velocidade do vórtice livre	16
Figura 4 (b) – Perfis de velocidade do vórtice forçado	16
Figura 4 (c) – Perfis de velocidade do vórtice combinado	16
Figura 5 – Diagrama para a análise de desempenho do hidrociclone	18
Figura 6 – Curva de eficiência granulométrica com $R_f = 10\%$	19
Figura 7 – Eficiência granulométrica reduzida e diâmetro de corte reduzido	21
Figura 8 – Eficiência granulométrica reduzida em função de d/d'_{50}	21
Figura 9 – Distribuição radial de pressão no interior de um hidrociclone	33
Figura 10 – Tela do <i>Design Modeler</i>	48
Figura 11 – Tela do <i>CFX Meshing App</i>	49
Figura 12 – Tela do CFX-Pre	49
Figura 13 – Tela do CFX-Solver	50
Figura 14 – Tela do CFX-Post	51
Figura 15 – Hidrociclone estudado	52
Figura 16 – Geometria do ponto central	54
Figura 17 (a) – Desenho demonstrativo do refino da malha 1 na parte cilíndrica	57
Figura 17 (b) – Desenho demonstrativo do refino da malha 1 no <i>underflow</i>	57
Figura 18 (a) – Desenho demonstrativo do refino da malha 2 na parte cilíndrica	58
Figura 18 (b) – Desenho demonstrativo do refino da malha 2 no <i>underflow</i>	58

Figura 19 (a) – Desenho demonstrativo do refino da malha 3 na parte cilíndrica	59
Figura 19 (b) – Desenho demonstrativo do refino da malha 3 no <i>underflow</i>	59
Figura 20 – Gráfico da velocidade tangencial em função do raio do hidrociclone	60
Figura 21 – Geometria 13	65
Figura 22 – Influência do diâmetro de <i>overflow</i> e diâmetro de <i>underflow</i> sobre a eficiência granulométrica reduzida	69
Figura 23 – Curva de nível para a eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro de <i>overflow</i> e diâmetro de <i>underflow</i>	69
Figura 24 – Influência do diâmetro de <i>overflow</i> e diâmetro de <i>underflow</i> sobre a razão de fluido	70
Figura 25 – Curva de Nível para a razão de fluido em função do diâmetro de <i>overflow</i> e diâmetro de <i>underflow</i>	70
Figura 26 – Formação do vórtice no interior do hidrociclone	71
Figura 27 – Perfil de velocidades do óleo no corpo do hidrociclone	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos para identificar o tipo de emulsão	8
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens do modelo de turbulência SSG	40
Tabela 3 - Faixas de utilização das variáveis geométricas selecionadas	53
Tabela 4- Variáveis geométricas mantidas constantes do hidrociclone	54
Tabela 5 – Geometrias obtidas com o <i>Essential Regression</i>	55
Tabela 6 – Estatística do teste de malha	56
Tabela 7 – Resultados estatísticos das malhas dos experimentos	62
Tabela 8 - Condições de contorno, propriedades físicas e demais condições empregadas nas simulações	63
Tabela 9 - Eficiências granulométricas (G), razões de fluido (R_f) e eficiências granulométricas reduzidas (G') obtidas a partir das simulações numéricas	66
Tabela 10 – Tabela dos valores de R, R^2 e R^2 ajustado	68

NOMENCLATURA

Siglas

A/O	Emulsão Água em Óleo
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DOWS	<i>Downhole Oil Water Separation</i>
DSM	Modelo de turbulência tensão diferencial de segunda ordem
GHz	Gigahertz
LADEQ	Laboratório de Engenharia Química - UFRJ
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MB	Megabyte
O/A	Emulsão Óleo em Água

Símbolos

Nas dimensões abaixo, M é massa, L é comprimento e T é tempo.

a	Área da partícula projetada na direção do escoamento	L^2
A_g	Área projetada da gota na direção do escoamento	L^2
B	Soma das forças que atuam no corpo	-
C_D	Coefficiente de arraste	-
c_v	Concentração volumétrica	ML^{-1}
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	Constantes do modelo de turbulência k- ϵ	-

C_μ	Constante do modelo de turbulência k- ϵ	-
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido do hidrociclone	L
d_{50}	Diâmetro de corte do hidrociclone	L
d_g	Diâmetro de gotícula	L
D_{HC}	Diâmetro nominal do hidrociclone	L
D_i	Diâmetro de alimentação	L
D_o	Diâmetro do <i>overflow</i>	L
D_u	Diâmetro do <i>underflow</i>	L
$E(y)$	Resposta esperada do rendimento (Equação 31)	-
Eu	Número de Euler baseado no diâmetro do hidrociclone	-
F_D	Força de arraste	MLT^{-2}
g	Aceleração gravitacional	L^2T^{-2}
$G(d), G$	Eficiência Granulométrica	%
G'	Eficiência Granulométrica Reduzida	%
H	Queda de pressão em altura da coluna de água	$ML^{-1}T^{-2}$
k	Energia cinética turbulenta	L^2T^{-2}
K	Constante (Equação 18)	-
L_1	Comprimento da região cônica	L
n	Expoente do termo Re (Equação 18)	-
O, Q_o	Vazão volumétrica no <i>overflow</i>	L^3T^{-1}
p'	Pressão modificada	$ML^{-1}T^{-2}$
P_1	Pressão no ponto 1 (Figura 9)	$ML^{-1}T^{-2}$
P_2	Pressão no ponto 2 (Figura 9)	$ML^{-1}T^{-2}$
P_3	Pressão no ponto 3 (Figura 9)	$ML^{-1}T^{-2}$
P_4	Pressão no ponto 4 (Figura 9)	$ML^{-1}T^{-2}$

Q	Vazão da mistura no duto de entrada do hidrociclone	L^3T^{-1}
r	Distância radial	L
Re	Número de Reynolds baseado no diâmetro do hidrociclone	-
Re _g	Número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula de óleo	-
R _f	Razão de fluido	-
St	Número de Stokes	-
t	Tempo	T
U, Q _u	Vazão volumétrica no <i>underflow</i>	L^3T^{-1}
v	Velocidade relativa entre a partícula e o fluido	LT^{-1}
V _C	Velocidade da mistura na região cilíndrica do hidrociclone	LT^{-1}
v _t	Velocidade terminal de sedimentação das partículas	LT^{-1}
V _x	Velocidade da mistura na direção radial	LT^{-1}
V _y ,	Velocidade da mistura na direção tangencial	LT^{-1}
V _z	Velocidade da mistura na direção axial	LT^{-1}
W _g (d)	Taxa mássica de óleo na forma de gotículas com tamanho definido na entrada	MT^{-1}
W _{go} (d)	Taxa mássica de óleo na forma de gotículas com tamanho definido no <i>overflow</i>	MT^{-1}
W _{gu} (d)	Taxa mássica de óleo na forma de gotículas com tamanho definido no <i>underflow</i>	MT^{-1}
W _{lo}	Taxa mássica de líquido no <i>overflow</i>	MT^{-1}
W _l	Taxa mássica de líquido da alimentação	MT^{-1}
W _{lu}	Taxa mássica de líquido no <i>underflow</i>	MT^{-1}
x ₁	Temperatura (Equação 30)	°C
x ₂	Pressão (Equação 30)	$ML^{-1}T^{-2}$
y	Rendimento do processo (Equação 30)	%

Símbolos Gregos

γ	Intensidade do campo de forças	L^2T^{-1}
μ_c	Viscosidade da fase contínua	$ML^{-1}T^{-1}$
η	Viscosidade cinemática	$ML^{-1}T^{-1}$
η	Superfície de Resposta (Equação 31)	-
ΔP	Queda de pressão	$ML^{-1}T^{-2}$
$\Delta\rho$	Diferença de densidade entre a fase dispersa e a fase contínua	ML^{-3}
ε	Ruído ou erro (Equação 30)	-
ε	Dissipação da energia cinética	L^2T^{-3}
ε	Eficiência de separação	-
θ	Primeiro ângulo cônico	°
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	$ML^{-1}T^{-1}$
μ_{eff}	Viscosidade efetiva devido à turbulência	$ML^{-1}T^{-1}$
μ_t	Viscosidade turbulenta	$ML^{-1}T^{-1}$
μ_α	Viscosidade dinâmica da fase α	$ML^{-1}T^{-1}$
ρ	Densidade da fase contínua	ML^{-3}
ρ_s	Densidade da fase dispersa	ML^{-3}

SUMÁRIO

I INTRODUÇÃO	1
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Histórico do hidrociclone	4
2.1.1 Hidrociclone no processamento primário de petróleo	5
2.1.2 Aplicações atuais	5
2.2 Separação água-óleo	6
2.2.1 Emulsão	6
2.3 Aplicação dos hidrociclones nos processos de separação	9
2.3.1 Funcionamento do hidrociclone	10
2.3.2 Características do hidrociclone padrão	11
2.3.3 Efeitos dos parâmetros geométricos na eficiência da separação	12
2.3.4 Outros parâmetros geométricos na eficiência da separação	13
2.3.5 Velocidade	14
2.3.6 Projeto do hidrociclone	16
2.3.7 Critérios para avaliar o desempenho do hidrociclone	18
2.3.7.1 Eficiência granulométrica para separação líquido-líquido	18
2.3.7.2 Razão de fluido	19
2.3.7.3 Eficiência granulométrica reduzida	20
2.3.8 Grupos adimensionais importantes no estudo de hidrociclones	22
2.3.9 Comparação entre os hidrociclones para separação sólido-líquido e líquido-líquido	24
2.3.10 Vantagens e desvantagens dos hidrociclones	26
2.4 Fluidodinâmica	28
2.4.1 Fluidodinâmica de partículas	29
2.4.2 Separação de fases em um sistema particulado	30
2.4.3 Complexidade do escoamento no hidrociclone	30
2.4.4 Apresentação qualitativa do escoamento no hidrociclone	32
2.4.4.1 Caracterização do escoamento	34

2.5 Modelagem matemática	34
2.5.1 Métodos numéricos	35
2.6 Modelos de turbulência	36
2.6.1 Modelo k- ϵ	37
2.6.2 Modelo SSG	39
2.7 Planejamento experimental	41
2.7.1 Análise por superfície de resposta	43
2.8 Fluidodinâmica computacional	44
2.8.1 CFX	47
 III METODOLOGIA	 52
3.1 <i>Software e hardware</i>	52
3.2 Dados do hidrociclone	52
3.3 Planejamento Fatorial	54
3.4 Testes de Malha	56
3.5 Simulações Numéricas	61
3.6 Modelos de Turbulência	64
 IV RESULTADOS E DISCUSSÃO	 65
 V CONCLUSÕES	 73
 REFERÊNCIAS	 75
 APÊNDICES	

I. INTRODUÇÃO

O aumento da poluição industrial tem levado os órgãos de controle ambiental a rever a legislação em vigor e a limitar de forma mais rigorosa o descarte de efluentes industriais. Em contrapartida, as empresas têm melhorado os sistemas de tratamento de seus efluentes, aplicando novas tecnologias.

A poluição por óleos representa um percentual elevado nos problemas gerados por contaminantes orgânicos, uma vez que os combustíveis fósseis, como o petróleo e seus subprodutos, são fontes de matéria-prima e geração de energia da maioria dos processos industriais da atualidade (ROSA, 2003).

A água produzida associada aos hidrocarbonetos apresenta propriedades potencialmente tóxicas. Na avaliação dos impactos causados pelo descarte de água produzida em um ecossistema aquático, são considerações críticas a composição da água produzida, o volume descartado, como também a capacidade do corpo d'água receptor em prover diluição (SANTANA, 2007).

Na indústria de petróleo, na separação da mistura óleo/água, são usados flutuadores e hidrociclones. A flotação procura recuperar o resíduo de óleo através de separação gravitacional, enquanto que os hidrociclones procuram acelerar este processo com o uso da força centrífuga.

A grande vantagem do uso de hidrociclones para a purificação da água produzida junto com o óleo em plataformas marítimas de produção de petróleo reside não só na maior eficiência em relação aos separadores gravitacionais, mas também na menor área de convés e menor carga sobre o mesmo, devido ao fato de estes equipamentos serem muito mais compactos (MORAES, 2006).

A produção da água oleosa ocorre na exploração do petróleo, que não é extraído puro. Este é uma mistura de água, óleo, gás e impurezas. Para que esse óleo seja refinado, é necessário que haja um processo de separação entre as fases. Essa separação é realizada, tanto

em plataformas marítimas quanto em terra, por uma Estação de Produção. Essa Estação de Produção faz parte da Planta de Processamento Primário do Petróleo, que tem a finalidade de separar o gás, sob condições operacionais controladas, e remover a água, sais e outras impurezas, tornando o óleo adequado para ser transferido à refinaria (FREITAS, 2007).

De acordo com Thomas (2004), dependendo dos fluidos produzidos e da viabilidade técnico-econômica, uma Planta de Processamento Primário pode ser simples ou complexa. As mais simples efetuam apenas a separação gás/óleo/água, enquanto que as mais complexas incluem o condicionamento e compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água para reinjeção ou descarte.

De acordo com estudos feitos por Freitas (2007), vários tipos de equipamentos ou sistemas podem ser empregados para o processamento do petróleo. Entretanto, a seleção adequada destes minimizará os custos envolvidos com instalação, operação e tratamento, primordialmente requeridos nos projetos de instalações marítimas que apresentam limitações de peso e espaço.

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

Para adequar a água produzida aos padrões exigidos, são utilizados vários equipamentos de separação. No presente estudo, será avaliado o hidrociclone, no qual ocorre a separação das fases proporcionada por uma força de campo – o campo centrífugo – que atua sobre as gotículas dispersas devido à diferença de densidade entre as mesmas e a fase contínua.

Pretende-se, neste trabalho, contribuir para o aprimoramento da técnica de tratamento de efluentes da indústria petrolífera. Os hidrociclones em estudo são equipamentos

constituídos de uma parte cilíndrica e duas partes cônicas justapostas, nas quais a emulsão é alimentada por duas entradas em voluta diametralmente opostas apresentando um eixo normal ao do equipamento, e que é posicionado tangencialmente à parede lateral do cilindro. O separador tem duas aberturas para saída, posicionadas axialmente ao equipamento, uma delas situada próxima à seção de alimentação, chamada *overflow*, e a outra situada próxima ao vértice do corpo cônico do hidrociclone, chamada *underflow*. A análise do comportamento fluidodinâmico será através da simulação numérica do tratamento da água produzida, aplicando-se métodos de Fluidodinâmica Computacional.

Com o objetivo de analisar a influência da geometria na eficiência de separação do hidrociclone, ou seja, saber quais as variáveis, entre as estudadas, é mais relevante, foi realizado um planejamento experimental com seis variáveis, quais sejam - D_c , D_o , D_u , H_c , VF e $L1$ – do qual se obteve 19 experimentos, considerados como experimentos computacionais.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico do Hidrociclone

Segundo Svarovsky (2000), o princípio e o desenho básico do hidrociclone convencional têm quase 120 anos, já que a primeira patente é datada de 1891. Apesar disso, só após Segunda Guerra Mundial os hidrociclones vieram a ter aplicação crescente na indústria. O seu uso inicial foi no processamento mineral, ganhando rapidamente aplicação também na indústria química, petroquímica, geração de energia, indústria têxtil, indústria metalúrgica e muitas outras. Os hidrociclones agora estão estabelecidos e com suas aplicações aumentando.

Hidrociclones para águas oleosas tiveram início com os trabalhos realizados na Universidade de Southampton, na Inglaterra, pela equipe liderada pelo Prof. Martin Thew, no início da década de 70. Estas pesquisas tiveram como motivação o acidente com um petroleiro, que resultou no vazamento de um grande volume de óleo nas costas da Cornuália. Por conta deste acidente, o governo britânico incentivou as entidades de pesquisa a desenvolver um equipamento que permitisse a coleta da água contaminada e sua rápida limpeza, com remoção do óleo a níveis muito elevados, para devolução, ao mar, da água praticamente sem contaminação. Tal equipamento deveria ser de fácil portabilidade e manuseio, para possibilitar a montagem em embarcações velozes, que permitissem a rápida cobertura das áreas contaminadas. O Prof. Thew foi o pioneiro no patenteamento, em fins da década de 70, de um equipamento que viria a ser conhecido como hidrociclone Colman-Thew (MORAES, 2006).

Os equipamentos tradicionais de tratamento de águas oleosas, com base na ação da gravidade (decantadores e flotadores convencionais), são equipamentos grandes e pesados, que acarretavam elevados custos de investimento e operacional, particularmente em instalações de produção *offshore*, nas quais a área de convés e a capacidade de carga representam custos cada vez mais elevados, principalmente porque as zonas produtoras têm se deslocado para regiões cada vez mais profundas.

2.1.1. Hidrociclones no processamento primário de petróleo

De acordo com Moraes (2006), separadores ciclônicos têm sido muito empregados como separadores de partículas dispersas em correntes fluidas, em muitas aplicações industriais, sempre que exista uma diferença de massa específica entre as partículas dispersas e a fase fluida. A fase dispersa é normalmente constituída por um sólido ou líquido, enquanto que a fase contínua é um fluido (gás ou líquido). Se a fase contínua é um gás, o dispositivo é denominado de ciclone, mas as principais características de ambos (ciclones e hidrociclones), bem como os princípios de funcionamento são, em grande extensão, muito semelhantes.

O uso de hidrociclones para a separação líquido-líquido, embora objeto de pesquisas há bastante tempo, somente nas últimas décadas tem apresentado aplicação industrial. A principal aplicação de hidrociclones líquido-líquido tem sido na indústria de petróleo. A remoção de pequenas gotículas de óleo dispersas na água salgada, que é produzida juntamente com os hidrocarbonetos provenientes de um poço petrolífero, é tradicionalmente uma empreitada difícil devido ao pequeno diâmetro dessas gotículas e, muitas vezes, à reduzida diferença de densidade entre o óleo e a água, que implicam em uma velocidade terminal, sob a ação do campo gravitacional, muito reduzida. Como a corrente de água oleosa é normalmente disponível com pressão suficiente para tornar atrativa a utilização de hidrociclones, vários desses equipamentos têm sido instalados em plataformas marítimas de produção de petróleo ao redor do mundo, nos últimos 25 anos.

2.1.2. Aplicações atuais

Um sistema compacto de hidrociclones é empregado em muitas plataformas *offshore* que produzem grandes volumes de água. Os hidrociclones aliviam os tanques de água, e não possuem área disponível para ampliação da planta de processamento primário, com o uso da tecnologia gravitacional convencional. Os hidrociclones vão aliviar os tanques de armazenagem da planta de processamento primário de grande parte da água, permitindo que o espaço interno dos vasos da planta seja preservado para o óleo. Além disso, essa tecnologia deverá competir com vantagens sobre o separador gravitacional em aplicações submarinas, devido às menores dimensões, que as tornam mais leves para aplicação em situações de pressão externa elevada.

Desde o final da década de 90, o conceito de remoção de água do óleo no poço ou DOWS (*Downhole Oil Water Separation*) tem se tornado popular. Um hidrociclone axial, através do escoamento reto em toda a extensão e baixa queda de pressão, é um candidato ideal para essa aplicação (DELFOS *et al.*, 2004).

Há pesquisas para aplicar a técnica de separação, com hidrociclones, durante a perfuração de um poço, de parte da barita do fluido de perfuração que chega à superfície, de modo a gerar dois fluidos com densidades médias diferentes: o primeiro, com maior teor de barita e, portanto, mais denso, para injeção na coluna de perfuração e um segundo, menos denso, para injeção na base do *riser*. No trabalho de Carvalho e Medronho (2004) são apresentados os primeiros resultados desta técnica alternativa e, possivelmente, mais simples de se obter um duplo gradiente de perfuração. Para tal, determinaram-se as dimensões do hidrociclone de forma a maximizar a separação da barita contida no fluido de perfuração.

De acordo com Oliveira e Medronho (2004), um navio petroleiro, à medida que descarrega sua carga, bombeia água do mar para seus tanques de lastro, a fim de controlar seu calado e aumentar sua estabilidade estrutural durante a navegação sem carga. Assim, organismos presentes na água são transferidos de seu *habitat* natural para outro, podendo causar graves desequilíbrios ecológicos. Aqueles autores estudaram a aplicação de hidrociclones para separar os organismos e demais sólidos suspensos na água de lastro.

Ainda na separação de pequenos organismos, existem estudos de diferentes geometrias de hidrociclones na busca da mais eficiente para separar células animais como, por exemplo, células de ovário de hamster chinês, com objetivo de isolar importantes fármacos (PINTO *et al.*, 2008).

2.2. Separação água – óleo

2.2.1. Emulsão

Emulsão é um sistema disperso formado por dois líquidos imiscíveis mais um agente emulsificante e agitação suficiente para transformar o sistema em uma fase contínua. No caso

em estudo, os dois líquidos imiscíveis são o óleo e a água, o agente emulsificante é um dos componentes naturais do óleo, tais como parafinas e asfaltenos e a agitação se dá por consequência do bombeamento, transporte e expansão dos fluidos produzidos. Pelo estudo feito por Salager (1986), quando o óleo é a fase dispersa, a emulsão é chamada de “Emulsão Óleo em Água” (O/A), e quando o meio disperso é aquoso, a emulsão é chamada de “Emulsão Água em Óleo” (A/O).

De acordo com Silva (2002), emulsão é uma mistura estável de dois líquidos imiscíveis. Um dos líquidos fica disseminado no seio do outro sob a forma de gotículas, geralmente esféricas; é a fase dispersa ou interna. Em oposição a esta fase, tem-se a fase contínua ou externa.

Oliveira (2000) afirma que, sob o ponto de vista das regiões de produção e das estações de transferência, a presença de emulsões do tipo água em óleo (A/O) acarreta, dentre outros problemas, a elevação dos custos de movimentação dos petróleos, 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.

A presença de agentes emulsificantes ou emulsificantes naturais no petróleo forma uma película que impede o contato entre as gotículas, estabilizando a emulsão. Esses agentes emulsificantes apresentam-se na forma de partículas sólidas que tendem a ser insolúveis em ambas as fases líquidas, porém, algum elemento desse agente tem uma preferência pelo óleo e outro elemento prefere a água. Além disso, agem formando um filme adsorvido em torno das gotículas dispersas, o que ajuda a impedir a floculação e a coalescência; também diminuem a tensão interfacial da gota de água, causando formação de gotas menores (SILVA, 2004).

Os estudos de Oliveira (2000) concluem que as emulsões de petróleo podem ser consideradas como sistemas termodinamicamente instáveis, sendo esta dependente dos fatores físicos e interfaciais envolvidos. São considerados fatores físicos a viscosidade, a massa específica das fases, a proporção volumétrica e a distribuição dos diâmetros da fase interna.

Os fatores interfaciais, por sua vez, são a tensão e a viscosidade interfacial, a compressibilidade e o envelhecimento do filme interfacial, além do efeito dos íons.

O tipo de emulsão é de fácil identificação, através de métodos físicos e físico-químicos, como mostra a Tabela 1.

Tabela1 - Métodos para identificar o tipo de emulsão

Método	Emulsão A/O	Emulsão O/A
Visual	Textura Cremosa	Textura gordurosa
Corantes	Corantes inorgânicos tingem a emulsão	Corantes orgânicos tingem a emulsão
Condutividade	Condutividade elétrica bem elevada comparada com a emulsão O/A	Condutividade elétrica a depender do potencial elétrico aplicado
Miscibilidade	A emulsão se mistura facilmente com um líquido miscível no meio da dispersão (dispersante)	

Fonte: MACHADO (2002)

Uma emulsão pode ser invertida para produzir a emulsão oposta. Esse processo é denominado inversão de fase, e a temperatura na qual esta ocorre é chamada de temperatura de inversão de fase. De acordo com Silva (2004), as emulsões podem ser revertidas de óleo/água para água/óleo e vice-versa pela variação de algumas condições, tais como, temperatura do sistema, natureza do desmulsificante ou sua adição, porcentagem em volume da fase dispersa e a fase em que o emulsificante está dissolvido.

Nas plataformas marítimas, a água produzida pode ser descartada diretamente no oceano desde que a concentração da fase dispersa, óleo, obedeça ao definido pelo órgão regulador competente.

Segundo Young *et al.* (1994), em plataformas *offshore*, uma separação inicial é feita pelo separador de produção, que é um tanque com pequenas chicanas, que separa grande parte do óleo da água produzida. Uma pequena quantidade de óleo restante na água deve ser separada antes do descarte.

A grande vantagem da utilização de hidrociclones para purificação da água produzida junto com o óleo em plataformas marítimas de produção reside não só na maior eficiência, mas também na menor área de convés e menor carga sobre o mesmo, propiciado pelo emprego desses equipamentos muito mais compactos do que os decantadores gravitacionais (MORAES, 2006).

2.3. Aplicação dos Hidrociclones nos Processos de Separação

Segundo Chu *et al.* (2004), além do grande número de aplicações no processamento mineral, a técnica de separação em hidrociclone tem sido usada recentemente em um crescente número de aplicações na engenharia ambiental, engenharia petroquímica, engenharia de alimentos, engenharia eletroquímica, bioengenharia, indústrias de polpa e papel dentre outros.

Cada uma destas aplicações tem necessidades e objetivos particulares, o que exige mudanças no projeto e operação do hidrociclone. A separação das partículas (fase dispersa) do líquido (fase contínua) tem por base a diferença de densidade entre as fases, e a separação depende profundamente do tamanho das partículas (SVAROVSKY, 2000).

Segundo Grady *et al.* (2003), a geometria básica de um hidrociclone consiste em quatro partes: seção de entrada da alimentação, seção cônica de redemoinho, tubo de *overflow*, tubo de *underflow*. O fluido entra no hidrociclone tangencialmente girando com intensidade na seção cônica. A velocidade através da pequena área da seção transversal da entrada pode ser maior que 20 m/s, produzindo um número de Reynolds na faixa de 100.000. Esse 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*.

2.3.1. Funcionamento do hidrociclone

A separação da fase dispersa nos separadores ciclônicos é realizada pela ação do campo centrífugo que se estabelece no interior do dispositivo devido às condições impostas à corrente de fluido que escoar através dele.

Os dispositivos ciclônicos (ciclones e hidrociclones) não têm partes móveis. Por isso mesmo, são mais simples que as centrífugas e demandam menores custos de investimento, operação e manutenção, embora operem com campos centrífugos de menor intensidade.

Os hidrociclones são equipamentos constituídos de uma parte cilíndrica e uma parte cônica justapostas, nas quais a dispersão é alimentada por um tubo de entrada cujo eixo é normal ao eixo do equipamento, e que é posicionado tangencialmente à parede lateral do cilindro (Figura 1). O separador tem duas aberturas para saída da dispersão classificada, posicionada axialmente ao equipamento, uma delas situada próxima à seção de alimentação, chamada *overflow*, e a outra situada numa seção afastada da seção de alimentação, próxima ao vértice do corpo cônico do hidrociclone, chamada *underflow*.

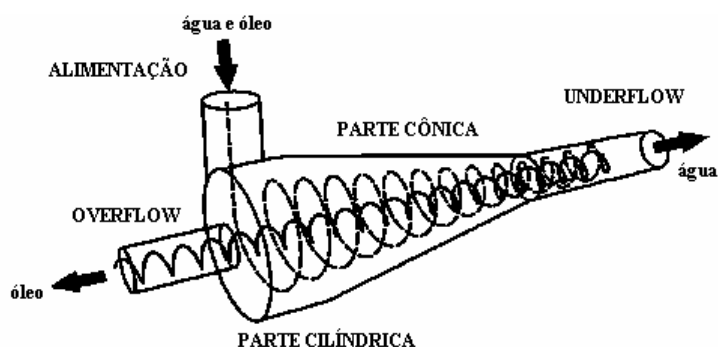


Figura 1 - Princípio de funcionamento do hidrociclone para separação água-óleo.

Adaptado de HUSVEG *et al.*, 2007.

2.3.2. Características do hidrociclone padrão

Arterburn (1983) define hidrociclone padrão como sendo o ciclone que tem como característica uma relação geométrica entre seus parâmetros (diâmetro do ciclone, área de alimentação, *vortex finder*, orifício do *underflow* e altura) suficiente para promover o tempo de retenção para classificar as partículas corretamente.

O parâmetro principal é o diâmetro do hidrociclone, que é o diâmetro interno da câmara de alimentação cilíndrica. O próximo parâmetro é a área do bocal de passagem no ponto de entrada para a câmara de alimentação. Esta é, normalmente, uma abertura retangular, com uma dimensão maior paralela ao eixo do ciclone.

Outro parâmetro é o *vortex finder*, cuja primeira função é controlar tanto a separação como o início do escoamento no hidrociclone. Além disso, o *vortex finder* é suficientemente extenso abaixo da entrada de alimentação para prevenir o curto-circuito com o qual o material iria diretamente para o *overflow*.

A seção cilíndrica é a próxima parte básica e é localizada entre a câmara de alimentação e a seção cônica. Esta tem o mesmo diâmetro da câmara de alimentação e sua função é prolongar o hidrociclone aumentando o tempo de retenção. Para o hidrociclone básico, o comprimento deve ser 100% do diâmetro do hidrociclone.

A próxima seção é a seção cônica. O ângulo incluso na seção cônica possui função similar a da seção cilíndrica, isto é, proporcionar o tempo de retenção suficiente.

A seção cônica termina no orifício do *underflow* que é o diâmetro interno do ponto de descarga. O tamanho deste orifício é determinado pela aplicação envolvida e tem que ser grande o suficiente para permitir que os sólidos a serem classificados pelo *underflow* saiam do ciclone sem bloquear a passagem. O tamanho do orifício deve ser entre 10% e 35% do diâmetro do hidrociclone.

2.3.3. Efeitos dos parâmetros geométricos na eficiência de separação

Segundo Puprasert *et al.* (2004), mesmo sendo o diâmetro nominal do hidrociclone o mais importante parâmetro para a eficiência de separação, outros parâmetros, tais como diâmetro da alimentação, diâmetro do *underflow* e diâmetro do *overflow* também influenciam na eficiência de separação. Esses três parâmetros são, normalmente, otimizados e fixados pelos fabricantes de hidrociclones.

Os efeitos dos parâmetros geométricos na eficiência de separação são analisados com relação ao diâmetro de corte reduzido d'_{50} , sendo que este pode ser definido como o tamanho de partícula que pode ser separada da fase contínua pelo hidrociclone com 50% de eficiência. Com base nesta definição, pode-se concluir que quanto menor for o d'_{50} , maior será a eficiência de separação.

A redução do diâmetro do *overflow* D_o diminui o tamanho do d'_{50} de acordo com a relação empírica dada pela Equação (1) (PLITT, 1984).

$$d'_{50} \propto D_o^{1,12} \quad (1)$$

A redução do diâmetro da alimentação, D_i , diminui o tamanho do d'_{50} de acordo com a relação empírica mostrada na Equação (2) (YOSHIOKA E HOTTA, 1955).

$$d'_{50} \propto D_i^{0,6} \quad (2)$$

O diâmetro do *underflow*, D_u , afeta sensivelmente a razão de fluido R_f (ver item 2.3.7.2) que, por sua vez, altera sensivelmente a performance de hidrociclones (MEDRONHO e SVAROVSKY, 1984). Mantidas as demais variáveis constantes, quanto maior o D_u , maior será o R_f , com conseqüente redução no diâmetro de corte, o que implicará em um aumento na eficiência de separação. A Equação (3a) fornece uma relação entre o diâmetro de corte reduzido d'_{50} e R_f e a Equação (3b), uma relação entre R_f e D_u . (COELHO e MEDRONHO, 2001).

$$\begin{cases} d'_{50} \propto \left[\ln\left(\frac{1}{R_f}\right) \right]^{0,40} & (a) \\ R_f \propto D_u^{3,10} & (b) \end{cases} \quad (3)$$

2.3.4. Outros parâmetros que afetam a eficiência de separação

O efeito das propriedades físicas na eficiência de separação pode ser compreendido através de uma análise da equação de Stokes, que fornece a velocidade terminal v_t de sedimentação das partículas.

$$v_t = \frac{\Delta\rho\gamma d_p^2}{18\mu_c} \quad (4)$$

sendo γ a intensidade do campo de forças (aceleração da gravidade ou intensidade do campo centrífugo, no caso de hidrociclones), μ_c a viscosidade da fase contínua, $\Delta\rho$ a diferença de densidade entre a fase dispersa e a fase contínua e d_p o diâmetro da partícula.

De acordo com a equação de Stokes, quanto maior for a diferença entre as densidades maior será a velocidade de sedimentação das partículas e, por isso, maior será a eficiência de separação. Um segundo parâmetro é a intensidade do campo de forças. No caso de hidrociclones, este campo é gerado pelas altas velocidades tangenciais geradas no seu interior, sendo que para dado hidrociclone, quanto maior for a vazão, maior será a intensidade do campo. O terceiro parâmetro é a viscosidade da fase contínua, que é uma forte função da temperatura. O último parâmetro, o diâmetro da partícula, tem grande efeito na velocidade de sedimentação e, conseqüentemente, na eficiência de separação.

O fator de forma da partícula não aparece na equação de Stokes. Esta equação é, portanto, somente válida para partículas esféricas. Entretanto, estudos afirmam que a forma da partícula não pode ser negligenciada, visto que partículas não-esféricas atingem uma menor

velocidade terminal quando comparada com uma esfera de mesma massa, o que irá reduzir a eficiência de separação (PUPRASERT *et al.*, 2004).

A concentração de sólidos na suspensão de alimentação também afeta a eficiência. Para concentrações de sólidos superiores a 1% em volume, a velocidade terminal das partículas começa a sofrer sensível decréscimo, diminuindo, por conseguinte, a eficiência de separação. O diâmetro de corte reduzido aumenta com a concentração volumétrica, c_v , segundo a equação (COELHO e MEDRONHO, 2001):

$$d'_{50} \propto \exp(6,0 c_v) \quad (5)$$

2.3.5. Velocidade

A velocidade global no hidrociclone pode ser apresentada respeitando os três eixos apresentados na Figura 2. Exceto na região próxima ao eixo central do hidrociclone onde a velocidade axial é alta, a velocidade tangencial é a componente mais importante. Seu valor determina diretamente a intensidade do campo centrífugo (v^2/r) e a eficiência da separação é altamente dependente deste campo.

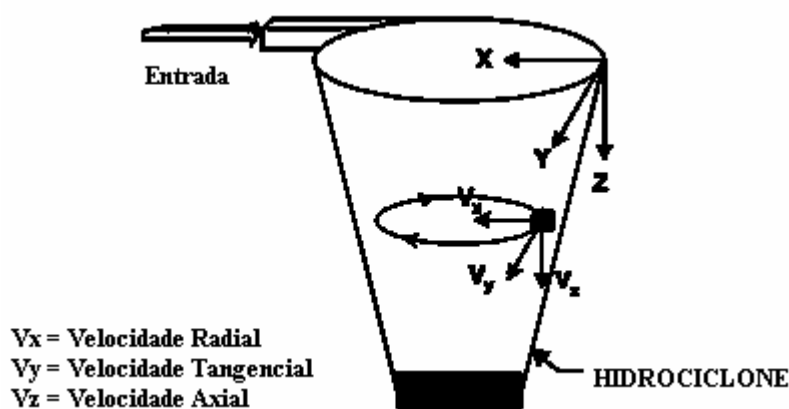


Figura 2 - Componentes da velocidade no hidrociclone.

Adaptado de Puprasert *et al.*, 2004.

Um estudo de caso sobre os perfis de velocidade foi detalhado por Kelsall, em 1952, no qual as três componentes de velocidade (tangencial, axial e radial) foram medidas ou calculadas.

A alimentação tangencial no hidrociclone produz dois tipos de vórtice: o vórtice livre, localizado mais externamente, e o vórtice forçado, que se localiza na parte interior, perto do eixo do hidrociclone, como mostra a Figura 3.

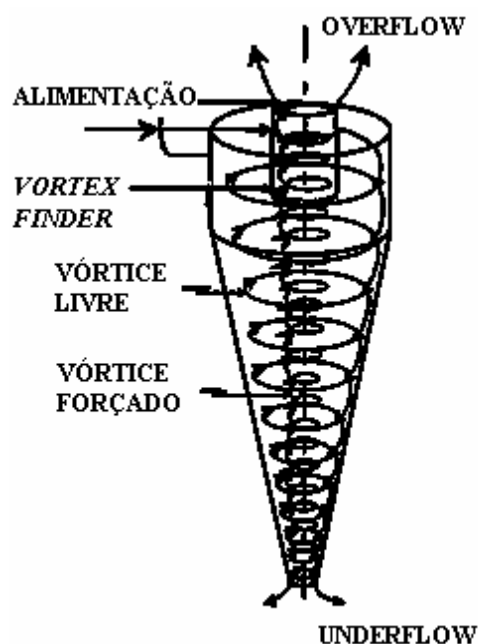


Figura 3 - Escoamento interno do fluido dentro do hidrociclone.

Adaptado de Medronho *et al.*, 2005.

Um fluido ideal em rotação conserva o momento angular e pode ser descrito pela Equação (6a). Esse modelo é aproximadamente válido para o vórtice livre que ocorre na periferia do ciclone (segundo SVAROVSKY, 1984, r aparece elevado a uma constante que varia de 0,5 a 0,9). O modelo que descreve o vórtice forçado que ocorre próximo ao eixo do hidrociclone (interno) é diferente e dado pela Equação (6b).

Vórtice Livre

$$v_y r = \text{constante} \quad (6a)$$

Vórtice Forçado

$$\frac{v_y}{r} = \text{constante} \quad (6b)$$

onde v_y é a velocidade tangencial e r é a distância radial.

As Figuras (4a) e (4b) mostram os perfis de velocidade do vórtice livre e do vórtice forçado, respectivamente. A Figura (4c) mostra o vórtice combinado, que ocorre em hidrociclones.

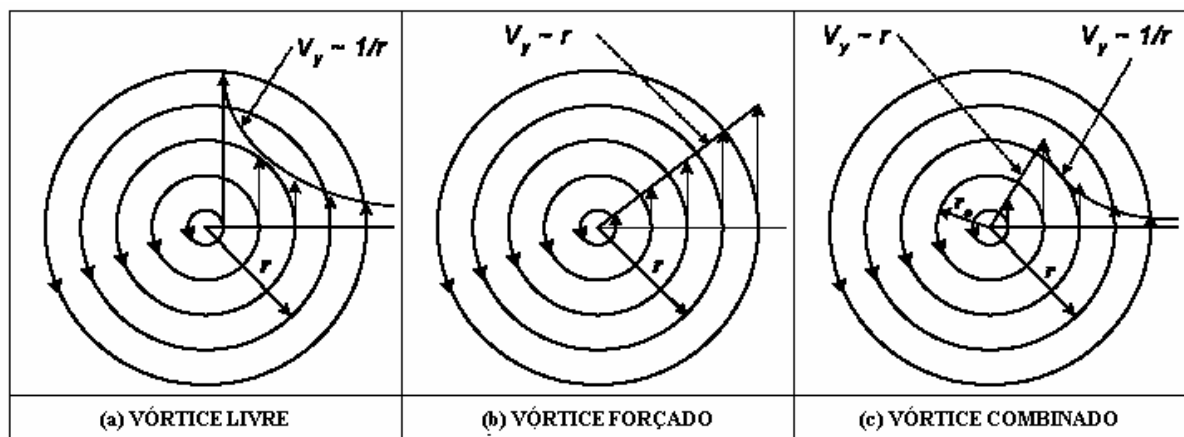


Figura 4 – Perfis de velocidade dos vórtices livre (a), forçado (b) e combinado (c).

Adaptado de Puprasert *et al.*, 2004.

2.3.6. Projeto do Hidrociclone

Na etapa de projeto, os programas de simulação e movimento de fluidos que permitem visualizar as trajetórias teóricas das correntes internas do hidrociclone em diferentes

condições de trabalho têm um papel importante. Com isso, é permitido aperfeiçoar o projeto de algumas partes essenciais do hidrociclone, eliminando ou reduzindo zonas críticas que originam turbulências. Simultaneamente, são utilizados nos experimentos protótipos transparentes para melhor visualização do que ocorre internamente no hidrociclone (BOUSO, 2003).

De acordo com Delfos *et al.* (2004), o projeto de hidrociclones, geralmente, é baseado na relação geométrica oriunda de dados experimentais. Embora isto seja aceitável para determinada geometria ou aplicação, essa aproximação não tem tido uma aplicação universal e não enfoca a mecânica dos fluidos que ocorre dentro do equipamento. Além disso, para o projeto de hidrociclones geometricamente diferentes com sistemas diferentes, este processo tem valor limitado.

Para Kraipech *et al.* (2006), o projeto das condições operacionais do hidrociclone e a previsão de seu desempenho podem ser feitos aplicando um grupo de equações de projeto. Cada equação de projeto descreve parâmetros fundamentais, que são usados para calcular o desempenho do hidrociclone. Esses parâmetros são: queda de pressão, razão de líquido para separação óleo-água, diâmetro de corte reduzido e curva ou grade de eficiência. Outras informações como: distribuição de tamanho de partícula, concentração de sólidos, vazão do *overflow* e balanço material global, podem ser derivados destes parâmetros, conforme diagrama para a análise de desempenho do hidrociclone apresentado na Figura 5.

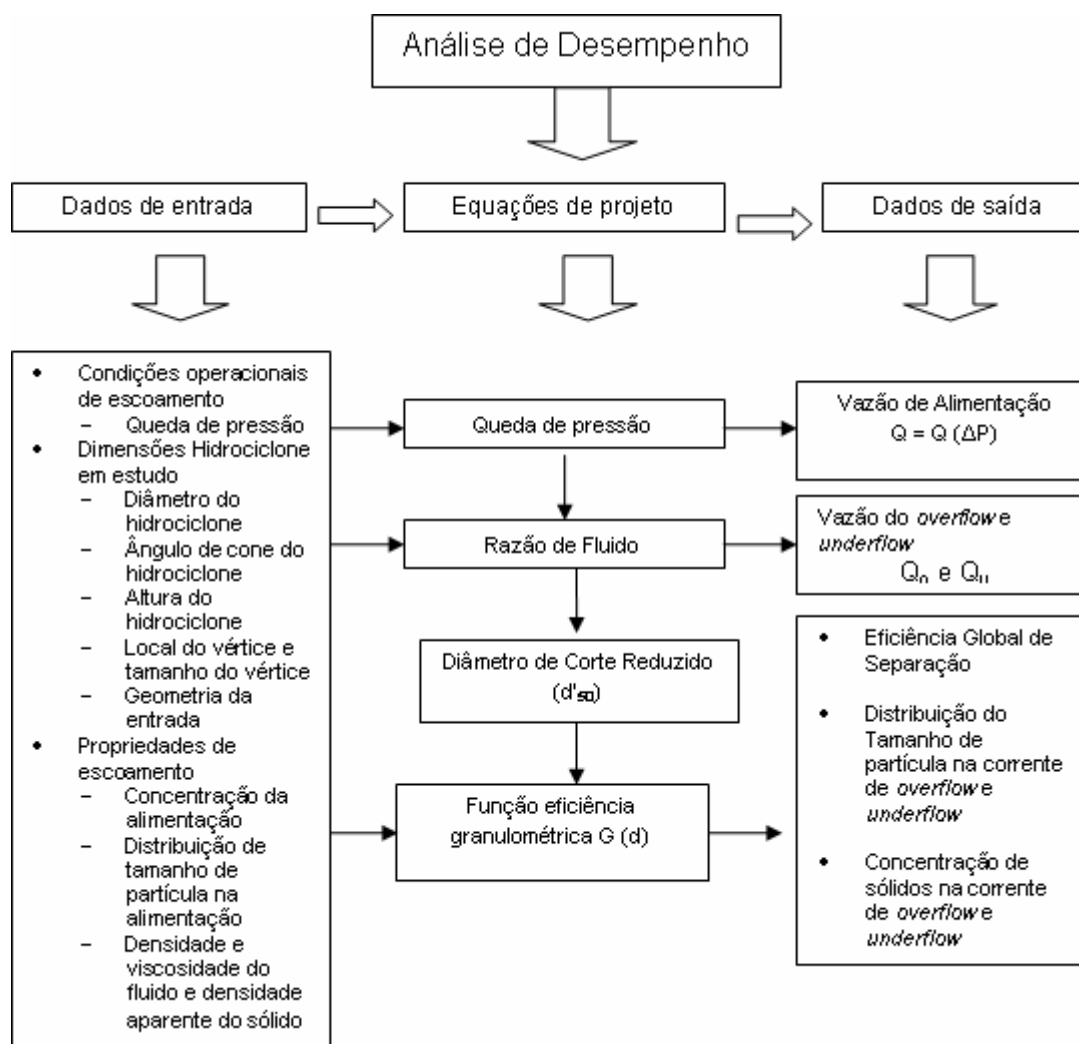


Figura 5 – Diagrama para a análise de desempenho do hidrociclone.

Adaptado de Kraipech *et al.*, 2006.

2.3.7. Critérios para avaliar o desempenho do hidrociclone

2.3.7.1. Eficiência Granulométrica para Separação Líquido-Líquido

Em hidrociclones tradicionais, o sólido, mais denso que o líquido, é recolhido no *underflow*. Entretanto, em separações óleo/água, a fase dispersa (óleo) é recolhido no *overflow*. Desta forma, as definições de eficiência devem ser baseadas nesta corrente. Assim

sendo, a definição de eficiência granulométrica (ou eficiência individual por tamanho) será a razão entre a taxa mássica de gotículas de óleo de um dado tamanho recolhida no *overflow* e a taxa mássica das gotículas de óleo deste mesmo tamanho na alimentação:

$$G(d) = 100 \times \frac{W_{go}(d)}{W_g(d)} \quad (7)$$

onde: $G(d)$ = Eficiência Granulométrica.

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

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

A Figura 6 mostra uma curva típica de eficiência granulométrica para hidrociclones.

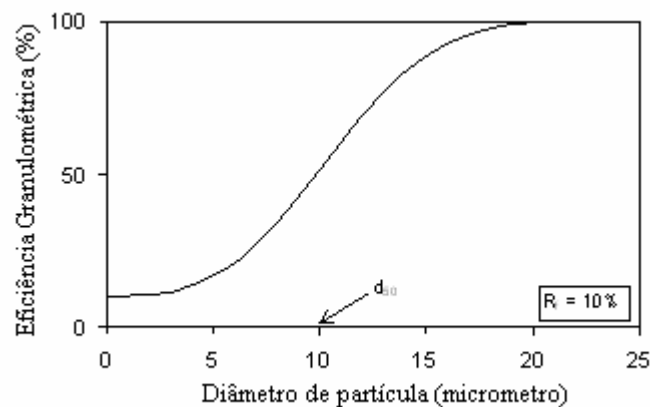


Figura 6 – Curva de eficiência granulométrica com $R_f = 10\%$.

Fonte: Adaptado de Medronho, (2004).

2.3.7.2. Razão de Fluido

A razão de fluido é um parâmetro que relaciona a taxa mássica de água coletada no *overflow* e a taxa mássica de água alimentada no hidrociclone.

$$R_f = \frac{W_{lo}}{W_l} \quad (8)$$

onde: R_f = Razão de fluido

W_{lo} = Taxa mássica de líquido no *overflow*

W_l = Taxa mássica de líquido da alimentação

2.3.7.3. Eficiência Granulométrica Reduzida

A eficiência granulométrica relaciona a taxa mássica de gotículas de óleo de dado tamanho coletada no *overflow* com a taxa mássica de gotículas de óleo deste mesmo tamanho alimentada no hidrociclone. A eficiência granulométrica reduzida leva em consideração somente a quantidade de óleo coletada no *overflow* pela ação centrífuga do hidrociclone, ou seja, desconsiderando-se o óleo enviado ao *overflow* apenas pelo efeito divisor de vazões. A eficiência granulométrica reduzida pode ser representada pela Equação (9) (NASCIMENTO, 2008).

$$G' = \frac{(G - R_f)}{(1 - R_f)} \quad (9)$$

onde: G' = Eficiência Granulométrica Reduzida

G = Eficiência granulométrica

R_f = Razão de fluido

A curva de eficiência granulométrica em função do diâmetro de partícula, apresentada na Figura 6, não começa na eficiência 0%. Isto acontece porque a operação do hidrociclone sempre produz uma eficiência mínima aproximadamente igual à razão de fluido. A Figura 7 mostra a curva de eficiência granulométrica reduzida em função do tamanho da partícula. Como se pode observar, esta curva passa pela origem.

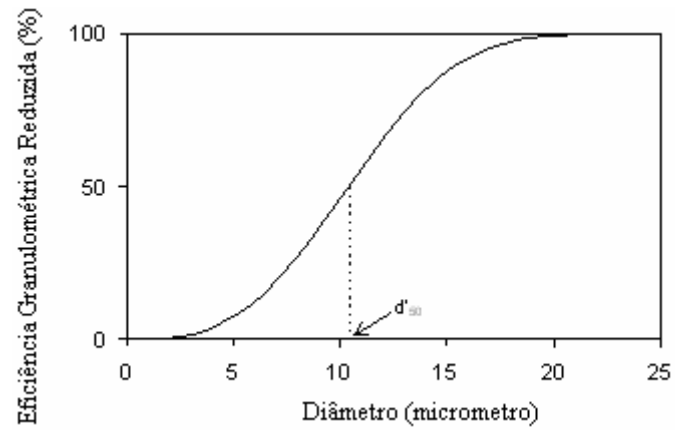


Figura 7 – Eficiência granulométrica reduzida e diâmetro de corte reduzido

Fonte: Adaptado de Medronho, (2004).

A Figura 8 mostra a curva G' em função da razão d/d'_{50} . Esta curva é representativa do comportamento dos hidrociclones (COELHO e MEDRONHO, 2001).

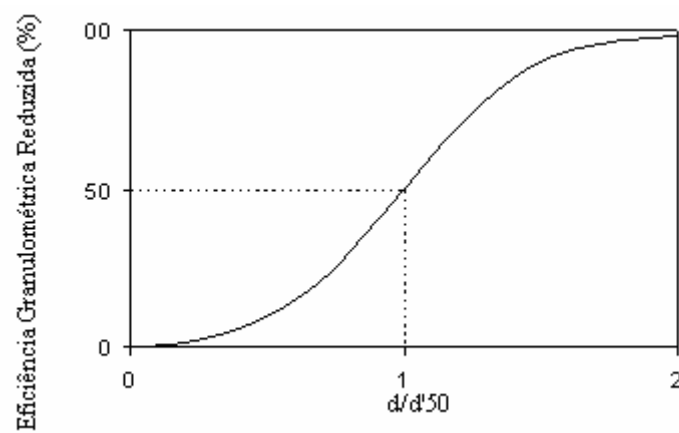


Figura 8 – Eficiência granulométrica reduzida em função de d/d'_{50} .

Fonte: Adaptado de Medronho, (2004).

2.3.8. Grupos Adimensionais Importantes no Estudo de Hidrociclones

O número de Euler pode ser definido como a relação entre a queda de pressão e a vazão de alimentação, como mostra a Equação (10). Quanto maior o seu valor, maiores serão as necessidades energéticas do processo e pode ser usado para distinguir qual equipamento é mais econômico, do ponto de vista estritamente operacional (ARRUDA *et al.*, 1993).

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \frac{V_C^2}{2}} \quad (10)$$

Nesta equação, V_C é a velocidade da suspensão na região cilíndrica e pode ser calculada pela Equação (11).

$$V_C = \frac{4Q}{\pi D_{HC}^2} \quad (11)$$

É comum descrever o regime fluidodinâmico através do número de Reynolds Re que expressa – a menos de uma constante – a razão entre as forças inerciais e as viscosas (LUZ e LIMA, 2001):

$$Re = \frac{D_{HC} \rho v}{\mu} \quad (12)$$

onde: ρ = Densidade da fase contínua

D_{HC} = Diâmetro do hidrociclone

v = Velocidade relativa entre a partícula e o fluido

μ = Viscosidade dinâmica do fluido

Quando existir movimento relativo entre a partícula e o fluido ao seu redor, o fluido exerce uma força de arraste sobre a partícula. Essa força é exercida na direção paralela e

sentido contrário à velocidade do fluido, logo ela é uma força resistiva. Em um escoamento estacionário, a força de arraste na partícula é:

$$F_D = \frac{C_D A_g \rho v^2}{2} \quad (13)$$

onde: F_D = força de arraste

C_D = coeficiente de arraste

A_g = área projetada da gota na direção do escoamento

ρ = densidade do fluido

v = velocidade relativa entre a partícula e o fluido

O coeficiente de arraste para partículas rígidas esféricas é uma função do número de Reynolds da partícula. Para baixos números de Reynolds da partícula Re_p , com base na equação de Stokes (Equação 4), pode-se chegar a:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad \text{para } Re_p < 0,4 \quad (14)$$

Neste estudo o número de Reynolds da partícula é substituído pelo número de Reynolds baseado no diâmetro da gotícula de óleo. Sendo:

$$Re_g = \frac{d_p v \rho}{\mu} \quad (15)$$

O coeficiente de arraste para gotas que se movem com maiores números de Reynolds pode ser aproximado pela correlação de Schiller-Naumann (ANSYS CFX, 2006), supondo que as gotas se comportam como esferas rígidas:

$$C_D = \max \left[\frac{24}{Re} \left(1 + 0,15 Re^{0,687} \right); 0,44 \right] \quad \text{para } Re_p < 2 \times 10^5 \quad (16)$$

Medronho (1984) demonstrou que o número de Stokes, como definido pela Equação (17), é de fundamental importância no *scale-up* de hidrociclones.

$$St = \frac{2(\rho_s - \rho)Q d_{50}^2}{9\pi\mu D_{HC}^3} \quad (17)$$

A relação entre a queda de pressão e a vazão volumétrica é usualmente expressa pela correlação (MEDRONHO e SVAROVSKY, 1984):

$$Eu = K Re^n \quad (18)$$

2.3.9. Comparação entre os hidrociclones para separação sólido-líquido e líquido-líquido

Dois casos diferentes podem ser visualizados em se tratando de separação líquido-líquido. O primeiro é o caso em que o mais pesado é o componente disperso, como por exemplo, água dispersa em óleo; neste caso, a maior parte do fluxo deixa o hidrociclone através do tubo de *overflow*, como no projeto convencional. No segundo caso, o componente mais leve está disperso no mais pesado, como por exemplo óleo disperso em água. Neste caso, a maior parte do fluxo deve deixar o hidrociclone através do orifício de *underflow*. Desta forma, geometrias ótimas para estes diferentes casos podem diferir substancialmente.

Muitas características geométricas são diferentes nesses dois tipos de dispositivos ciclônicos. Nos ciclones ou hidrociclones que operam com sólido-fluido não existe qualquer preocupação em relação à ruptura de partículas, pois mesmo submetidas a elevadas tensões cisalhantes, resultantes do escoamento no dispositivo, não são capazes de causar esse efeito. Mas no caso da separação de uma fase líquida dispersa sob a forma de gotas, a ruptura destas deve ser levada em conta, uma vez que gotas de menores diâmetros têm uma menor

velocidade de sedimentação sob a ação do campo centrífugo, ou seja, são mais difíceis de separar.

Levando esses fatos em conta, Marins (2007) afirma que o hidrociclone para águas oleosas apresenta um cabeçote que permite uma alimentação da dispersão em uma forma mais suave. Esse cabeçote é composto de uma seção cilíndrica, seguindo de uma seção cônica para aceleração do vórtice gerado na seção anterior. O objetivo desse cabeçote composto é minimizar o impacto da corrente de fluido e as perdas de carga localizadas na entrada, que aumentariam a turbulência, as tensões cisalhantes e a ruptura de gotas, impondo uma aceleração gradual à corrente de fluido. Além disso, os cabeçotes desse tipo de hidrociclone têm, normalmente, duas entradas situadas diametralmente opostas na seção transversal, as quais contribuem para aumentar a simetria axial.

Os hidrociclones para sólidos não apresentam seção de aceleração, situando-se a seção cônica de separação logo após o cabeçote cilíndrico de alimentação. Além disso, normalmente, têm somente uma abertura de alimentação.

Outra diferença entre um hidrociclone utilizado para a separação de um líquido leve disperso e um destinado à remoção de sólido pesado disperso, são as diferentes vazões que são drenadas pelas aberturas de saída de fluido próximas à alimentação (*overflow*) e a saída de fluido próxima ao vértice do trecho cônico (*underflow*) nesses dois equipamentos.

No hidrociclone para águas oleosas, a fase dispersa sendo mais leve que a contínua e apresentando-se numa concentração muito baixa (menor que 0,2%), migra para a região do eixo do equipamento e é removida pelo *overflow*. Naturalmente, é interessante obter-se essa corrente com o menor teor de água possível. Assim, a maior parte da corrente de alimentação deve deixar o equipamento pelo *underflow*, como uma corrente de água tratada (livre do óleo disperso). Nos ciclones para separação de sólidos, os últimos deixam o equipamento pelo *underflow*. Logo, é interessante que os mesmos sejam retirados agregando o menor teor de líquido possível e, portanto, a maior parte do líquido deve deixar o equipamento pelo *overflow*.

A menor diferença de densidade normalmente existente entre o óleo e a água, quando comparada com esta diferença em relação a sólido-líquido (este último normalmente a água), implica em que o tempo de residência da dispersão no interior do equipamento, sob a ação do campo centrífugo, seja maior para os hidrociclones líquido-líquido.

Outra diferença notável entre os hidrociclones líquido-líquido e sólido-líquido é que estes últimos têm o tubo do *overflow* prolongado para o interior do corpo do equipamento, enquanto isso não ocorre, normalmente, com os primeiros. A principal função desse prolongamento, conhecido com *vortex finder*, é minimizar a fuga da dispersão (curto circuito) que flui diretamente da alimentação para o *overflow* sem percorrer a trajetória espiral descendente (externa) e ascendente (interna). Nos hidrociclones para águas oleosas, seus idealizadores concluíram, com base em experimentos, que a existência do prolongamento mencionado era prejudicial à eficiência do equipamento (MORAES, 2006).

Segundo Marins (2007), resumidamente pode-se colocar como principais características dos hidrociclones líquido-líquido, relativamente aos do tipo sólido-líquido:

- Cabeçote mais suave – minimiza o problema de rupturas das gotas;
- Corpo mais longo – aumenta o tempo de residência;
- Não existe *vortex finder* pois este prejudica a eficiência.

2.3.10. Vantagens e Desvantagens dos hidrociclones

Para Svarovsky (1984), as vantagens relativas aos hidrociclones podem ser resumidas da seguinte forma:

1. São extremamente versáteis na aplicação e podem ser usados para clarificar líquidos, concentrar pastas, lavar sólidos, separar dois líquidos imiscíveis, degaseificar líquidos ou classificar sólidos de acordo com a densidade e forma.
2. São baratos e simples de instalar e de colocar em funcionamento, além de requerer pouca manutenção.
3. São pequenos em relação a outros separadores, economizando assim espaço e também obtendo um baixo tempo de residência de partículas, que é uma vantagem em termo de maior controle da velocidade, por exemplo, na sedimentação classificada.
4. A existência de forças de ruptura elevadas no escoamento é uma vantagem na classificação de sólidos, devido à quebra de aglomerados, e também no tratamento de pastas pseudoplásticas e de Bingham.

As desvantagens relativas aos hidrociclones, segundo Svarovsky (1984), podem ser:

1. São inflexíveis quando instalados e em operação, devido à forte dependência do desempenho com a vazão e com a concentração da alimentação. Se ocorrer flutuação na vazão de alimentação ou na concentração de sólidos, a eficiência de separação é comprometida.
2. São susceptíveis à erosão, mas ações podem ser tomadas para reduzir esse efeito, tal como aplicar uma camada anticorrosiva na parte interna do equipamento, adequada para o material deste e inerte com relação ao tipo de dispersão a ser alimentada.
3. A existência de ruptura dos flocos pode algumas vezes se tornar uma desvantagem porque a floculação não pode ser usada para realçar a separação.

2.4. Fluidodinâmica

De acordo com Puprasert *et al.* (2004), a separação no hidrociclone vem da transformação da energia estática do fluido (pressão do fluido) em energia dinâmica (velocidade do fluido).

O princípio básico de separação empregado nos hidrociclones é a sedimentação centrífuga. Nestes, as partículas suspensas são submetidas à aceleração centrífuga, separando-as do fluido. Ao contrário das centrífugas (que usam o mesmo princípio), os hidrociclones não têm partes móveis e o movimento de vórtice é desempenhado pelo próprio fluido.

Conforme Svarovsky (1984), o uso de hidrociclones para a separação líquido-líquido tem sido testado com experimentos e estudado há algum tempo. Devido ao regime turbulento transiente conduzir à tensão cisalhante máxima, mudanças no projeto do hidrociclone padrão têm sido feitas no sentido de adequar a geometria a diferentes tipos de condições na operação. Como já mencionado, o grande sucesso no desenvolvimento dessa área começou na *Southampton University* com um grupo de estudos liderado por Martin T. Thew (Thew *et al.*, 1980). Dependendo do sistema particular no qual o ciclone vai ser aplicado, existem dois projetos diferentes de hidrociclone, um para dispersões de líquidos leves com concentrações relativamente baixas em outro líquido (exemplo óleo em água) e outra para dispersão de líquidos pesados em concentrações superiores a 30% em outro líquido (por exemplo, água dispersa em querosene).

O primeiro projeto de hidrociclone para a fase dispersa leve diverge do hidrociclone convencional. A mistura é alimentada através de entradas tangenciais. Na câmara de entrada ocorre o aumento do diâmetro que ocasiona a queda das forças de cisalhamento. O tempo de residência adequado sem uma queda de pressão muito grande é obtido com uma seção do corpo do hidrociclone muito longa, que é a parte cônica e a parte cilíndrica. Uma gradual redução do tamanho da seção cônica promove o escoamento do vórtice em um minúsculo diâmetro interno. Uma pequena fração da vazão de alimentação forma o núcleo central (onde a fase mais leve se concentra) e é carregada através do *vortex finder*.

Na retirada de óleo contaminando a água, o projeto deve apresentar uma capacidade de

separação do óleo na alimentação maior que 97%, com um tamanho de corte menor que 10 μm . Este desempenho é independente da concentração da alimentação, para concentrações de óleo acima de 3%. Uma característica importante desta operação é a supressão do núcleo de gás (considerado necessário por THEW *et al.* (1980) para a melhor estabilidade do vórtice) pela contrapressão, e também pela diferença na queda de pressão entre a alimentação e as duas saídas de produto: a queda de pressão medida através do *overflow* e a queda de pressão do *underflow*. A contrapressão e a razão entre o *underflow* e o *overflow* são controladas pelo monitoramento das duas correntes de saída por válvulas. Tem sido encontrado como tempo de residência para a fase contínua uma faixa de aproximadamente 3 segundos.

De acordo com Massarani (2002), procura-se estabelecer, para hidrociclones com diferentes configurações, as equações que fornecem a relação entre diâmetro de corte, propriedades físicas do sistema, dimensões do equipamento e condições operacionais. Observando também a função eficiência de coleta relativa à partícula de diâmetro d , a expressão para a eficiência global de coleta e a equação que relaciona vazão e queda de pressão por uma relação específica entre suas dimensões, expressa usualmente em termos do diâmetro da parte cilíndrica do equipamento D_{HC} .

2.4.1. Fluidodinâmica de Partículas

Segundo Massarani (2002) a separação de partículas no interior do hidrociclone é efetuada pela ação do campo centrífugo resultante da configuração do equipamento e do modo com que a mistura é alimentada ao sistema.

As forças, que atuam sobre a partícula da fase dispersa, são as decorrentes do próprio campo (como é o caso do empuxo decorrente da diferença de densidade) e as forças sobre a superfície da partícula, como é o caso da força de arraste gerada pela diferença de velocidade entre a fase dispersa e a contínua.

No sistema bifásico óleo/água, as gotículas de uma fase, dispersas no seio da outra mais pesada, atingem uma velocidade terminal de migração que as dirige à interface entre os dois fluidos, fazendo-as atingir a camada de fluido menos denso.

Os casos mais importantes e mais críticos nesses equipamentos são justamente as dispersões constituídas de pequenas partículas da fase dispersa, geralmente em baixa concentração. O problema pode ainda apresentar diversas outras fontes de complexidade, tais como a presença de surfactantes na superfície das gotículas de fluido disperso, que afetam o movimento da gotícula e o efeito populacional, pelo menos em algumas regiões do escoamento (MORAES, 2006).

2.4.2. Separação de fases em um sistema particulado

Moraes (2006) explica que o escoamento no interior dos hidrociclones é bastante complexo, apesar das características mecânicas bastante simples desses separadores, que nada mais são do que equipamentos tubulares estáticos, compostos de trechos cilíndricos e cônicos justapostos, onde o movimento de rotação do fluido é promovido unicamente pela alimentação normal ao eixo do equipamento e tangencial à parede curva (côncava) da seção transversal do equipamento.

Considerando-se que o gradiente radial de pressão muito elevado causado pela aceleração centrífuga produz valores reduzidos de pressão junto ao eixo do equipamento, poderá ocorrer, nessa região, dependendo das condições operacionais, a formação de um núcleo de ar ou de vapor do próprio fluido.

Há também outros fluxos secundários no interior dos hidrociclones que afetam 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.

2.4.3. Complexidade do escoamento no hidrociclone

Conforme Leahy-Dios e Medronho (2003), o estudo teórico do escoamento em hidrociclone é feito através das equações de conservação de massa e momento, que são equações diferenciais parciais não lineares, de difícil resolução analítica.

As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, escritas no sistema cilíndrico de coordenadas, são dadas por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (21)$$

As Equações (19), (20) e (21) podem ser escritas para um campo escalar geral ϕ , expandindo os termos, como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S^\phi \quad (22)$$

A Equação (22) representa a conservação de massa quando $S^\phi = 0$ e $\phi = 1$. As equações do movimento nas três direções coordenadas são obtidas fazendo ϕ igual a u , v e w com o termo fonte apropriado, que inclui o gradiente de pressão. A equação de energia é obtida fazendo $\phi = T$, também com o termo fonte apropriado. O produto da difusividade pela massa específica da propriedade transportada em consideração é representada por Γ^ϕ . Para as equações de Navier-Stokes $\Gamma^\phi = \mu$ e para a equação de energia $\Gamma^\phi = k/c_p$; para o escoamento laminar, é igual a μ_{efetivo} e para o escoamento turbulento, é igual a $(k/c_p)_{\text{efetivo}}$.

O primeiro termo do lado esquerdo da Equação (22) é o termo temporal e serve para avançar a solução no tempo. Fisicamente, representa a variação da propriedade ϕ dentro do volume de controle. Os outros termos, ainda no lado esquerdo da equação, representam o

balanço convectivo da variável ϕ . Para o tratamento são os mais delicados, devido a não-linearidade. Os três primeiros termos do lado direito representam o balanço dos fluxos difusivos, enquanto o termo fonte é responsável por acomodar todos os termos que não se encaixam na equação. Quando ϕ representar os componentes do vetor velocidade, o termo fonte conterá o gradiente de pressão.

A Equação (22) pode, ainda, representar a conservação de outras propriedades, como a energia cinética turbulenta (k) e dissipação da energia cinética turbulenta (ε), gerando outras duas equações diferenciais que se acrescentam ao sistema quando o modelo $(k - \varepsilon)$ é usado para modelar problemas de escoamento turbulento (MALISKA, 2004).

2.4.4. Apresentação Qualitativa do Escoamento no Hidrociclone

Assim que deixa a alimentação, a corrente de fluido entrando no ciclone encontra uma parede côncava que impõe um forte movimento de rotação ao redor do eixo. O fluido descreve uma trajetória espiral em direção à saída próxima ao vértice cônico (*underflow*). Porém, quando uma partícula atinge uma região próxima ao eixo axial passa a desenvolver um movimento reverso, sendo drenada pela abertura de saída próxima da alimentação (*overflow*). Esse fenômeno pode ser entendido, de maneira qualitativa, ao se observar o diagrama esquemático mostrado na Figura 9.

Na seção transversal próxima à alimentação do hidrociclone, a pressão P_1 é maior que P_2 devido à aceleração centrífuga (o fluido é empurrado contra a parede pelo efeito do campo centrífugo). O mesmo acontece em relação às pressões P_3 e P_4 , na seção mais afastada da entrada. A baixa pressão produzida na região próxima ao eixo na primeira seção pode ser forte o suficiente para tornar P_2 menor que P_4 , o que resulta em um escoamento reverso junto ao eixo. As vazões pelas aberturas de saída são funções das diferenças de pressões envolvidas, as quais, por sua vez, são funções dos diâmetros dessas duas aberturas e da vazão de alimentação do hidrociclone, sendo esta última responsável pela geração do efeito centrífugo.

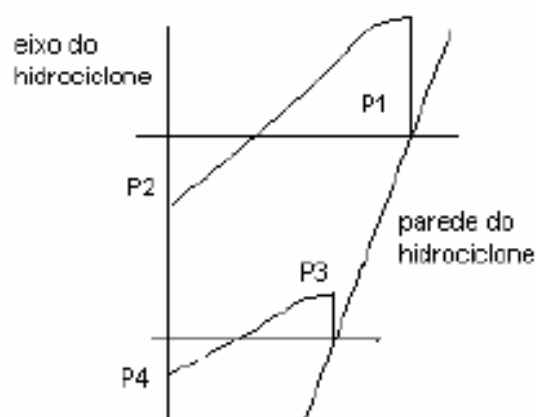


Figura 9 – Distribuição radial de pressão no interior de um hidrociclone (MARINS, 2007).

A componente axial da velocidade está direcionada ao *overflow* para o fluido que se concentra próximo ao eixo axial; e ao *underflow* para o fluido que se concentra próximo à parede lateral do hidrociclone. Por sua vez, a direção da componente radial é da parede para o centro do equipamento. A magnitude da componente radial também deve, pelo menos, ser uma ordem de grandeza menor que as outras componentes, uma vez que a área através da qual se realiza o escoamento radial é muito maior que a seção transversal do equipamento e muito maior que a área transversal do orifício de alimentação.

Cabe ressaltar algumas considerações sobre a componente tangencial da velocidade. Uma partícula de fluido entrando no equipamento tem que descrever uma trajetória espiral descendente. Durante esse movimento, a partícula tem uma tendência de conservar o momento angular e como o raio é decrescente à medida que caminhamos em direção ao *underflow*, a velocidade tangencial deve aumentar. Entretanto, à medida que o raio diminui, a viscosidade passará a reduzir a velocidade tangencial, a partir de algum ponto ao longo do raio. Desse modo, o perfil de velocidade tangencial deverá se comportar como um vórtice livre na região afastada do eixo e como um perfil linear de rotação de corpo rígido próximo ao eixo (vórtice forçado).

Em vista do exposto, constata-se que, apesar da simplicidade construtiva, o escoamento no interior de hidrociclones apresenta características bastante complexas, tais

como linhas de corrente com curvatura acentuada, forças de campo intensas, turbulência anisotrópica e ainda a presença de duas ou mais fases (MARINS, 2007).

2.4.4.1. Caracterização do escoamento

Conforme Moraes (2006), no dimensionamento de equipamentos de separação óleo/água, na indústria de petróleo, a maior atenção é para as gotículas de pequeno diâmetro, que tendem a se comportar como partículas sólidas de forma aproximadamente esférica e que, mesmo com a presença de surfactantes, tem seu movimento regido, dentro de uma aproximação razoável, pela equação de Stokes para o cálculo da velocidade terminal (Equação 23).

$$v_t = \frac{2a^2(\rho_s - \rho)g}{9\mu} \text{ ou } v_t = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu} \quad (23)$$

No caso de separadores em que a força de campo mais significativa é a centrífuga, a expressão de Stokes continua válida, só que neste caso, a aceleração gravitacional é substituída pela aceleração centrípeta, dada por $\frac{v^2}{r}$, na qual v é a velocidade tangencial do fluido contínuo ao redor de um eixo e r é a distância a esse eixo.

No caso de um hidrociclone, supondo que a fase contínua seja constituída por água e a fase dispersa por óleo, a velocidade terminal do óleo será na direção do eixo do equipamento. À medida que a gotícula se aproxima do mesmo, o raio diminui e, se a velocidade de rotação do fluido permanecer constante ou também aumentar - como ocorre em boa parte do domínio de escoamento de um hidrociclone – a aceleração centrípeta tende a aumentar bastante, acarretando um grande aumento na velocidade terminal e, portanto facilitando a separação.

2.5. Modelagem Matemática

Para se fazer um estudo de um determinado fenômeno físico, pode-se optar por métodos teóricos ou ensaios em laboratório, que devem ser embasados em análise teórica

prévia. Inicialmente, deve-se modelar a física do fenômeno. Por modelagem matemática entende-se como determinar quais as grandezas físicas (como por exemplo, temperatura, pressão e densidade) atuam sobre o sistema físico, e como elas o afetam (no caso de vários modelos equivalentes deve-se preferir os mais simples).

O procedimento começa com a elaboração de um modelo a partir da aplicação de princípios físicos, descritos por leis de conservação adequadas ao fenômeno, tais como conservação de massa, energia e momento. Os modelos resultantes são expressos por equações que relacionam as grandezas relevantes entre si para um determinado espaço e tempo. Eles podem ser utilizados tanto para explicar como para prever o comportamento do sistema em diferentes situações (FORTUNA, 2000).

2.5.1 Métodos Numéricos

Conforme Maliska (2004), o engenheiro incumbido de resolver um determinado problema tem, fundamentalmente, a sua disposição, três ferramentas:

1. Métodos Analíticos;
2. Métodos Numéricos; e,
3. Experimentação em Laboratório.

Os métodos analíticos e os numéricos formam a classe dos métodos teóricos. Os analíticos são aplicados apenas em problemas simples, sendo que as hipóteses simplificadoras adotadas podem desviar a resposta do fenômeno físico real. Os numéricos podem resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias complexas. Eles apresentam resultados com razoável rapidez. Os experimentais trabalham com a configuração real, podem ser de altíssimo custo e muitas vezes não podem ser realizados por questões de segurança ou pela dificuldade da reprodução das condições reais. Na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, muitas vezes é a única alternativa que o projetista dispõe.

Para testar a validade do modelo numérico escolhido há duas formas:

1. Validação Numérica: comparam-se os resultados obtidos com outras soluções, analíticas ou numéricas, verificando se a equação diferencial foi corretamente resolvida. São avaliadas a precisão da resolução e a convergência do algoritmo testado. Verifica-se a qualidade do modelo numérico.

2. Validação Física: comparam-se os resultados obtidos com resultados experimentais. Esta validação se preocupa com a fidelidade do modelo matemático para com o problema físico em questão.

O principal objetivo da solução numérica é encontrar um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais e um modelo matemático que represente com fidelidade o fenômeno físico.

2.6. Modelos de Turbulência

Nos escoamentos turbulentos, perturbações geram instabilidades no escoamento médio, acabando por produzir vórtices turbulentos. Esses vórtices vão se “quebrando” em estruturas cada vez menores até que os vórtices de menor escala sejam dissipados pelas forças viscosas.

Moraes (2006) menciona as seguintes características do escoamento turbulento:

- Multiplicidade de escalas espaciais e temporais. Ou seja, no escoamento turbulento aparecem estruturas dentro do escoamento com dimensões variáveis desde a ordem da dimensão do domínio de escoamento até dimensões bastante reduzidas. A vida média dessas estruturas também varia numa ampla escala de tempo. A faixa de escalas espaciais e temporais amplia-se com o número de Reynolds.
- A turbulência é essencialmente tridimensional. A vorticidade em um escoamento turbulento é tridimensional e as linhas de vorticidade não são paralelas, o estiramento dos vórtices mantém a contínua flutuação da vorticidade. Como esse estiramento não pode ocorrer em escoamentos uni ou bidimensionais, segue que a tridimensionalidade é

uma característica intrínseca do escoamento turbulento, ainda que o movimento médio seja uni ou bidimensional.

- A turbulência é um fenômeno contínuo, já que as menores escalas do escoamento turbulento são maiores que qualquer escala de movimento molecular.

- O aumento da difusividade é a mais importante característica da turbulência do ponto de vista da engenharia. A difusão turbulenta aumenta muito a transferência de massa, momento e energia. As tensões aparentes nos escoamentos turbulentos são ordens de grandezas maiores que as correspondentes tensões nos escoamentos laminares.

Os modelos de turbulência disponíveis e empregados para a solução dos problemas de engenharia são os:

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

Optou-se por empregar o modelo k - ϵ devido ao fato de ser um modelo amplamente difundido e aplicado, tendo sido utilizado para servir de valor inicial para o modelo de tensão de Reynolds (SSG) porque o último se propõe a calcular cada um dos componentes do Tensor de Reynolds.

No item a seguir serão detalhados apenas os modelos empregados neste trabalho.

2.6.1 Modelo k - ϵ

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995) o modelo k - ϵ apresenta as vantagens de ser um modelo de turbulência simples quando fornecidas as condições iniciais e de contorno, de ter um desempenho excelente para muitos escoamentos industriais e de ser bastante validado e bem estabelecido. E apresenta a desvantagem de ter um desempenho fraco para uma grande

variedade de casos, como, por exemplo, para alguns escoamentos livres, escoamentos com grandes restrições (leis de contorno curvas e escoamentos em redemoinho), escoamentos rotacionais e escoamento completamente desenvolvido em dutos retos.

Neste modelo de turbulência a energia cinética turbulenta (variação na flutuação da velocidade) é representada por κ e sua dimensão é $[L^2T^{-2}]$. ε é a dissipação da energia cinética turbulenta (taxa na qual ocorre a dissipação na flutuação da velocidade) e tem a dimensão $[L^2T^{-3}]$ (ANSYS CFX, 2006).

No modelo k - ε são introduzidas duas novas variáveis no sistema de equações. A equação da continuidade e a equação de momento ficam representadas, respectivamente, pelas Equações (24) e (25).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U})^T + \mathbf{B} \quad (25)$$

sendo: $\mathbf{B}$ = a soma das forças que atuam no corpo,

μ_{eff} = a viscosidade efetiva devida à turbulência

p' = pressão modificada.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \bar{\nabla} \cdot \mathbf{U} \quad (26)$$

O modelo k - ε , um modelo a zero equação, é baseado no conceito de viscosidade turbulenta, no qual $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, sendo μ_t a viscosidade turbulenta. Este modelo supõe que a viscosidade turbulenta é função da energia cinética turbulenta e a dissipação. A equação (27) representa esta relação.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (27)$$

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

κ - energia cinética turbulenta por unidade de massa;

ε - taxa de dissipação turbulenta.

Os parâmetros κ e ε são expressos pelas equações de conservação que se seguem:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (28)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} - (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (29)$$

onde: $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_κ e σ_ε = constantes do modelo de turbulência k-ε [adimensionais]

$C_{\varepsilon 1}$ = varia de 1,44 a 1,55;

$C_{\varepsilon 2}$ = varia de 1,92 a 2,00;

σ_κ = 1,0;

σ_ε = 1,3.

O modelo κ -ε gera uma turbulência isotrópica, sendo impróprio para a simulação de escoamentos circulares complexos, como os que ocorrem em hidrociclones, já que superestima a tensão turbulenta, prevendo de forma errada as velocidades tangencial e axial (ANSYS CFX, 2006).

2.6.2. Modelo SSG

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), o modelo SSG apresenta vantagens e desvantagens, conforme relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2. Vantagens e Desvantagens do Modelo de Turbulência SSG

Vantagens	Desvantagens
Potencialmente um dos mais gerais de todos os modelos de turbulência	Custo computacional alto (sete equações diferenciais parciais extras)
Somente é necessário o fornecimento das condições iniciais e/ou contorno	Não é tão validado quanto o modelo k- ϵ
Cálculos muitos precisos para escoamentos mais complexos, incluindo bocais de saída, canais assimétricos e escoamento em curvas.	Apresenta desempenho mais fraco que o modelo k- ϵ em alguns escoamentos específicos

Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995)

De acordo com Schuenck *et al.* (2006), o modelo dos tensores de Reynolds (SSG) é recomendado para calcular o escoamento em ciclones. Esse modelo é capaz de representar mais adequadamente o fluxo reverso que ocorre no núcleo central, capturando as formas dos redemoinhos presentes devido ao fato de o escoamento ser anisotrópico.

O modelo dos tensores de Reynolds padrão não consegue, traçar corretamente os perfis de velocidade; isso foi observado no escoamento do hidrociclone, devido a altas rotações.

No ANSYS CFX (2006) há três variantes para modelos de tensão de Reynolds (*Reynolds Stress Models*):

- *Reynolds Stress Model* (LRR-IP)
- *QI Reynolds Stress Model* (LRR-IQ)
- *SSG Reynolds Stress Model* (SSG)

Basicamente, estes modelos se diferenciam pelos valores de suas constantes e em geral, o SSG apresenta resultados mais precisos que o LRR, sendo desta forma, o SSG o modelo mais recomendado, existindo os demais por razões históricas e por serem modelos-padrão.

Cada modelo considera o escoamento de forma diferente, o modelo LRR-IP considera isotropia no escoamento, o LRR-QI assume uma “quase-isotropia”, e o SSG considera o escoamento como anisotrópico.

2.7. Planejamento Experimental

Ao contrário do que normalmente se pensa, a estatística não é só análise de dados. Ela é também o planejamento dos experimentos em que esses dados são coletados. Talvez se possa dizer que ela é principalmente planejamento, porque sem um planejamento adequado nunca se sabe se o experimento servirá para alguma coisa, por mais sofisticada que seja a análise que se faça depois. É claro que a estatística não é panacéia. (BRUNS *et al.*, 2001).

A partir de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. Os fatores que têm impulsionado a aplicação industrial do planejamento de experimentos são as ferramentas computacionais de análise estatística e soluções corporativas que cada vez mais facilitam a realização das análises e manutenção e gerenciamento de dados. Neste sentido, a tendência é que tais técnicas tornem-se cada vez mais próximas de aplicações práticas e, portanto, cada vez mais utilizadas. É preciso estar claro também que, em estatística, Planejamento de Experimentos designa toda uma área de estudos que desenvolve técnicas de planejamento e análise de experimentos (AMARAL, 1998).

Planejamento de experimentos, como qualquer outra técnica científica, tem sua própria terminologia, metodologia e objeto de pesquisa. O nome desta técnica por si só indica claramente que se trata de métodos experimentais. Um grande número de experimentos é realizado em pesquisas, otimização e desenvolvimento de sistemas. Essas pesquisas são feitas em laboratórios, plantas piloto, plantas em escala real, lotes agrícolas, clínicas etc. Um experimento pode ser físico, psicológico ou baseado em modelo. Pode ser executado diretamente no sistema real ou em seu modelo (LAZIC, 2004 *apud* SOUZA, 2007).

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

Otimizar o sistema significa descobrir os valores dos fatores que produzem uma melhor resposta. Para este procedimento, o correto é fazer variar, ao contrário do que se poderia esperar, todas as variáveis ao mesmo tempo. A razão para isso é que as variáveis podem se influenciar mutuamente, e o valor ideal para uma delas pode depender do valor da outra. Este comportamento, interação entre as variáveis, é um fenômeno que ocorre com muita freqüência. Raras são as situações em que duas variáveis atuam de forma independente.

Durante o processo de experimentação, deve ser feito um plano estratégico para coordenar as atividades do procedimento dos experimentos que serão realizados, com o objetivo de definir claramente cada passo do processo experimental. Galdámez (2002, apud SOUZA, 2007) estabelece a seqüência das atividades necessárias para o processo de experimentação, enumerados a seguir.

1. Definição dos objetivos do experimento
2. Estudo dos parâmetros do experimento
3. Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta
4. Seleção da matriz experimental
5. Realização do experimento
6. Análise de dados
7. Interpretação dos resultados
8. Elaboração de relatórios.

Usando planejamento de experimentos, os engenheiros podem determinar quais conjuntos de variáveis de processo têm maior influência no desempenho do processo.

Os resultados de tais experimentos podem levar a melhorar o rendimento do processo, reduzir as variações no processo e aproximar o valor previsto ao valor nominal, reduzir o tempo de desenvolvimento e planejamento e reduzir o custo de operação (MONTGOMERY e RUNGER, 2003 apud SOUZA, 2007).

2.7.1 Análise por Superfície de Resposta

Este método é classificado como um método simultâneo, sendo utilizado na etapa de otimização baseada em planejamentos fatoriais que foi introduzida por G. E. P. Box nos anos cinquenta, e que desde então tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais. Sua aplicação permite selecionar a combinação de níveis ótimos na obtenção da melhor resposta para uma dada situação.

No método da análise de Superfície de Resposta (ou RSM, de *Response Surface Methodology*) são realizados planejamentos fatoriais, cujos resultados são ajustados modelos matemáticos. Estas etapas, conhecidas como etapas de deslocamento e modelamento, respectivamente, são repetidas várias vezes, mapeando as superfícies de respostas obtidas na direção da região do ponto de ótimo desejado. A modelagem normalmente é feita ajustando-se os modelos mais simples, como o linear e o quadrático. Por sua vez, o planejamento fatorial executado geralmente constitui-se de um número pequeno e pré-determinado de experimentos. Outro detalhe importante é o uso das variáveis em sua forma escalonada, de forma que suas grandezas não interfiram no desenvolvimento do processo de otimização. Os cuidados na realização dos experimentos e de suas replicatas devem ser observados (EIRAS *et al.*, 2000).

O planejamento experimental se apresenta como uma coleção de técnicas matemática e estatística usada para a modelagem e análise de problemas em que uma resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é otimizar esta resposta. Por exemplo, suponha que um engenheiro químico queira encontrar os níveis de temperatura (x_1) e pressão (x_2) que maximizam o rendimento de um processo. O rendimento de um processo é uma função (Equação 30) dos níveis de temperatura e pressão.

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (30)$$

onde ε representa o ruído ou erro observado na resposta y .

Representando-se a resposta esperada (E) por:

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (31)$$

então a superfície representada pela Equação (31) é chamada de Superfície de Resposta (MONTGOMERY, 2005).

As principais vantagens deste método incluem: (1) um entendimento de como as variáveis do processo (Fatores) afetam a variável em estudo (Resposta); (2) a determinação de alguma possível interação entre os Fatores; e (3) a caracterização do efeito combinado de todos os fatores sobre a Resposta (DOMINGOS *et al.*, 2007).

2.8. Fluidodinâmica Computacional

Fluidodinâmica Computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), é uma ferramenta computacional para simulação do comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. CFD trabalha resolvendo as equações de escoamento do fluido sobre uma região de interesse, com condições iniciais e de contorno conhecidas.

Computadores vêm sendo utilizados para resolver problemas de escoamento de fluidos há muitos anos. Inúmeros aplicativos têm sido escritos para resolver tanto problemas específicos quanto classes específicas de problemas. Desde meados dos anos 70, a complexa matemática requerida para generalizar os algoritmos tem sido compreendida, e propostas de soluções gerais baseadas em CFD foram desenvolvidas. Estas soluções começaram a aparecer no início dos anos 80 e exigiram o uso de computadores muito potentes, bem como o profundo conhecimento da fluidodinâmica, e dos grandes intervalos de tempo requeridos para as simulações. Conseqüentemente, CFD àquela época foi uma ferramenta utilizada quase exclusivamente na pesquisa.

Recentes avanços do poder computacional, junto com a maior interatividade dos gráficos e da manipulação 3D dos modelos têm feito os processos de criação dos modelos para CFD e da análise de seus resultados se tornarem muito menos trabalhosos e, conseqüentemente, menos onerosos.

O conjunto de equações que descreve os processos de momento, transferência de calor e massa é conhecido como as equações de Navier-Stokes. Estas equações diferenciais parciais foram descritas no início do século XIX e não possuem soluções gerais analíticas, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

Equações que descrevem outros processos podem também ser resolvidas em conjunto com as equações de Navier-Stokes. Modelos aproximados são freqüentemente utilizados para derivar essas equações adicionais, modelos de turbulência são particularmente um exemplo importante (ANSYS CFX 11, 2006).

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

A Fluidodinâmica Computacional tem versatilidade para prever baixos perfis de velocidade numa extensa faixa de condições operacionais e de projeto. O tratamento numérico das equações de Navier-Stokes é o eixo central de qualquer técnica de CFD, desde os anos de 1980 vêm evoluindo aos poucos, como consequência da rápida evolução dos computadores e a melhor compreensão do tratamento numérico da turbulência (NARASIMHA *et al.*, 2005).

Os métodos CFD têm sido usados previamente com o objetivo de identificar projetos promissores para outros hidrociclones (PETTY e PARKS, 2004).

Os métodos de simulação para hidrociclones são baseados em dados experimentais, modelos teóricos ou uma combinação dos dois. Esses modelos são formados por um conjunto de equações de projeto, que têm suas limitações próprias para cada sistema específico no desenvolvimento do modelo usual. Chu *et al.* (2002) investigaram qual a melhor equação de

projeto de hidrociclone existente trabalhando com processos industriais para diferentes geometrias de hidrociclone, parâmetros operacionais e propriedades dos materiais. Encontraram-se algumas equações de trabalho boas para certos sistemas, que apresentam falhas em alguns para dar bons resultados para outros. Nenhuma das equações de projeto estudadas foi capaz de fazer uma predição razoável para todos os sistemas. Eles concluíram que alguns dados experimentais são necessários para escolher a equação correta para uso.

No início, é possível escolher uma combinação de equações de projeto e parâmetros para ajustar um conjunto específico de dados do hidrociclone. Entretanto, o desafio é que essas equações normalmente não podem ser aplicadas para todos os sistemas de hidrociclones (KRAIPECH *et al.*, 2006).

De acordo com Delfos *et al.* (2004), durante as últimas décadas, modelos CFD cada vez mais sofisticados têm sido usados na tentativa de se alcançar um melhor entendimento do escoamento do fluido e o fenômeno de separação que ocorre com um hidrociclone. Os modelos de turbulência usados na simulação mostram os avanços dos mesmos acompanhados da força computacional da época. O primeiro modelo usado foi o de comprimento de mistura. Prandtl (1925) desenvolveu a expressão para transferência de momento num fluido turbulento, na qual a tensão turbulenta é função do gradiente de velocidade e a constante de proporcionalidade é o comprimento de mistura, sendo similar ao livre percurso médio na teoria cinética (PRANDTL, 1925 *apud* BIRD *et al.*, 2004). Este foi seguido pelo modelo de viscosidade turbulenta. O aumento da capacidade computacional tem aumentado o uso do modelo de tensão de Reynolds, e recentemente tem sido adotado o modelo LES (*Large Eddy Simulation*). No entanto, este último modelo ainda exige um recurso computacional grande e não garante que os resultados concordem com o experimento.

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

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

e) Estocar os resultados para todas as variáveis de interesse.

A aplicação de algoritmos de fluidodinâmica computacional tem auxiliado na etapa de projeto do hidrociclone, apesar de algumas dificuldades técnicas continuarem existindo. Com os modelos computacionais atuais, é possível considerar as várias condições de operação e a configuração do hidrociclone. A combinação de diferentes técnicas pode possibilitar a obtenção de um hidrociclone ótimo a ser construído para uma aplicação específica (DOBY *et al.*, 2006).

2.8.1. CFX

Existe uma série de diferentes métodos que são utilizados nos códigos de CFD. Aquele no qual o ANSYS CFX se baseia é conhecido como método dos volumes finitos. Neste método, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas de elementos. As equações são discretizadas e resolvidas numericamente em cada elemento. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos de todo o domínio podem ser obtidos. Deste modo, pode-se obter uma imagem completa do comportamento do escoamento (ANSYS, 2006).

O CFX é uma ferramenta de CFD integrado, no qual é possível construir a geometria, fazer a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar os resultados posteriormente, sendo utilizado para a simulação de diversos tipos de escoamento.

Como se trata de um aplicativo comercial, ele é, de certa forma, inflexível, apresentando, entretanto, uma boa interface ferramenta-usuário, sendo que o usuário tem a possibilidade de incluir sub-rotinas computacionais escritas em linguagem FORTRAN e, além disto, apresenta a flexibilidade da inclusão de equações para o cálculo de certas variáveis.

O pacote computacional ANSYS CFX é composto basicamente de cinco programas que são:

- ✦ Geometria – *Design Modeler* - para a construção das geometrias e definição do domínio no qual as equações de transferência de fluidos são resolvidas e obtidas as soluções, como mostrado na Figura 10;

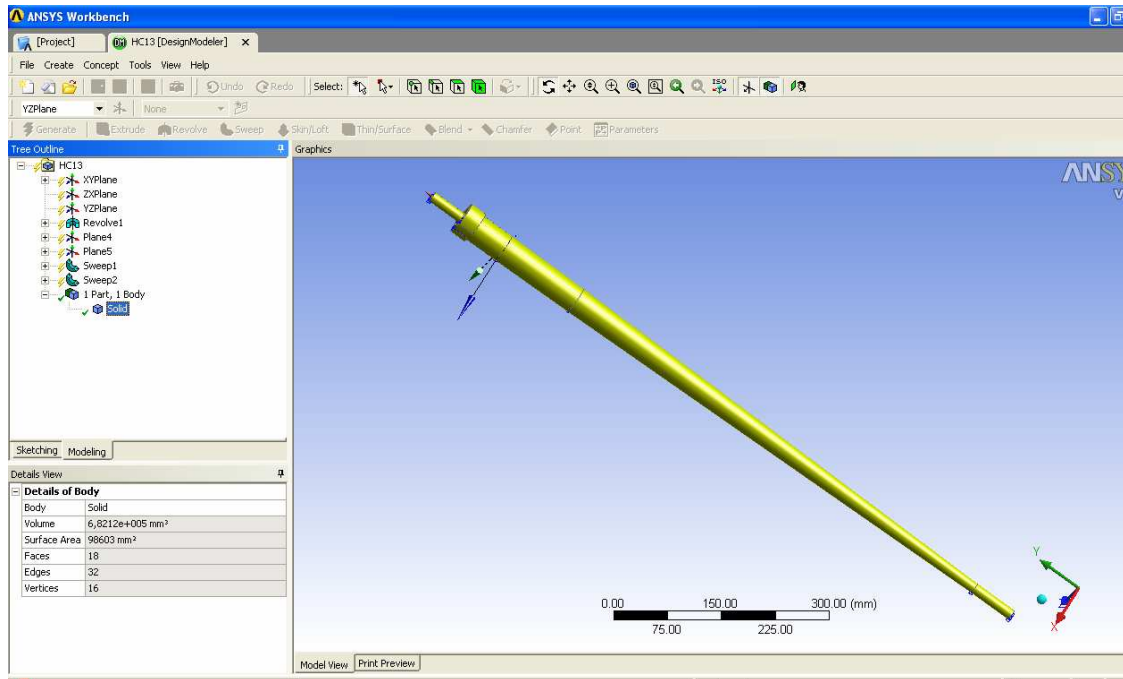


Figura 10 – Tela do *Design Modeler*.

- ✦ Malhador – *Meshing App* - para a geração dos volumes finitos ou elementos da malha numérica, podem ser criadas diferentes secções, o objetivo é encontrar o melhor resultado com o menor número de elementos, de acordo com a Figura 11;

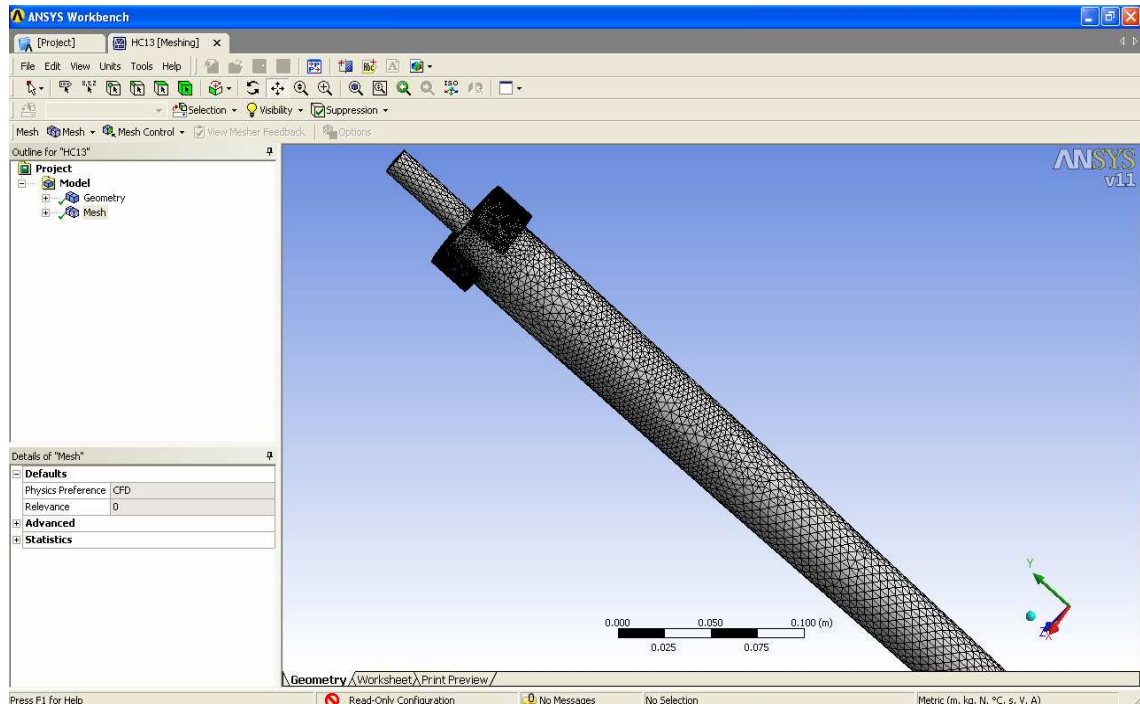


Figura 11 – Tela do CFX Meshing App.

- ✚ Modelagem – CFX-Pre - para a definição do modelo físico, propriedades dos materiais ou condições de contorno; ou seja, o ajuste dos parâmetros de simulação, como mostra a Figura12;

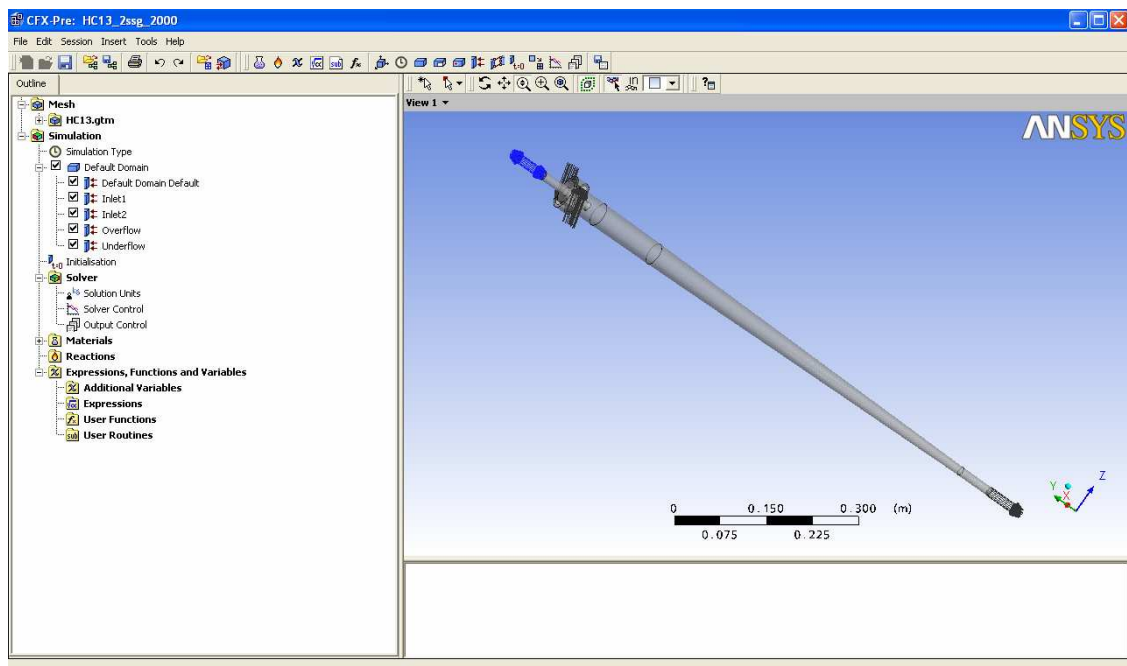


Figura 12 - Tela do CFX-Pre.

- ✚ Solução - CFX-Solver - para a resolução das equações e obtenção dos resultados, que podem ser obtidos utilizando um ou vários processadores (isto é, pode ser utilizado em cluster) que irão gerar um arquivo solução do problema, exemplificado na Figura 13;

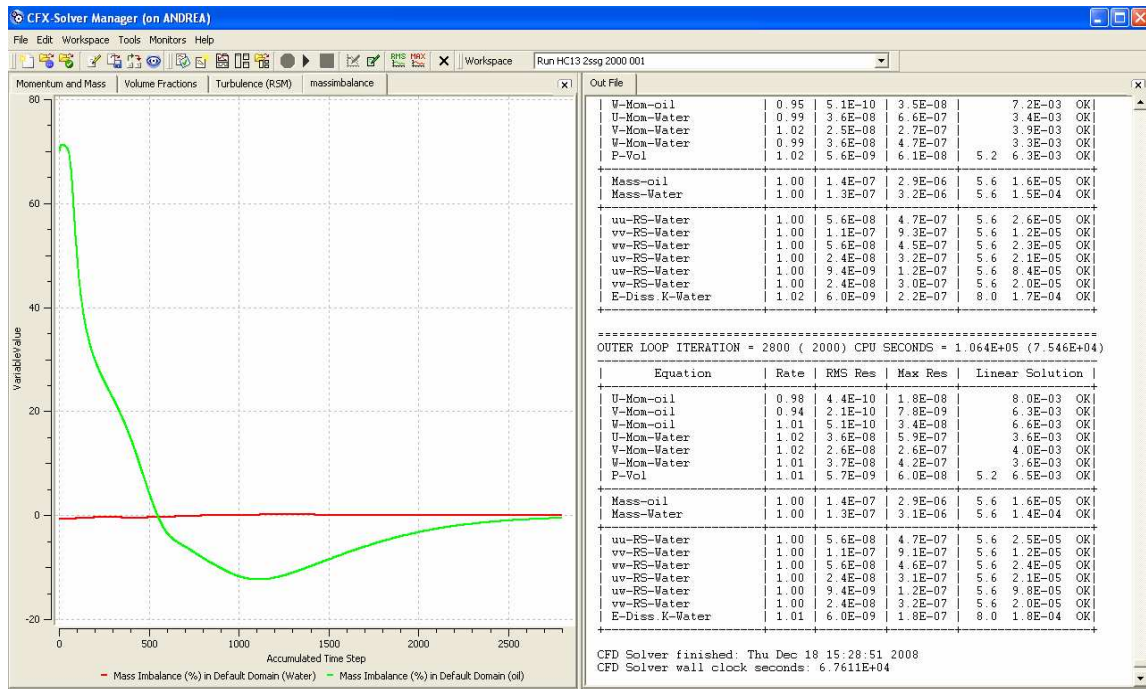


Figura 13 - Tela do CFX-Solver.

- ✚ Análise dos resultados - CFX-Post - para a análise dos resultados, que processa e apresenta os dados graficamente, podendo o usuário, criar diferentes tipos de figuras e gráficos para melhor análise dos resultados, conforme Figura 14.

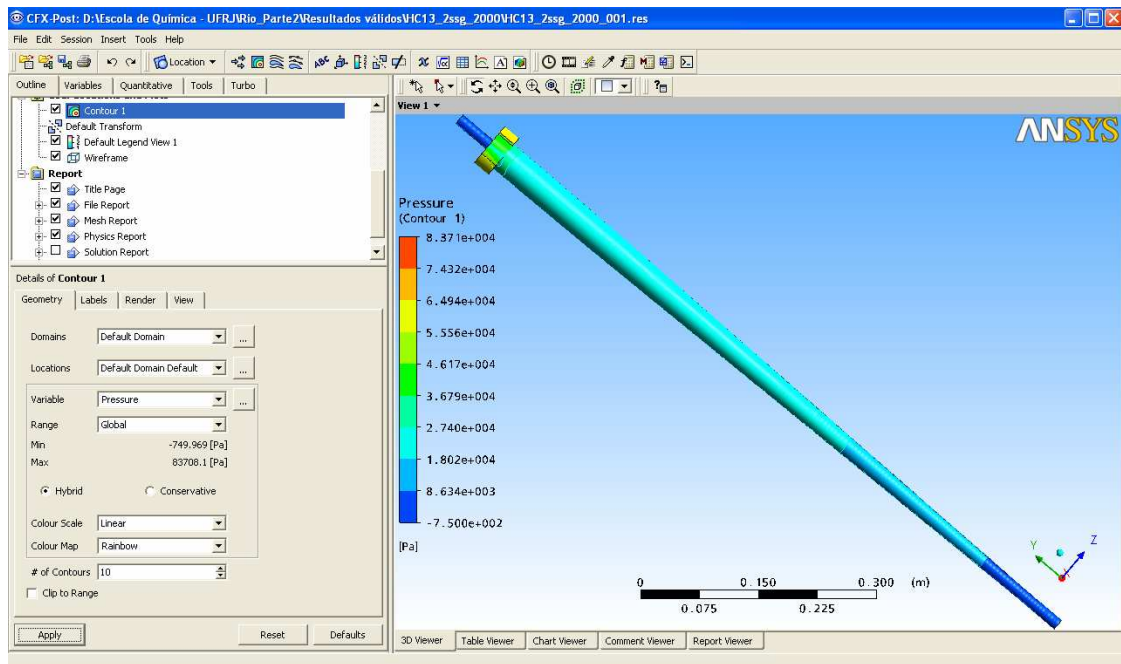


Figura 14 - Tela do CFX-Post.

III. METODOLOGIA

3.1. Software e Hardware

O pacote computacional comercial ANSYS CFX, versão 11.0, foi utilizado para a execução das simulações em um computador com configuração básica de processador de Pentium core 2 duo de 2,66 GHz da Intel e memória RAM de 2,0 Gb.

Realizou-se um planejamento experimental com o objetivo de analisar a influência da geometria na eficiência de separação do hidrociclone. Para tal, foi utilizado o Essential Regression (STEPPAN *et al.*, 1998), que é executado no Excel e emprega o *Visual Basic for Applications* (VBA).

3.2. Dados do Hidrociclone

O hidrociclone objeto de estudo deste trabalho foi projetado para o tratamento de águas oleosas. Ele apresenta dois diferentes ângulos de cone e o diâmetro do tubo superior (*overflow*) é menor que o diâmetro do orifício inferior (*underflow*), o que é uma característica de hidrociclones aplicados na separação líquido-líquido, como se pode conferir da Figura 15. O óleo, por ter menor densidade, será coletado preferencialmente no *overflow* e a água, que é mais densa, será recolhida preferencialmente no *underflow*.

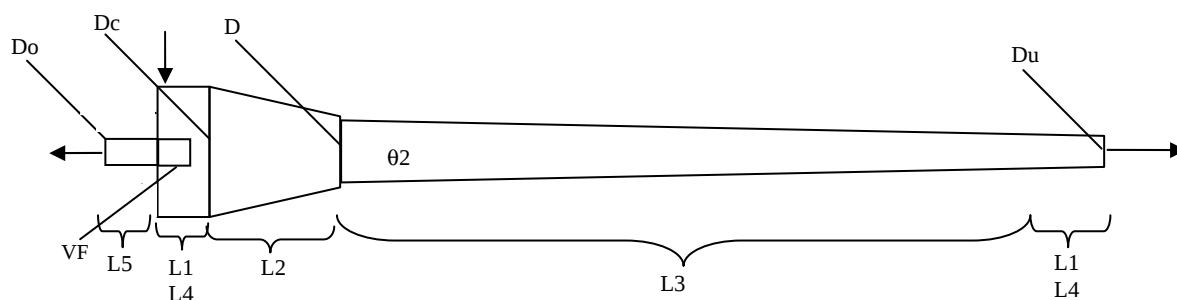


Figura 15 - Hidrociclone estudado.

O hidrociclone tomado como base para o estudo da influência da geometria foi o empregado por Marins (2007). Seis variáveis geométricas foram escolhidas, com suas faixas de estudo, de acordo com um planejamento experimental (neste trabalho, as diferentes simulações numéricas foram consideradas como experimentos computacionais). Estas variáveis foram escolhidas com base naquelas que mais devem influenciar a eficiência de separação, de acordo com Matta e Medronho (2000). Variou-se, então, o diâmetro nominal do hidrociclone (D_c), o diâmetro do *overflow* (D_o), o diâmetro do *underflow* (D_u), a altura do duto de alimentação (H_c), o comprimento do *vortex finder* (VF), a altura da parte cilíndrica (L1). As faixas em estudo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Faixas de utilização das variáveis geométricas¹ selecionadas

Parâmetro	Faixa (mm)
D_c	40,44 – 70,00
D_o	5 – 15
D_u	15,1 – 26,3
H_c	23,4 – 47,6
VF	4,4 – 47,6
L1	47,6 – 72,4

Optou-se por não considerar o *vortex finder* nulo, com o objetivo de comprovar se a presença deste influencia na eficiência no caso de uma separação líquido-líquido.

Escolheu-se a entrada em voluta em virtude desta inibir trajetórias parasitas, provocando um aumento da eficiência.

O hidrociclone em estudo apresenta duas entradas em voluta por onde a dispersão é alimentada, diametralmente oposta apresentando um eixo normal ao do equipamento, e que é posicionado tangencialmente à parede lateral do cilindro. Com forma retangular, sendo a base (horizontal) chamada de B_c (constante) e a altura (vertical) denominada H_c (variável).

¹ Verificar Apêndice A – Valores utilizados no Planejamento Experimental, com definição dos níveis inferior, central e superior (-1, 0, 1), respectivamente.

As variáveis geométricas mantidas constantes são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Variáveis geométricas mantidas constantes do hidrociclone.

Parâmetro	Valor (mm)
Bc	5,00
D	38,28
espessura VF	0,50
L2	124,00
L3	686,40
L4	63,60
L5	50,00

L4 é o comprimento de tubo reto existente ao final de L3 e L5 é o comprimento do tubo de *overflow* que se projeta para fora no topo do hidrociclone.

3.3. Planejamento Fatorial

O aplicativo *Essential Regression* foi empregado para se fazer um planejamento fatorial com 6 fatores e 3 pontos centrais, alimentado com as faixas da Tabela 3, tendo como parâmetros geométricos constantes os valores da Tabela 4, gerando 19 geometrias conforme mostrado na Tabela 5, sendo que três destas são repetições no ponto central. A Figura 16 mostra a geometria correspondente ao ponto central (experimentos 5, 14 e 16): HC5, HC14, HC16, em destaque na tabela a seguir.

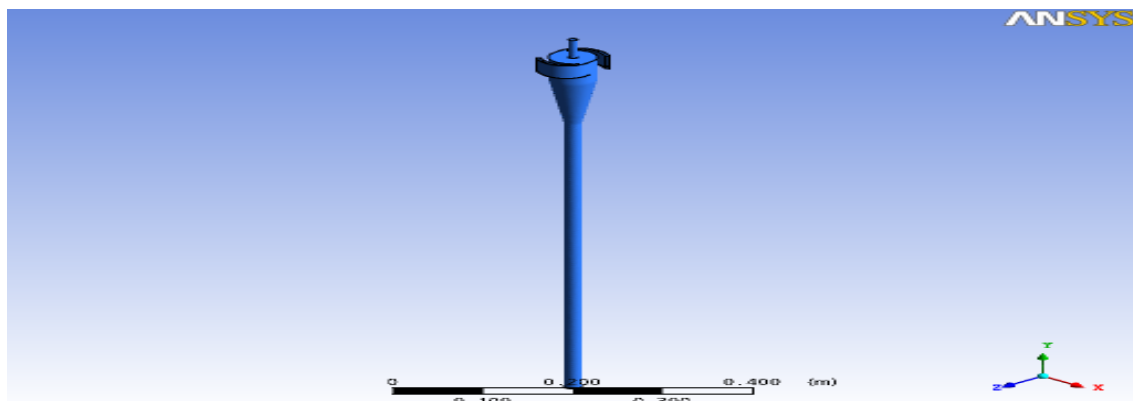


Figura 16. Geometria do ponto central

Tabela 5 – Geometrias obtidas com o *Essential Regression*

Experimento	D _c (mm)	D _o (mm)	D _u (mm)	H _c (mm)	VF (mm)	L1 (mm)
1	40,44	5,00	15,10	47,60	4,40	72,40
2	40,44	15,00	26,30	23,40	4,40	47,60
3	70,00	15,00	26,30	47,60	47,60	72,40
4	40,44	15,00	15,10	47,60	47,60	47,60
5	55,22	10,00	20,70	35,50	26,00	60,00
6	40,44	5,00	26,30	23,40	47,60	72,40
7	70,00	5,00	26,30	47,60	4,40	47,60
8	70,00	15,00	15,10	23,40	4,40	72,40
9	70,00	5,00	26,30	23,40	4,40	72,40
10	70,00	15,00	26,30	23,40	47,60	47,60
11	70,00	15,00	15,10	47,60	4,40	47,60
12	0,00	5,00	15,10	47,60	47,60	72,40
13	40,44	15,00	15,10	23,40	47,60	72,40
14	55,22	10,00	20,70	35,50	26,00	60,00
15	70,00	5,00	15,10	23,40	47,60	47,60
16	55,22	10,00	20,70	35,50	26,00	60,00
17	40,44	15,00	26,30	47,60	4,40	72,40
18	40,44	5,00	15,10	23,40	4,40	47,60
19	40,44	5,00	26,30	47,60	47,60	47,60

3.4. Teste de Malha

Realizou-se um teste de malha com a geometria do experimento 1, a fim de se garantir que a malha não estava influenciando os resultados e que, por outro lado, não aumentasse desnecessariamente o esforço computacional. A Figura 17 apresenta o desenho demonstrativo do refino da malha 1 na parte cilíndrica (a) e no *underflow* (b) do hidrociclone. As Figuras 18 e 19 representam respectivamente o refino das malha 2 e 3. Neste teste, optou-se por realizar simulações monofásicas, utilizando água a 25°C como fluido, para reduzir o tempo de processamento. Dados estatísticos das malhas refinadas geradas no simulador são apresentados na Tabela 6.

A obtenção do refino das malhas foi devida à utilização de recursos como *inflation boundary*, que refina a malha próximo às paredes e *line control* que, adicionado no eixo central do hidrociclone, aumenta o número de elementos neste local.

Tabela 6 – Estatística das malhas.

Malha	Volumes de controle	Tetraedro	Pirâmide	Prisma	Nº total de elementos
1	82833	242549	360	71120	314029
2	121804	443809	1142	72332	517283
3	154873	633544	1144	72338	707026

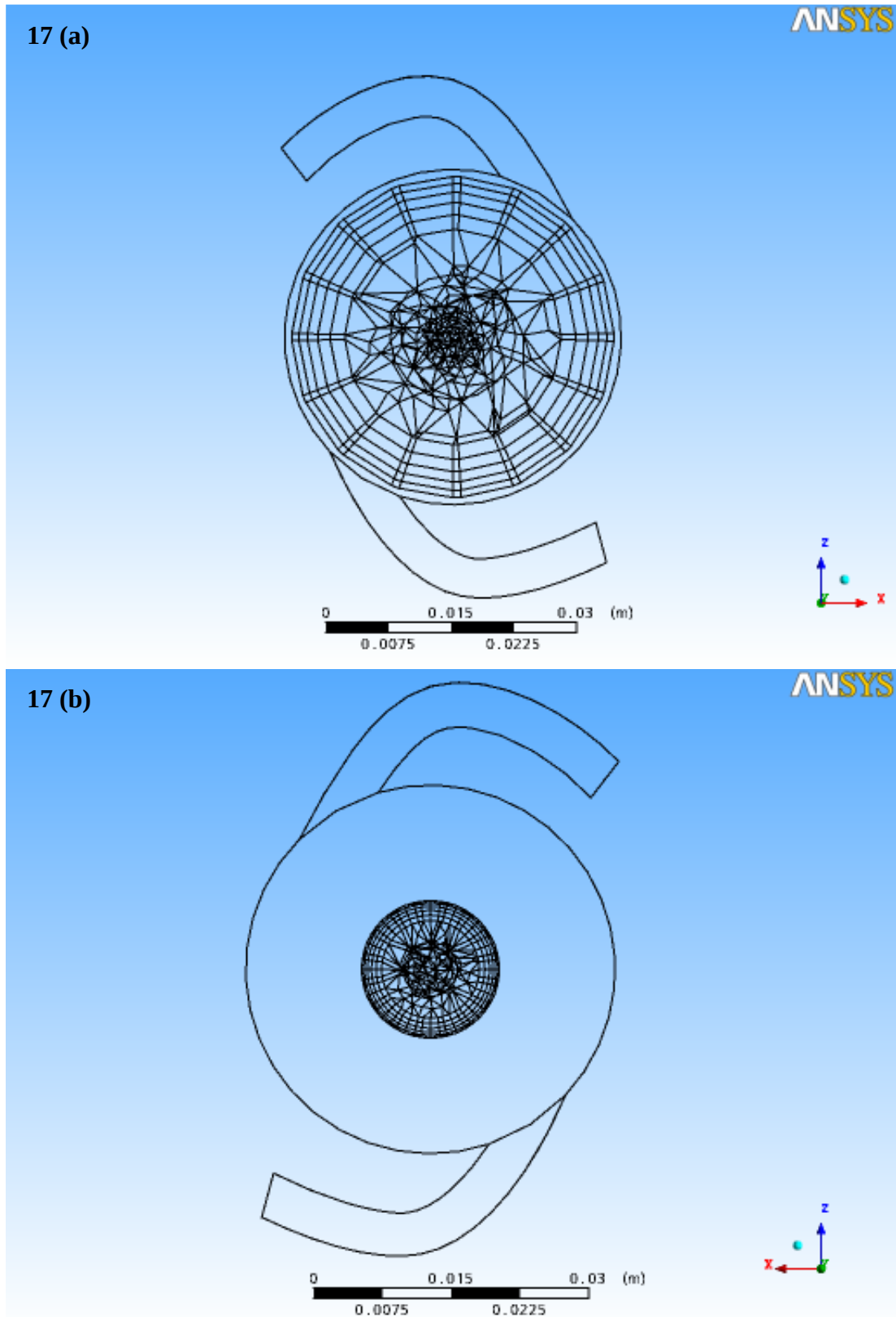
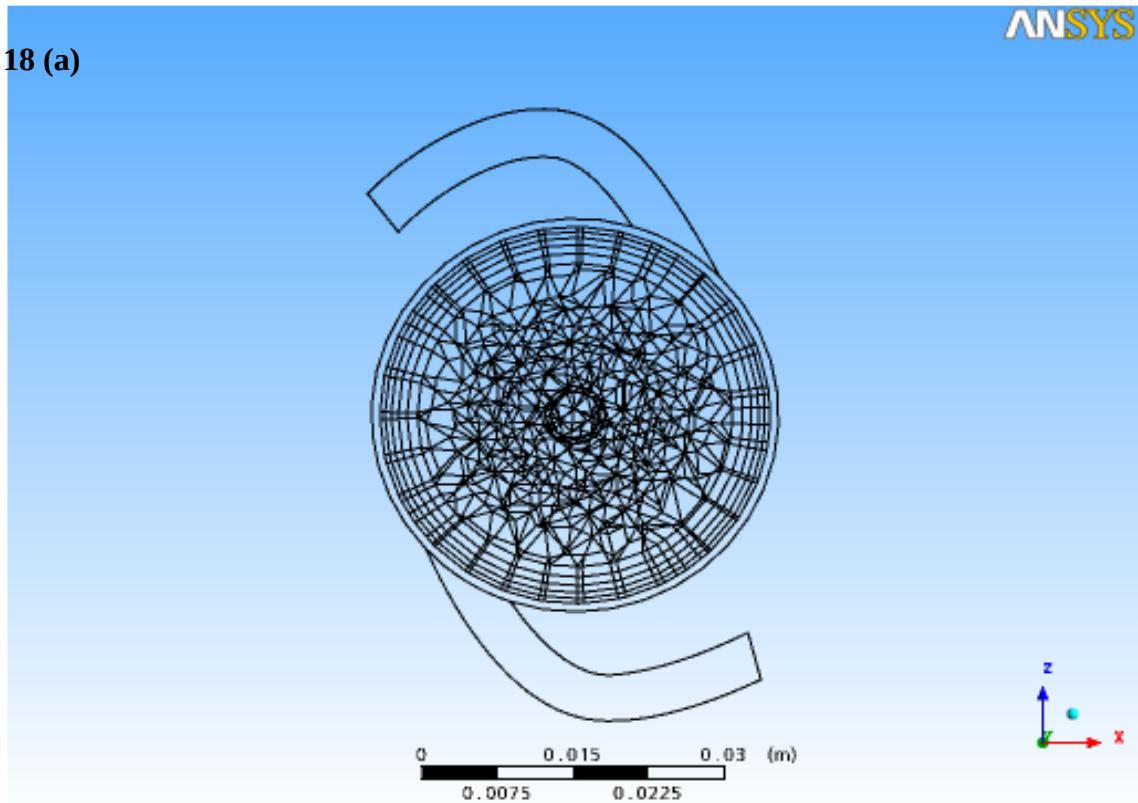
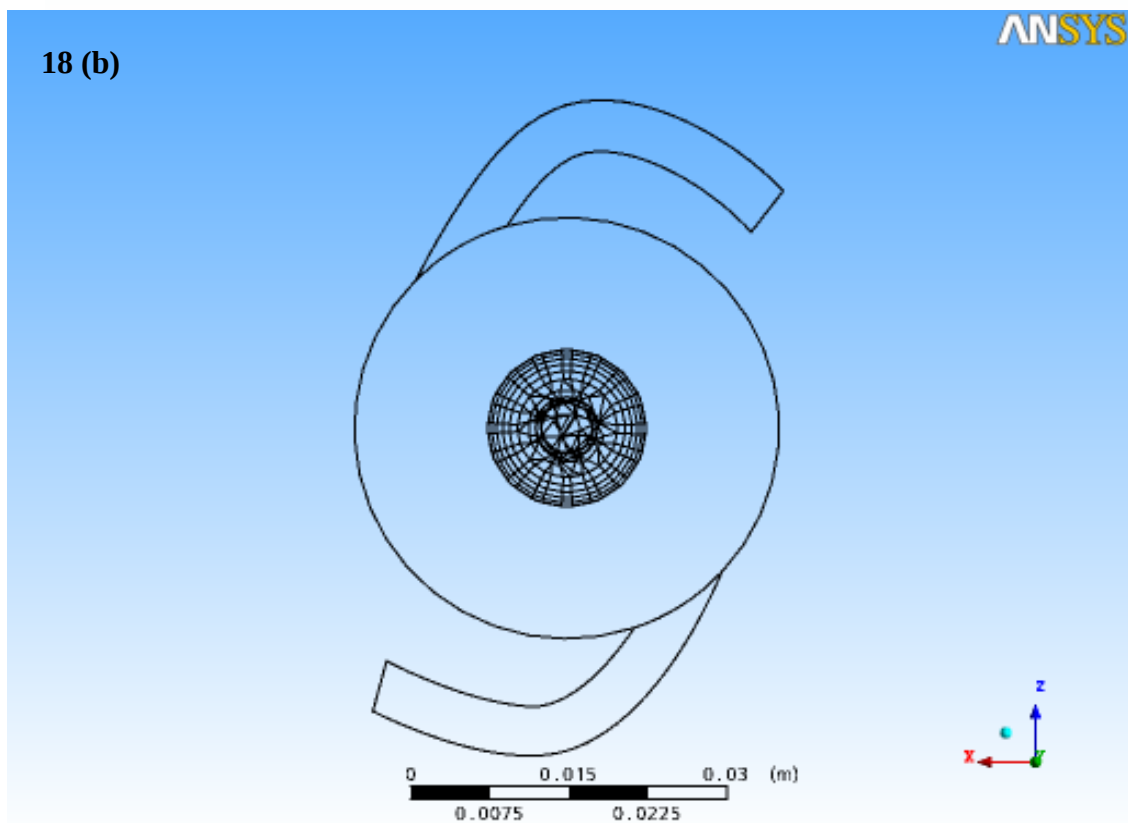


Figura 17 – Desenho demonstrativo do refino da malha 1 na parte cilíndrica (a) e no *underflow* (b) do hidrociclone.

18 (a)



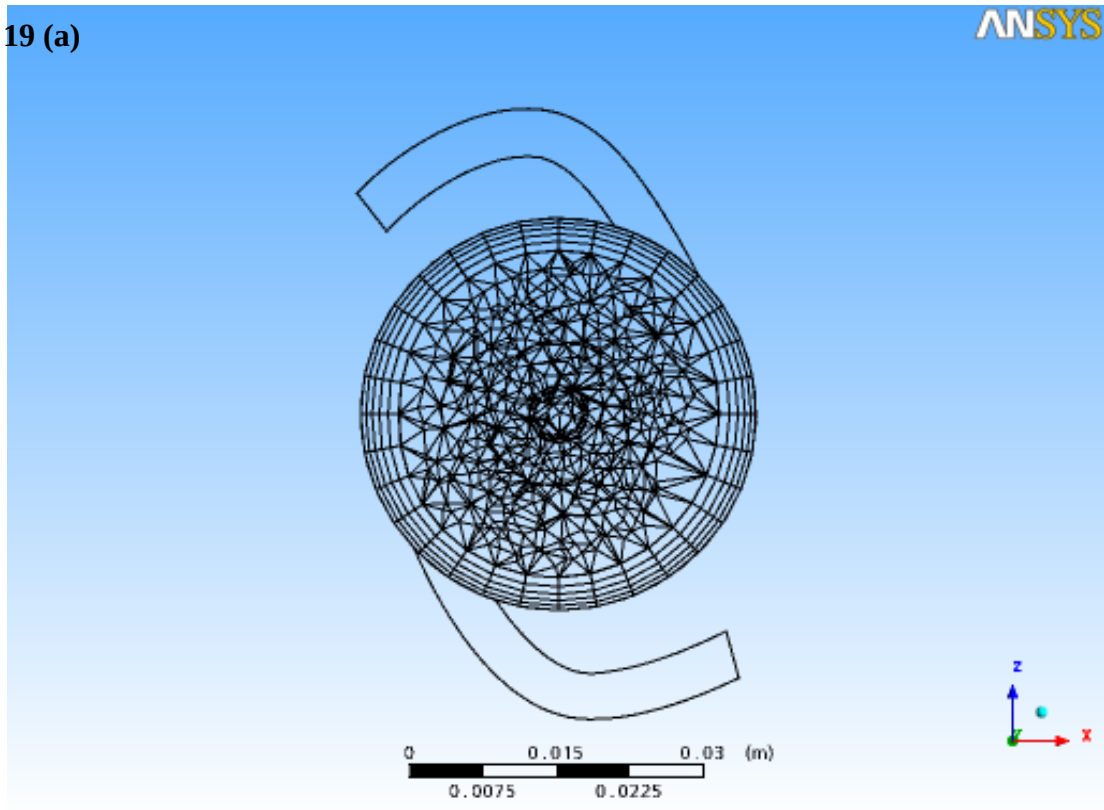
18 (b)



Figura

18 - Desenho demonstrativo do refino da malha 2 na parte cilíndrica (a) e no *underflow* (b) do hidrociclone.

19 (a)



19 (b)

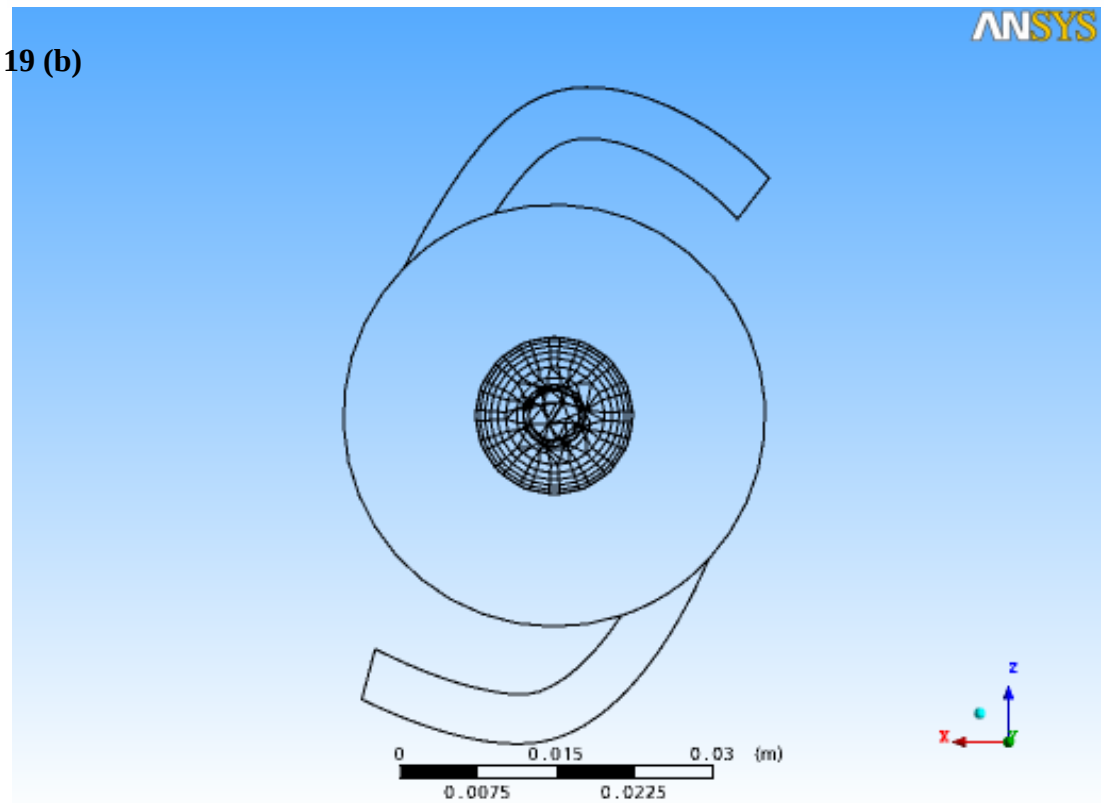


Figura 19 – Desenho demonstrativo do refino da malha 3 na parte cilíndrica (a) e no *underflow* (b) do hidrociclone.

Para analisar a melhor malha, foi observado o perfil de velocidade tangencial, já que essa velocidade determina o campo centrífugo no interior do hidrociclone, ou seja, o poder de separação do equipamento.

Pode-se observar, no Gráfico da velocidade tangencial em função do raio do hidrociclone, para as diferentes malhas testadas (Figura 20), que as curvas dos testes 2 e 3 estão bem próximas, quase coincidentes. Optou-se, então, pela malha 2 em virtude de a mesma apresentar um menor número de elementos.

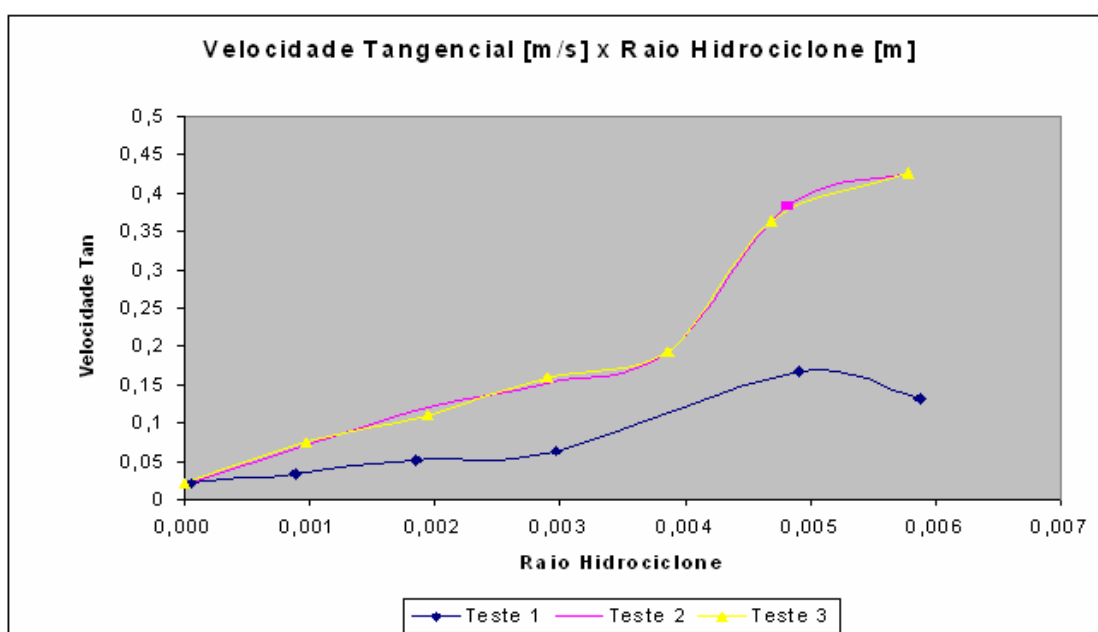


Figura 20 – Gráfico da velocidade tangencial em função do raio do hidrociclone.

3.5. Simulações Numéricas

As 19 geometrias² foram construídas com base no planejamento experimental (Tabela 5) e as malhas foram traçadas de acordo com as especificações do Teste de malha 2.

Os resultados estatísticos das malhas dos experimentos mostrados na Tabela 7 apresentam uma faixa do número total de elementos de 318257 a 1123260. Os experimentos

² Verificar no Apêndice B – Geometrias relativas aos experimentos realizados.

3, 7, 11 e 12 forneceram os maiores números de elementos, em torno de um milhão, o que se deve aos máximos valores de diâmetro nominal (D_c) e de altura da entrada (H_c), como mostrado em destaque na Tabela 7.

Na Tabela 8 podem ser encontradas as condições de contorno e as propriedades físicas dos fluidos empregados, assim como as demais condições empregadas nas simulações.

As regiões foram definidas como: *inlet1*, *tubo_inlet1*, *inlet2*, *tubo_inlet2*, *overflow*, *tubo_overflow*, *underflow* e regiões de parede. As condições de contorno para as entradas foram *inlet*, para o *underflow* foi *opening* e o *overflow outlet* exceto para os experimentos HC2, HC6, HC17, HC19 que foi *opening*.

No ANSYS CFX, na condição *opening* o escoamento se encontra livre para entrar ou sair do equipamento. Na condição de escoamento *inlet*, só ocorre entrada de fluido e *outlet* só saída. As condições de contorno para o *overflow* e para o *underflow* foi pressão manométrica igual a zero.

O principal critério adotado para considerar que a simulação tinha convergido foi a obtenção de um erro no fechamento do Balanço de Massa de água e óleo³ inferior a 0,5%.

³ Verificar Apêndice C - Resultados dos Balanços de Massa de Óleo e Água (%).

Tabela 7 – Resultados estatísticos das malhas dos experimentos

Experimento	Volumes controle	Tetraedro	Pirâmide	Prisma	Nº total de elementos
HC1	121780	443757	1142	72312	517211
HC2	83619	246866	697	67694	318257
HC3	230295	932679	1306	105522	1039507
HC4	147678	559545	1482	80668	641695
HC5	139596	541981	1029	68333	611343
HC6	90282	268593	689	73581	342863
HC7	245023	1015208	1414	106638	1123260
HC8	24993	432012	729	81145	513886
HC9	123286	413569	682	84138	498389
HC10	119684	401407	768	80870	483045
HC11	231329	934044	1388	106498	1041930
HC12	223507	888945	1259	107111	996865
HC13	93853	282955	794	73776	357525
HC14	139596	541981	1029	68333	611343
HC15	113331	372489	671	78617	451777
HC16	139596	541981	1029	68333	611343
HC17	156381	85540	1213	89215	675968
HC18	86582	265418	648	66992	333058
HC19	138758	502491	1297	86019	589807

Tabela 8 - Condições de contorno, propriedades físicas e demais condições empregadas nas simulações.

Parâmetro	Valor
Vazão Volumétrica	$6,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} = 1806 \text{ cm}^3.\text{s}^{-1}$
Fase Água	Fluido contínuo
Fração molar inicial da água	0,99
Densidade da água	997 kg.m^{-3}
Massa Molar da água	$18,02 \text{ kg.kmol}^{-1}$
Fase Óleo	Fluido Disperso
Diâmetro da gota de óleo	$250 \text{ }\mu\text{m}$
Fração molar inicial do óleo	0,01
Densidade do óleo	840 kg.m^{-3}
Massa Molar do óleo	1 kg.kmol^{-1}
Viscosidade do óleo	13,2 cP
Modelo de Turbulência inicial	k-ε
Modelo de Turbulência secundário	SSG
Modelo Matemático	Euleriano
<i>Advection Scheme</i>	<i>Upwind</i>
Critério de Convergência final	10^{-8} (RMS)

3.6. Modelos de Turbulência

Em todos os 19 experimentos computacionais, as simulações foram iniciadas com o modelo k- ϵ . Estes resultados eram, então, utilizados como valores iniciais para as simulações com o modelo SSG, pois este último é o que melhor representa o escoamento no hidrociclone.

O núcleo de ar foi desconsiderado, para facilitar a simulação e diminuir o tempo de computação, já que os sistemas bifásicos (água/óleo) são mais simples de modelar que os trifásicos (água/óleo/ar).

No estudo de Romero e Sampaio (1999), o modelo k- ϵ foi escolhido como modelo computacional devido à dificuldade de se obter a solução analítica das Equações de Navier-Stokes.

IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

As 19 simulações numéricas forneceram as vazões mássicas de óleo e água no *overflow* e na alimentação. Com base nestas vazões, foram calculadas as eficiências granulométricas, as razões de fluido e as eficiências granulométricas reduzidas, segundo as equações (7), (8) e (9), respectivamente. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos de eficiência granulométrica (G), razão de fluido (R_f) e eficiência granulométrica reduzida (G') obtidas a partir das simulações numéricas, para uma vazão de alimentação de $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ contendo 1% de óleo e considerando-se que as gotas de óleo têm um diâmetro de $250 \mu\text{m}$.

. As eficiências granulométricas reduzidas ficaram bem distribuídas na faixa 0-96%, o que mostra que a escolha do tamanho de gota testado ($250 \mu\text{m}$) foi adequado.

A maior eficiência granulométrica reduzida (96,2%) foi obtida para o experimento de número 13. Esta geometria (Figura 21) é a que tem os menores D_c e D_u e o maior D_o . Estas observações estão de acordo com a literatura, pois sabe-se que quanto menor o diâmetro do hidrociclone, maior é a eficiência (CASTILHO e MEDRONHO, 2000; COELHO e MEDRONHO, 2001). Da mesma forma, para a recuperação de óleos em águas oleosas, quanto maior for o diâmetro do *overflow* ou quanto menor for o diâmetro do *underflow*, maiores serão as eficiências de recuperação de óleo.

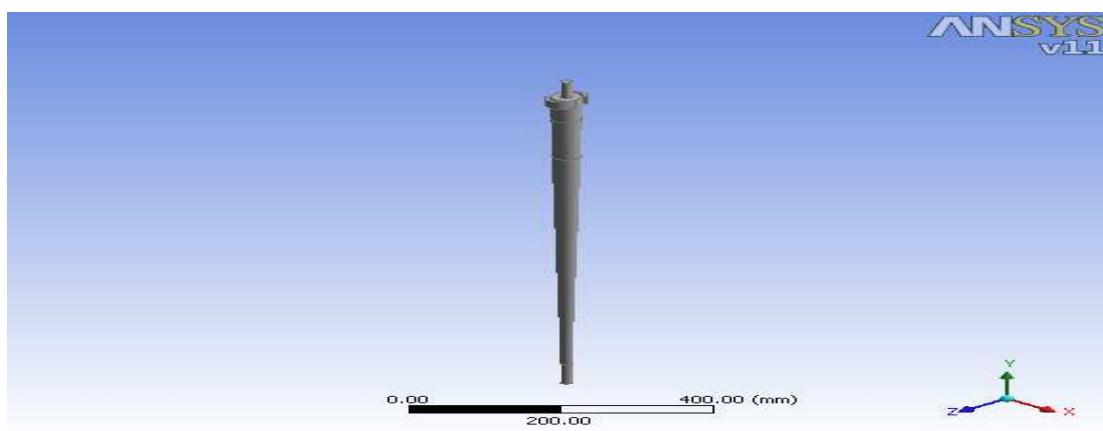


Figura 21 – Geometria 13.

Tabela 9 – Eficiência granulométrica total (G)⁴, razão de fluido (R_f)⁵ e eficiência granulométrica reduzida (G')⁶ obtidas a partir das simulações numéricas

Experimentos	G (%)	R_f (%)	G' (%)
1	15,953	6,196	10,401
2	0,000	0,000	0,000
3	28,921	11,252	19,910
4	69,874	35,152	53,544
5	33,728	13,146	23,697
6	0,000	0,000	0,000
7	4,798	1,104	3,735
8	90,107	39,851	83,553
9	8,629	0,739	7,949
10	15,043	2,996	12,422
11	73,107	39,914	55,241
12	17,333	5,807	12,236
13	97,588	37,376	96,149
14	33,721	13,146	23,689
15	24,582	5,654	20,062
16	33,720	13,146	23,688
17	0,000	0,000	0,000
18	28,331	4,900	24,638
19	0,000	0,000	0,000

Analisando a Tabela 9 pode-se concluir que a geometria 13 foi a que produziu a maior eficiência de separação do óleo (97,6%). Ao se alimentar, neste hidrociclone, 6,5 m³/h de uma água oleosa com 150 ppm de óleo disperso com um tamanho uniforme de gota igual a 250 µm, este nível de eficiência garantiria uma saída de água tratada através do *underflow* com concentração de óleo igual a 5 ppm, o que está de acordo com a Resolução 393/2007 do CONAMA.

⁴ Verificar Apêndice D – Cálculo da Eficiência Granulométrica Total para gotas de óleo de 250 µm.

⁵ Verificar Apêndice E – Cálculo da Razão de Fluido para gotas de óleo de 250 µm.

⁶ Verificar Apêndice F – Cálculo da Eficiência Granulométrica Reduzida.

As simulações 2, 6 e 19 produziram razão de fluido nula e, conseqüentemente, eficiências granulométricas iguais a zero. O mesmo fenômeno foi observado também por Pinto *et al.*, 2008. Este fenômeno pode ocorrer quando se trabalha com hidrociclones com uma pequena razão D_o/D_u , isto é, com relativamente pequenos diâmetros do *overflow* e grandes diâmetros de *underflow*. Nesta situação, todo o fluido é direcionado para o *underflow*, sendo a vazão do *overflow* igual a zero. Obviamente, esta é uma condição operacional completamente indesejável.

Os maiores valores de razão de fluido foram obtidos para $D_o/D_u \cong 1,0$ (experimentos 4, 8, 11 e 13) e os menores, excluindo-se $R_f = 0$, para $D_o/D_u \cong 0,2$ (experimentos 7 e 9).

As repetições do ponto central (experimentos 5, 14 e 16) geraram, como era de se esperar, valores idênticos de eficiência granulométrica reduzida (23,7%) e de razão de fluido (13,15%).

Os experimentos 4 e 13 indicam, claramente, a interação existente entre a altura do duto de alimentação (H_c) e a altura da parte cilíndrica (L_1), mantidas as demais dimensões constantes. Um menor H_c e um maior L_1 (experimento 13) propiciaram uma maior eficiência de separação. Isto ocorre, provavelmente, por que estas dimensões geram um menor *bypass* através do *overflow*.

Neste trabalho, optou-se por se realizar um planejamento fatorial, o que impediu o acesso aos termos de interação entre as diferentes variáveis. Isto foi feito porque se desejava estudar quais variáveis eram mais relevantes para a eficiência de separação e também porque um planejamento do tipo superfície de resposta com pontos axiais geraria 44 geometrias, sendo 4 repetições no ponto central. O tempo requerido para se conduzir 44 simulações do tipo empregado neste trabalho extrapolaria o prazo definido para uma dissertação de mestrado.

Foi realizada uma análise estatística dos dados utilizando o aplicativo *Essential Regression*. Dentre as seis variáveis geométricas testadas, apenas o diâmetro do *overflow* (D_o) e o diâmetro do *underflow* (D_u) mostraram ter significância estatística. Os modelos

estatísticos encontrados para as respostas: eficiência granulométrica reduzida (G') e razão de fluido (R_f) são mostrados nas Equações (34) e (35), respectivamente.

$$G' = 0,666 - 0,0348 D_u + 0,0302 D_o \quad (34)$$

$$R_f = 0,310 - 0,0177 D_u + 0,0178 D_o \quad (35)$$

As equações mostram que, como o módulo dos coeficientes de D_u e D_o são parecidos, as influências destas variáveis sobre a eficiência granulométrica reduzida (G') são praticamente idênticas, porém em sentidos opostos, isto é, um aumento em D_u diminui G' e um aumento em D_o a aumenta. Observação idêntica pode ser tirada com relação à razão de fluido (R_f).

Pode-se avaliar a adequabilidade da equação de regressão aos dados amostrais analisando-se o coeficiente de correlação R . Além disso, em um bom modelo, os valores de R^2 e R^2 ajustado não devem diferir muito entre si (STEPPAN *et al.*, 1998). A Tabela 10 fornece os valores de R , R^2 e R^2 ajustado.

Tabela 10 – Tabela dos valores de R , R^2 e R^2 ajustado

	R_f	G'
R	0,864	0,832
R^2	0,746	0,692
R^2 ajustado	0,714	0,654

As Figuras 22 e 23 mostram o gráfico 3-D de superfície de resposta e a curva de nível para a eficiência granulométrica reduzida (G') em função de D_o e D_u , e respectivamente. Observa-se que, nos intervalos estudados, os maiores G' são obtidos com os maiores valores de D_o e os menores de D_u . As Figuras 24 e 25 mostram estas mesmas curvas para a razão de fluido (R_f) também em função de D_o e D_u . Pode-se observar que os menores R_f são obtidos com os menores valores de D_o e os maiores de D_u . Estas constatações estão de acordo com o publicado na literatura (SVAROVSKY, 1984; MATTA e MEDRONHO, 2000).

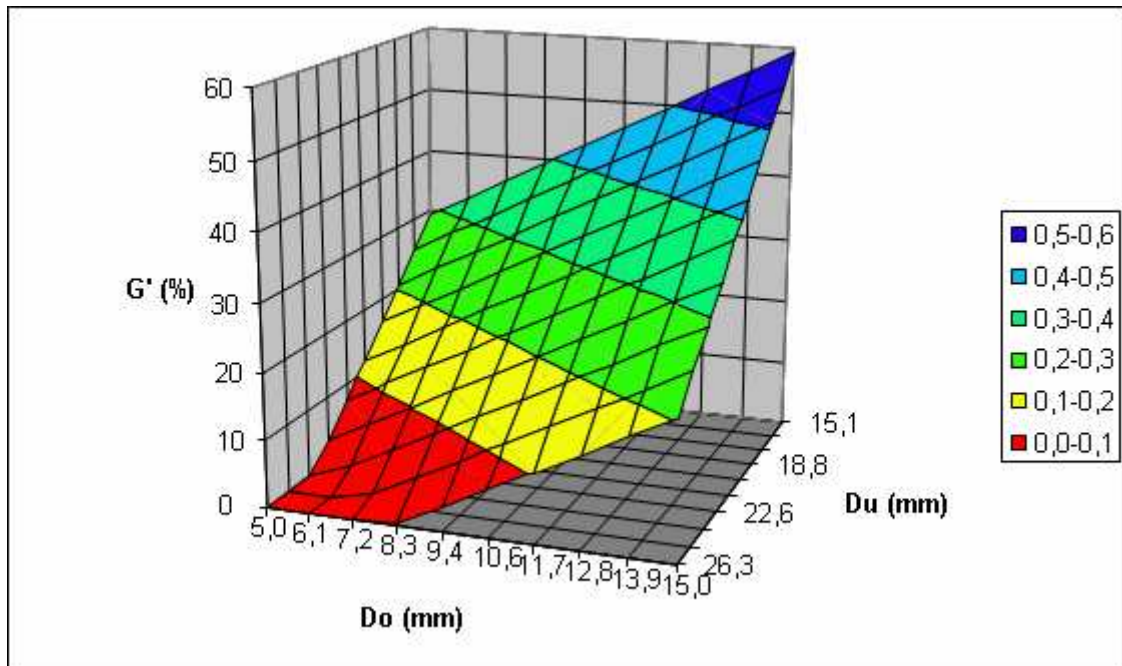


Figura 22 – Influência do diâmetro de *overflow* e diâmetro de *underflow* sobre a eficiência granulométrica reduzida.

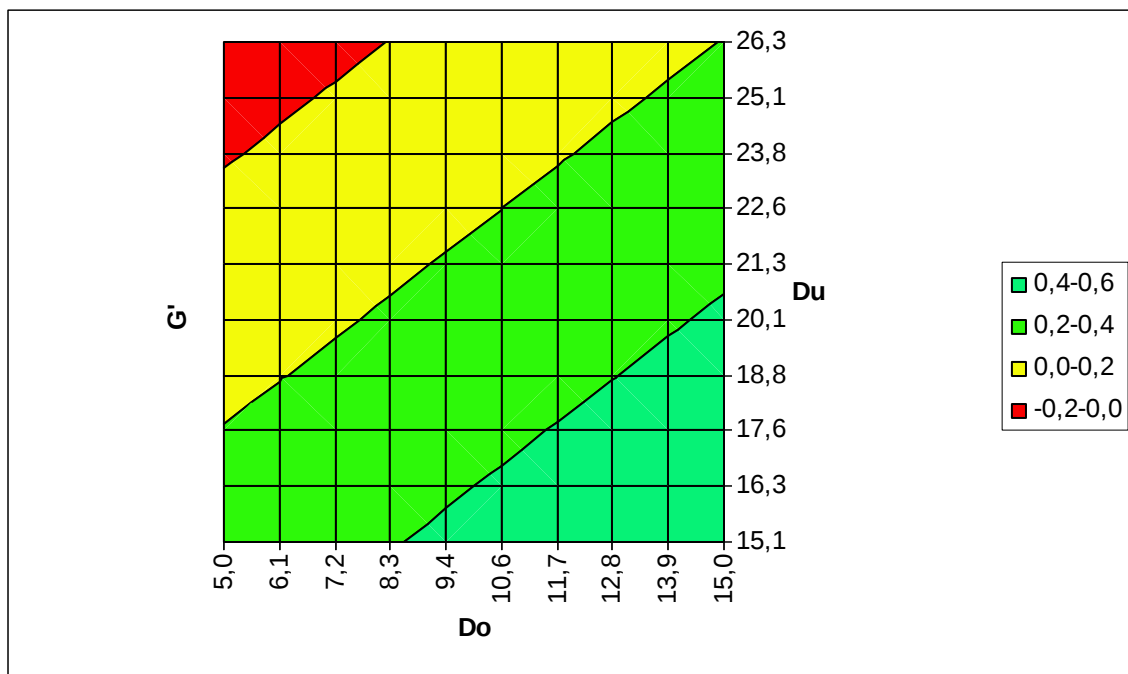
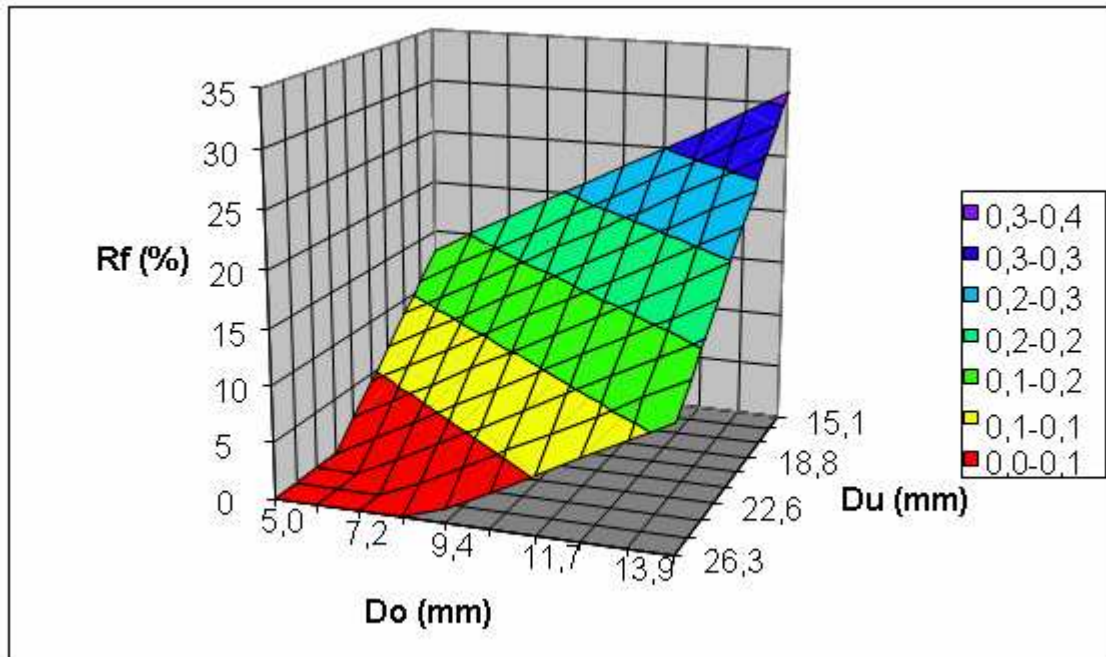


Figura 23 – Curva de nível para a eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro de *overflow* e diâmetro de *underflow*.



Figura

24 – Influência do diâmetro de *overflow* e diâmetro de *underflow* sobre a razão de fluido.

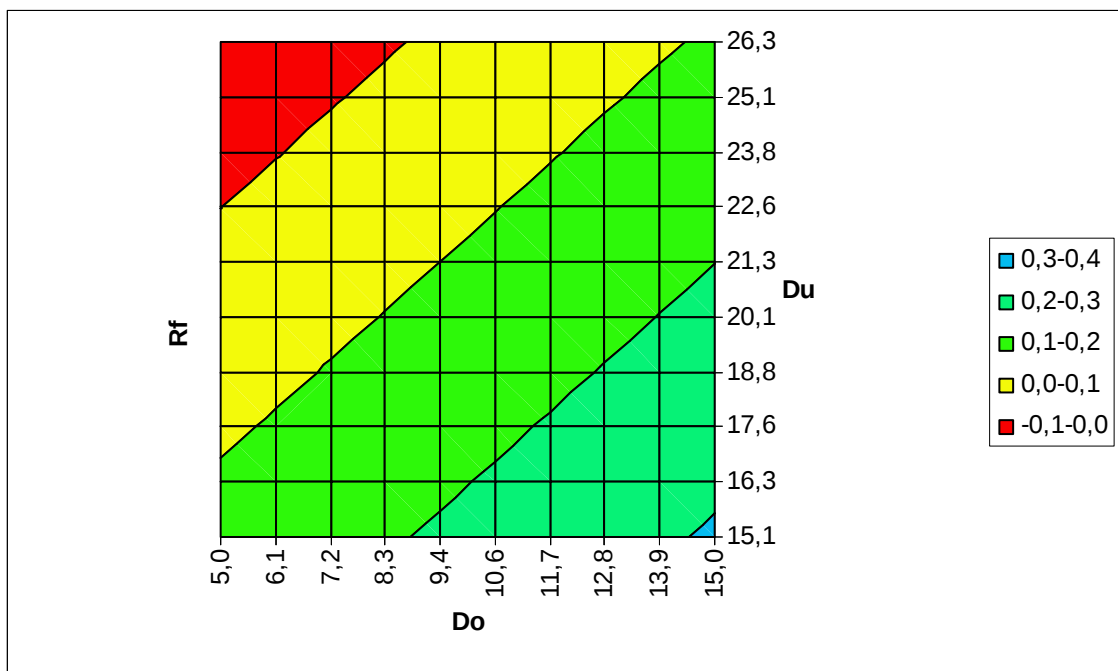


Figura 25 – Curva de Nível para a razão de fluido em função do diâmetro de *overflow* e diâmetro de *underflow*.

A separação ideal seria aquela na qual a eficiência fosse máxima e a razão de fluido mínima, pois assim, se estaria recuperando o máximo de óleo possível e com uma elevada

concentração. Entretanto, como mencionado no parágrafo acima, infelizmente as influências de D_o e D_u apontam em sentidos opostos com relação à maximização da eficiência e da minimização da razão de fluido.

Outra forma de encarar o problema de águas oleosas seria o interesse em maximizar-se a quantidade de água tratada obtida no *underflow* e com a menor concentração de óleo possível. Mais uma vez, as influências de D_o e D_u apontam em sentidos opostos com relação à maximização da vazão de água tratada e com uma menor concentração de óleo possível.

A Figura 26 mostra as linhas de corrente na região cono-cilíndrica do hidrociclone, ou seja, a formação do vórtice no interior do hidrociclone e o perfil de velocidades do óleo no corpo do hidrociclone são apresentados na Figura 27.

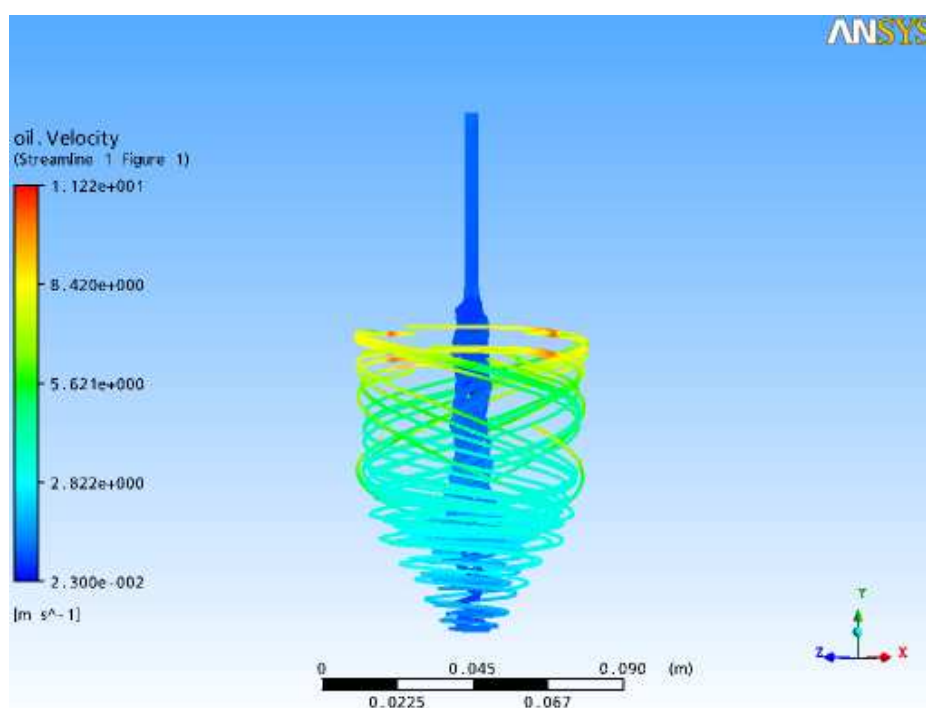


Figura 26 – Formação do vórtice no interior do hidrociclone.

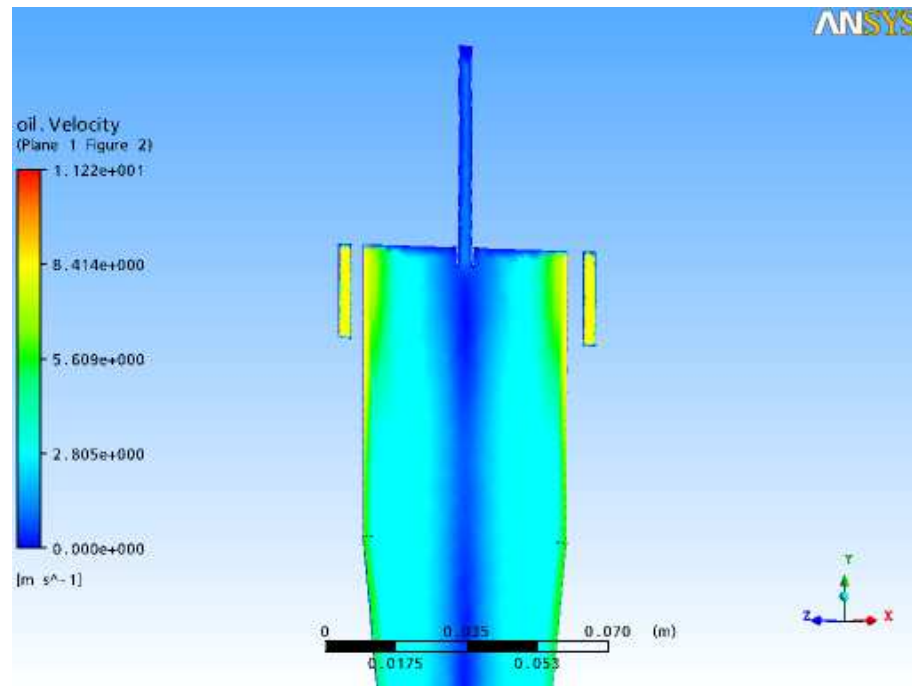


Figura 27 - Perfil de velocidades do óleo no corpo do hidrociclone.

V – CONCLUSÕES

Os resultados das simulações mostram que o hidrociclone com a geometria 13 (HC13) forneceu a maior eficiência granulométrica reduzida (96,2%).

As repetições (triplicata) no ponto central geraram resultados iguais, confirmando a qualidade dos dados obtidos.

Dentre as 6 variáveis testadas: diâmetro nominal do hidrociclone (D_c), diâmetro *overflow* (D_o), diâmetro do *underflow* (D_u), altura do duto de alimentação (H_c), comprimento do *vortex finder* (VF) e altura da parte cilíndrica (L1); as que mais afetam a eficiência de separação são os diâmetros de *overflow* e de *underflow*.

Algumas geometrias (2, 6, 17 e 19) geraram uma eficiência granulométrica reduzida igual a zero, porque todo o fluido saía pelo *underflow*, o que mostra a importância de um bom balanço entre os diâmetros do *overflow* e do *underflow*.

Os experimentos 4 e 13, nos quais se variou apenas a altura do duto de alimentação (H_c) e a altura da região cilíndrica (L1), sugerem haver interação entre essas variáveis.

Os maiores valores de razão de fluido foram obtidos para $D_o/D_u \cong 1,0$ e os menores para $D_o/D_u \cong 0,2$.

Sugestões para Trabalhos Futuros

🚦 Realizar um planejamento do tipo superfície de resposta com pontos axiais, com finalidade de obter os termos quadráticos. Com base neste planejamento, realizar um segundo planejamento experimental com as variáveis que mais influenciaram a eficiência. A partir dos resultados deste segundo planejamento, seria possível encontrar-se a geometria ótima.

- ✚ Construir o hidrociclone assim otimizado e realizar ensaios experimentais a fim de validar as simulações.
- ✚ Criar um Grupo de Estudos de CFX no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Sergipe (PEQ-UFS).

REFERÊNCIAS

ANSYS CFX Release 11.0. © 1996-2006 ANSYS Europe, Ltd. All rights reserved. CFX-Solver Theory Guide, 2006.

AMARAL, D. DOE (Design of Experiments), 1998, Disponível em: www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/DOE.html. Acesso em: 25/12/2008.

ARRUDA, E. B., KOBOLDT, C. A. DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. **Estudo do comportamento de um hidrociclone filtrante de geometria Krebs**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1993.

ARTERBURN, R. A., The sizing and selection of hydrocyclones. **Metallurgical Handbook**, 1983. Disponível em: www.krebsengineers.com/documents/83_sizing_select_cyclones.pdf. Acesso em: 08/06/2007.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transporte. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2ª Edição, 2004.

BOUSO, J. L. **Nuevas tendencias de classificacion em el procesamiento de minerales**. Quito, Equador: Fevereiro, 2003.

BRADLEY, D. **The Hydrocyclone**. Oxford: Pub. Pergamon Press, 1965.

BRUNS, R. B.; NETO, B. B.; SCARMINO, I. S. **Como Fazer experimentos** (Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria). Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

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

CARVALHO, A. T., MEDRONHO, R. A. Perfuração com duplo gradiente: a separação da barita do fluido de perfuração utilizando hidrociclones. In: **Anais do Rio Oil & Gas Expo e Conference**, 2004. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Outubro 2004.

CASTILHO, L. R., MEDRONHO, R. A., A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. **Minerals Engineering**, v.13, p.183 - 191, 2000.

CHU, L.-Y., YU , W., WANG, G.-J., ZHOW, X.-T., CHEN, W.-M., DAI, G. Q., Enhancement of hydrocyclone separation performance by elimination the air core. **Chemical Engineering and Processing**, 43, p. 1441-1448, 2004.

CHU, L. Y., CHEN, W. M., LEE, X. Z. Enhancemete of hydrocyclone performance bycontrolling the inside turbulence structure. **Chemical Engineering Science**, 57, 2002, p. 207-212.

COELHO, M.A.Z. e MEDRONHO, R.A. A model for performance prediction of hydrocyclones. **Chemical Engineering Journal**, 84(1), 7-14, 2001.

CONAMA 393, RESOLUÇÃO CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) Nº 393/79, de 08 de agosto de 2007, Publicado no Diário Oficial da União Nº 153, de 09/08/2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=541>. Acesso em 10/10/2007.

CULLIVAN, J. C., WILLIAMS, R. A., DYAKOWSKI, T., CROSS, C. R. New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics. **Minerals Engineering**, 17, p. 651-660, 2004.

DAI, G. Q., LI, J. M., CHEN, W. M. Numerical prediction of liquid flow within hydrocyclone. **Chemical Engineering Journal**, 74, p. 217-223, 1999.

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

DOBY, M. J., NOWAKOWSKI, A. F., DYAKOWSKI, T. Recent changes in modeling the performance of hydrocyclones. **Trends in Chemical Engineering**, Vol.10, 2006.

DOMINGOS, A. K., SAAD, E. B., WILHELM, H. M., RAMOS, L. P. Optimization of the ethanolsis of *Raphanus sativus* (L. Var.) crude oil applying the response surface methodology. **Bioresource Technology**, 2007.

EIRAS, S. P; COSCIONE, A. R; ANDRADE, J. C; CUSTÓDIO, R. **Métodos de Otimização em Química.**, 2000. Disponível em: www.chemkeys.com/artigo/9/90. Acesso em: 25/12/2008.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

FREITAS, A. G. B. de. **Estudo de uma planta de Estação de Produção**. Monografia de Especialização em Engenharia de Petróleo. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2007.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. São Carlos. 121 p. Dissertação de Mestrado: Universidade de São Paulo, 2002.

GRADY, S. A., WESSON, G. D., ABDULLAH, M., KALU, E. E. Prediction of 10-mm hydrocyclone separation efficiency using computational fluid dynamics,. **Filtration & Separation**, p 41-46, 2003.

HARGREAVES, J. H., SILVESTER, R. S. Computational Fluid Dynamics Applied to the Analysis of Deoiling Hydrocyclone Performance. **Trans IChemE**, Vol. 68, Part A, July 1990.

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

KRAIPECH, W., CHEN, W., DYAKWSKI, T., NOWAKOSKI, A. The performance of empirical models on industrial hydrocyclone design. **International Journal of Mineral Processing**, 80, p.100-115, 2006.

LAZIC, Z. R. **Design of Experiments in Chemical Engineering** – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.

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

LUZ, J. A. M. da e LIMA, R. M. F. Análise Granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Revista Escola de Minas**, Vol. 54, nº2. Ouro Preto. Abril/Junho, 2001.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de fluidos - Ênfase na Indústria de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica de Fluidos Computacional**. Livros Técnicos e Científicos Editora, 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.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

MATTA, V.M. e MEDRONHO, R.A., A New Method for Yeast Recovery in Batch Ethanol Fermentations: Filter Aid Filtration Followed by Separation of Yeast from Filter Aid Using Hydrocyclones, **Bioseparation**, 9 (1), 43-53, 2000.

MEDRONHO, R. A. Solid-liquid separation. In: Mattiasson B, Hatti-Kaul R (eds) **Isolation and purification of proteins**. Marcel Dekker Inc, New York, 2003.

MEDRONHO, R. A. **Hidroclones**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004.

MEDRONHO, R. A., SCHUETZE, J., DECKWER, W.-D. Numerical Simulation of hydrocyclone for cell separation. **Latin American Applied Research**, 35, p. 1-8, 2005.

MEDRONHO, R.A. e SVAROVSKY, L. “Tests to verify hydrocyclones scale-up procedures”, Proceedings of the 2nd **Int. Conference on Hydrocyclones, BRHA**, 1-14, Bath, Inglaterra. 1984.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. John Wiley & Sons Inc. 3rd ed, 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6^a edição. John Wiley & Sons, 2005.

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

NARASIMHA, M., SRIPRIYA, R., BANERJEE, P. K. CFD modelling of hidroclone-prediction of cut size. **International Journal of Minerals Processing** 75, p. 53-68, 2005.

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

OLIVEIRA, A. G., MEDRONHO, R. A. Otimização da geometria de hidrociclones para o tratamento de águas de lastro de navios petroleiros. In: **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2004**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Outubro 2004.

OLIVEIRA, R. C. G. de Novo conceito de Dessalgação de Petróleo para Centrais de Tratamento. **Boletim Técnico da Petrobras**. Rio de Janeiro. Nº. 43 (2): p. 111 – 119, abr./jun. 2000.

PERRY, R. H. e TILTON, J.N. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. McGraw-Hill, New York: 1999.

PETTY, C. A., PARKS, S. M. Flow structures within miniature hydrocyclones. **Minerals Engineering**, 17, p. 615-624, 2004.

PINTO, R. C. V., MEDRONHO, R. A., CASTILHO, L. R. Separation of CHO cell using hydrocyclones. **Cytotechnology** v. 56, p. 57-67, 2008.

PLITT, L. R. **A mathematical model of a Hydrocyclone classifiers**. CIM Bull. December, p. 114-123, 1984.

PRANDTL, L. **Zeits f. angew. Math. u. Mech.**, 5, 136-139 (1925).

PUPRASERT, C., HEBRARD, G., LOPEZ, L., AURELLE, Y. Potential of using Hydrocyclone equipped with Grit pot as a pre-treatment in run-off water treatment. **Chemical Engineering and Processing**, 47, p. 67-83, 2004.

ROMERO, J. SAMPAIO, R. A Numerical Model for prediction of the Air-core Shape of Hydrocyclone Flow. **Pergamon, Mechanics Research Communications**, Vol.26, nº3, 1999.

ROSA, J. J. **Desenvolvimento de um Novo Processo de Tratamento de Águas Oleosas – Processo FF**. XIX Prêmio Jovem Cientista - Água – Fonte da Vida. Porto Alegre. RS. 2003.

SALAGER, J. L. **Teoria de Emulsões e sua Aplicação na Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro: CENPES, 1986.

SANTANA, C. R. **Tratamento de água produzida para descarte**. Monografia de Especialização em Engenharia de Petróleo, São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2007.

SCHUENCK, L., PALADINO, E., QUINTELLA, E. A CFD model for the development of a high oil concentration hydrocyclone. In: **Anais CFD Oil, 2006**. Rio de Janeiro, 2006

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

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

SOUZA, L. C. S. **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Produção do Destilado Neutro Leve da Unidade 9 (RLAM)**. São Cristóvão. 34 p. Trabalho de Conclusão de Curso: UFS, 2007.

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

STEPPAN, D. D., WERNER, J., YEATER, R.P., Copyright, **Essential Regression and Experimental Design for Chemists and Engineers**, 1998 Disponível em: www.geocities.com/SiliconValley/Network/1032. Acesso em: 25/12/2008.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**. New York: Holt, Rinehart and Winston , 1984.

SVAROVSKY, L. **Solid-liquid Separation**, Czech Republic: Butterworth-Heinemann, p. 191-245, 2000.

THEW, M. T., SILK, S. A., COLMAN, D. A. Determination and use of residence time distributions for two hydrocyclones. In: **Proc. Int. Conf. on Hydrocyclones**, Paper 16. BRHA Fluid Engineering, Cambridge 1980.

THOMAS, J. E. (org.) **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 2004.

VERSTEEG, H.K. e MALALASEKERA, W.. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. Longman Group Ltd, England, 1995.

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

YOSHIOKA , N. e HOTTA, Y. Liquid cyclone as a hydraulic classifier. **Chem. Eng. Jpn.**, 19(12):632 ,1955.

APÊNDICES

Apêndice A

Valores utilizados no Planejamento Experimental, com definição dos níveis inferior, central e superior (-1, 0, 1), respectivamente.

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Dc	40,44	55,22	70
Do	5	10	15
Du	15,1	20,7	26,3
Hc	23,4	35,5	47,6
VF	4,4	26	47,6
L1	47,6	60	72,4

Apêndice B

Geometrias relativas aos experimentos realizados.

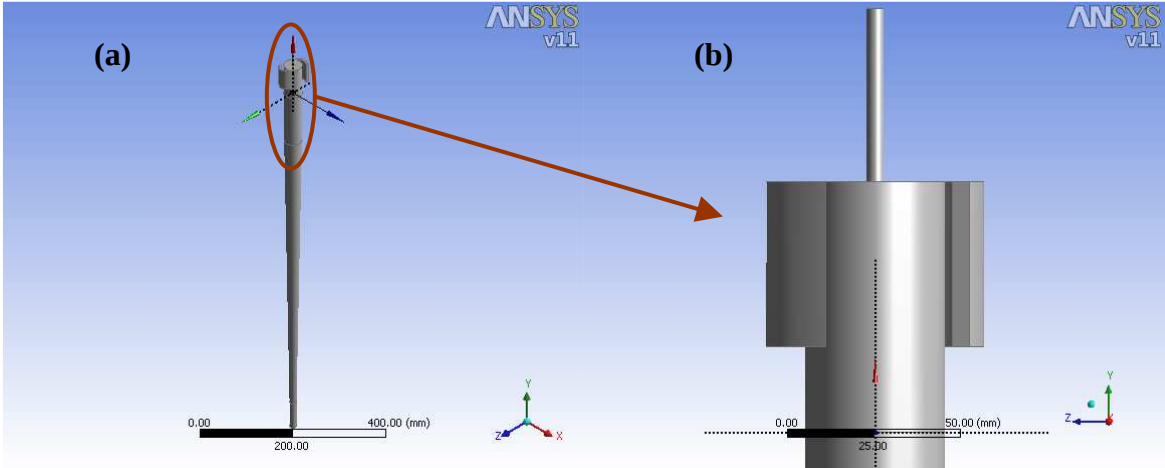


Figura B01 – HC1

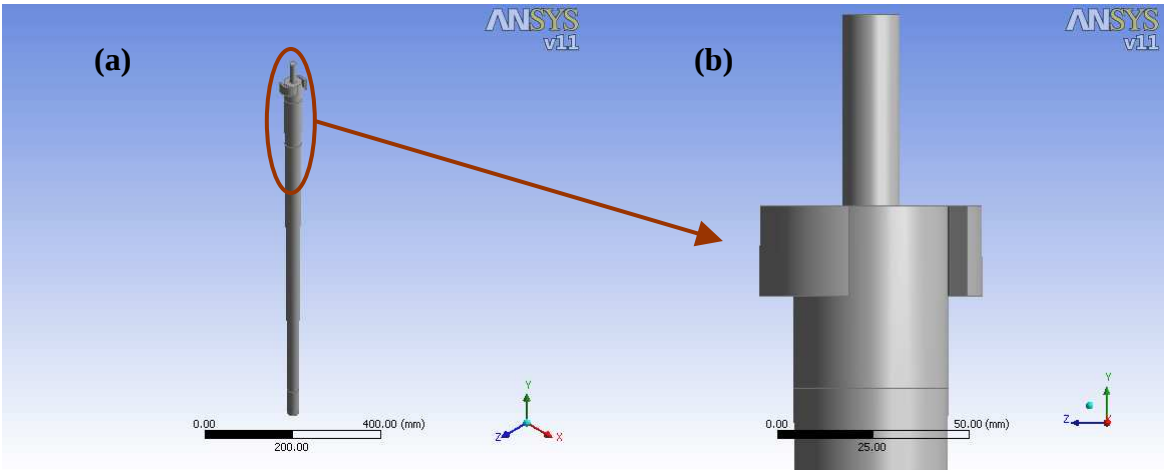


Figura B02 – HC2

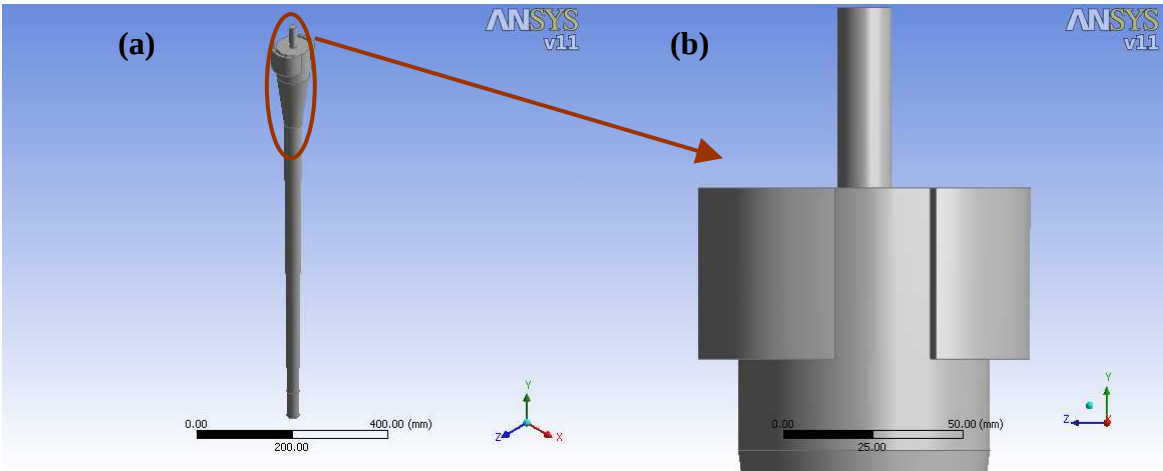


Figura B03 – HC3

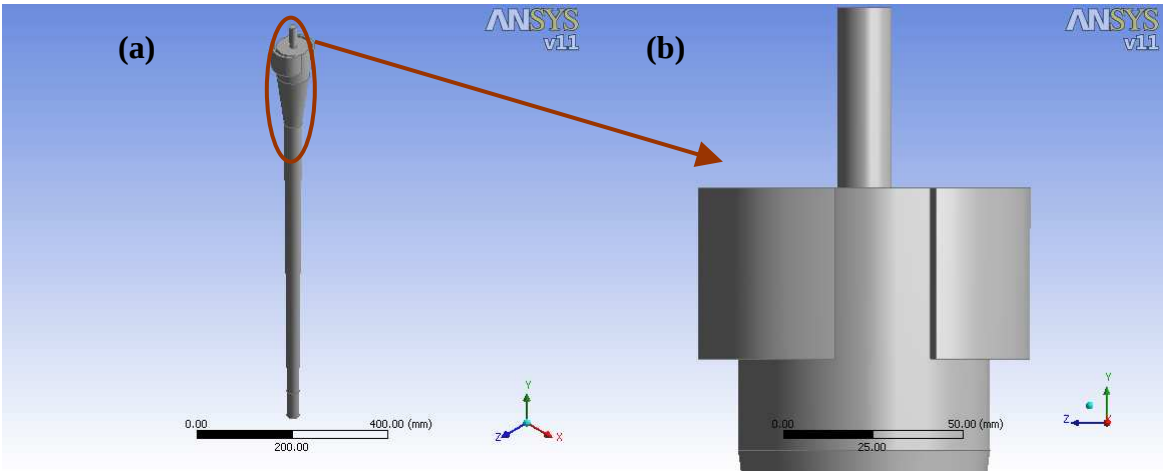


Figura B04 – HC4



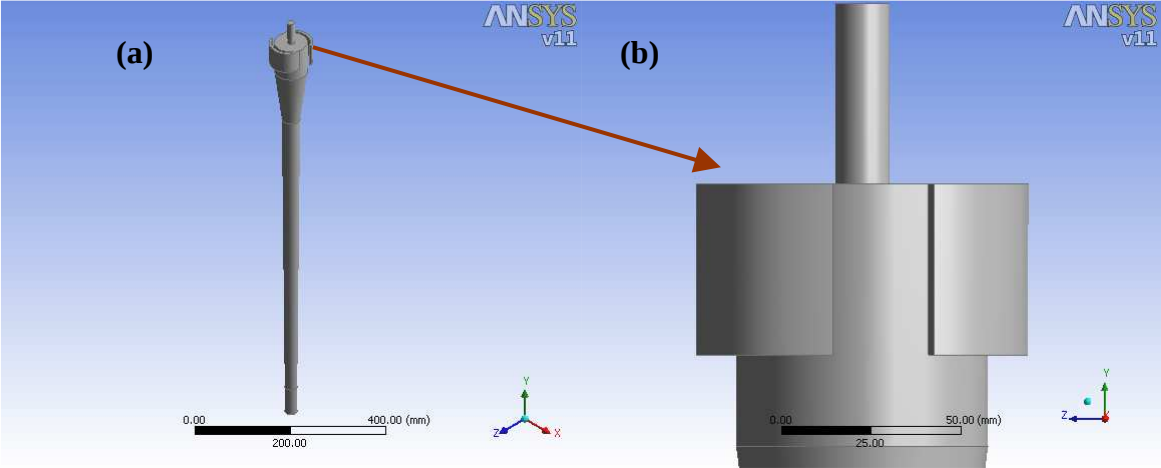


Figura B05 – HC5 = HC14 = HC16

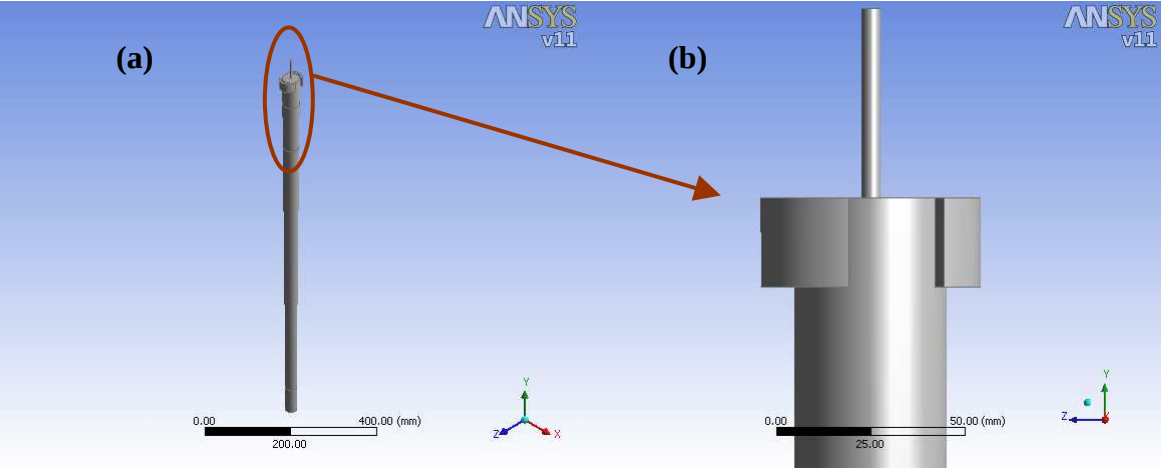


Figura B06 – HC6

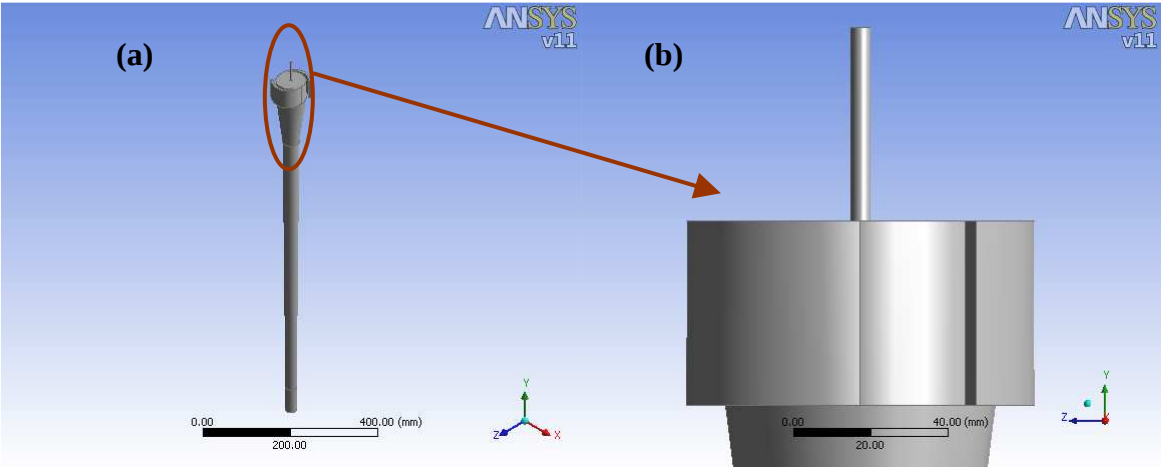


Figura B07 – HC7

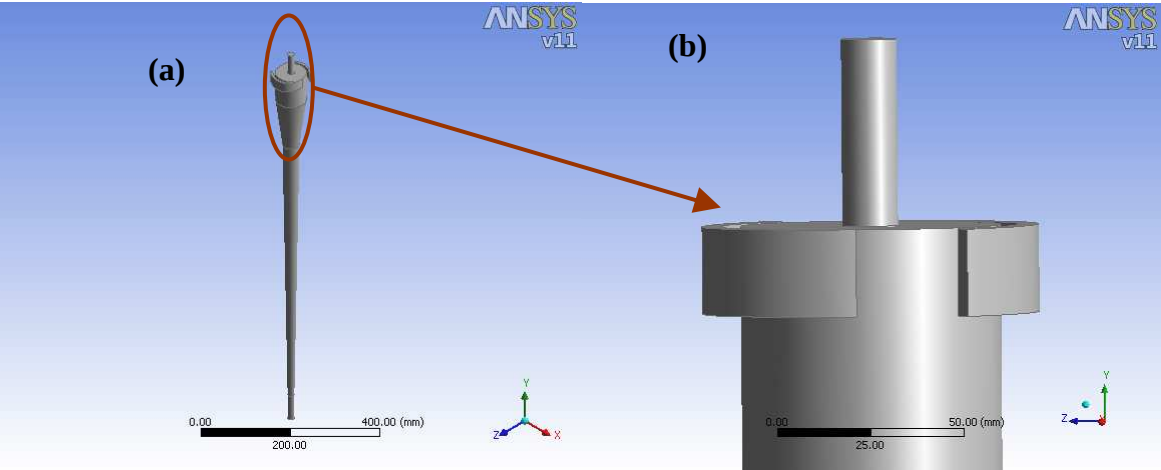


Figura B08 – HC8

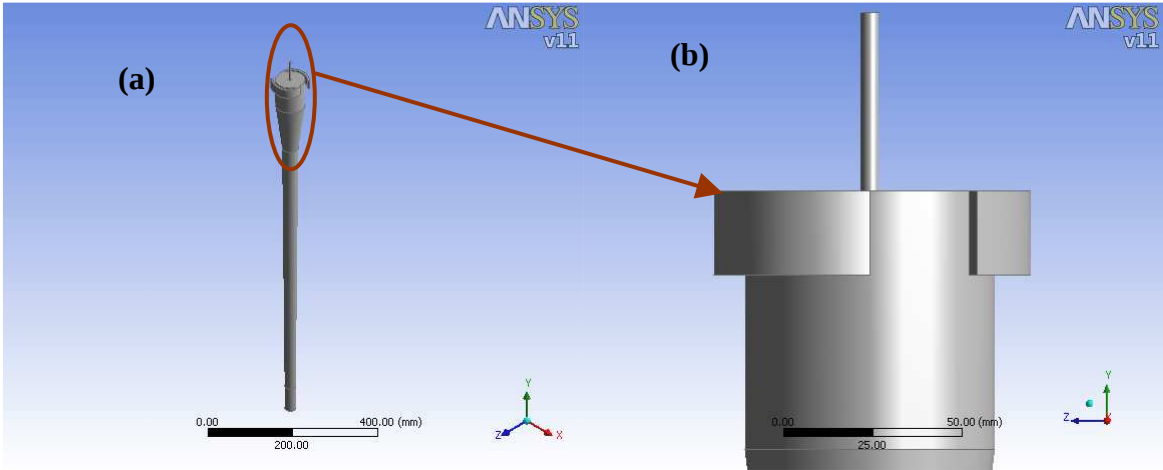


Figura B09 – HC9

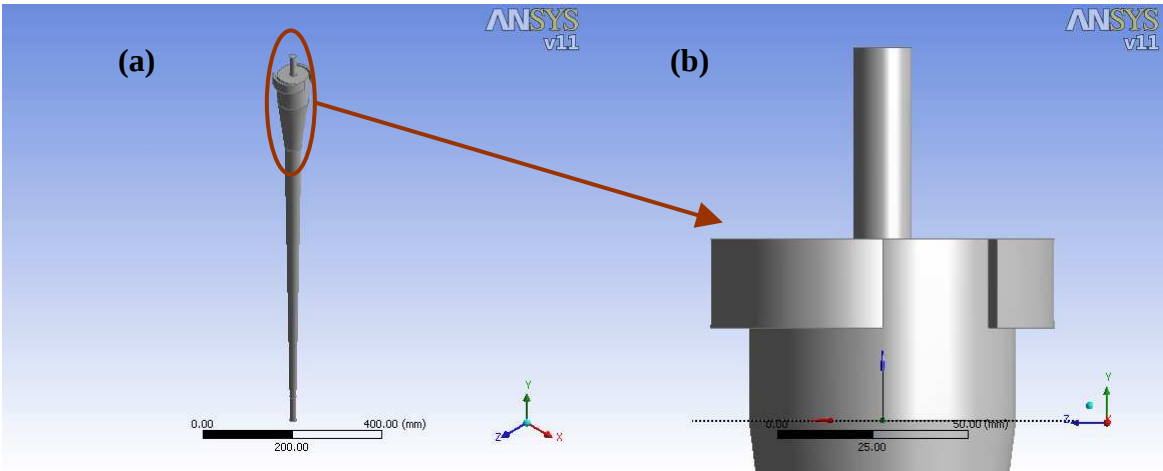


Figura B10 – HC10

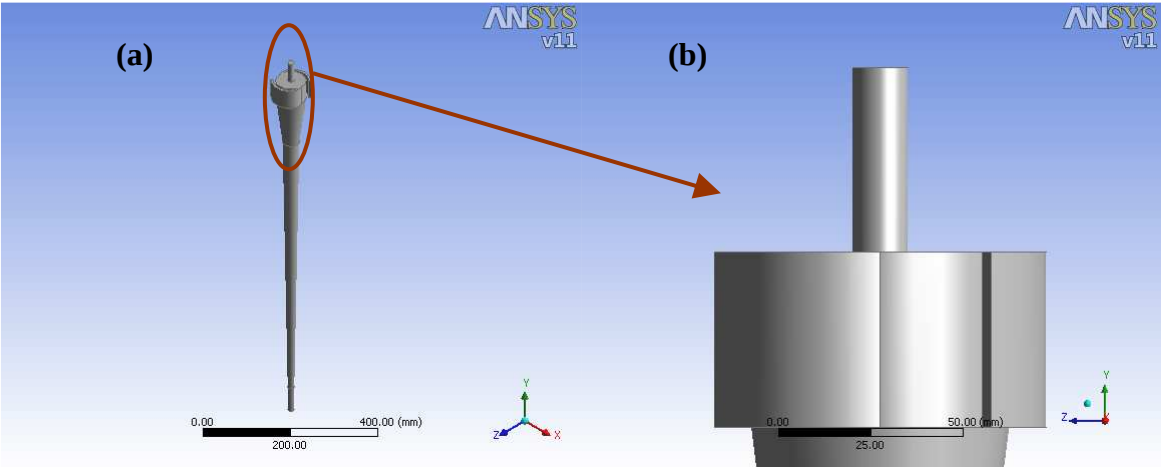


Figura B11 – HC11

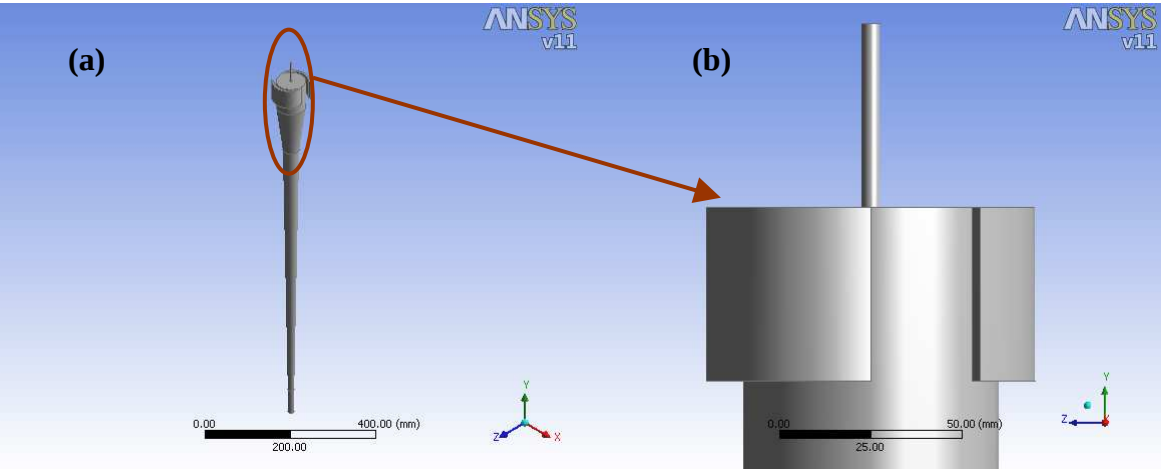


Figura B12 – HC12

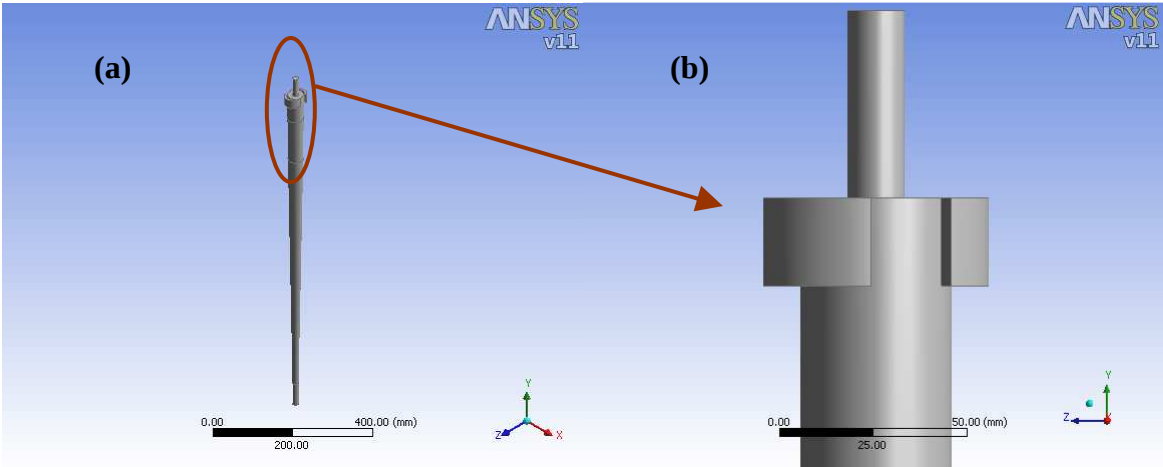


Figura B13 – HC13

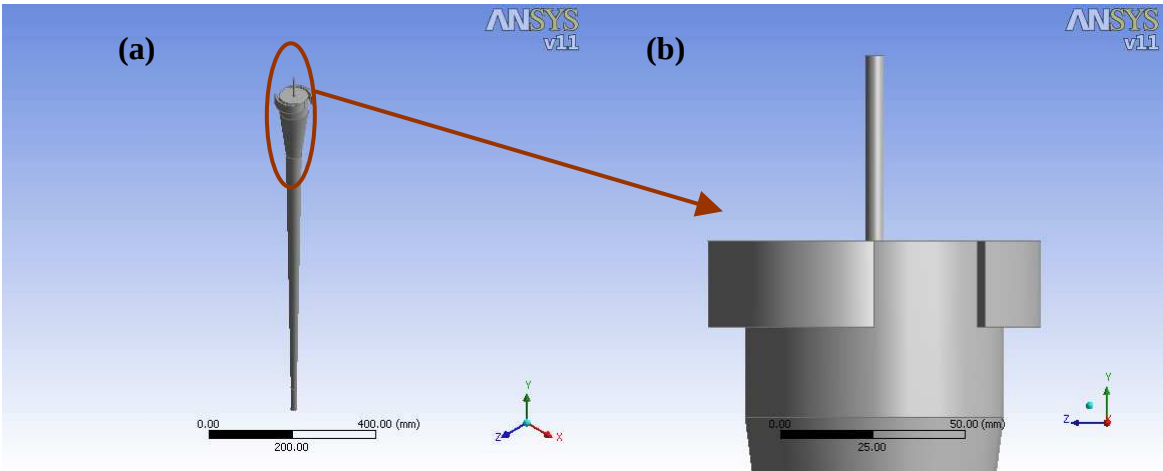


Figura B14 – HC15

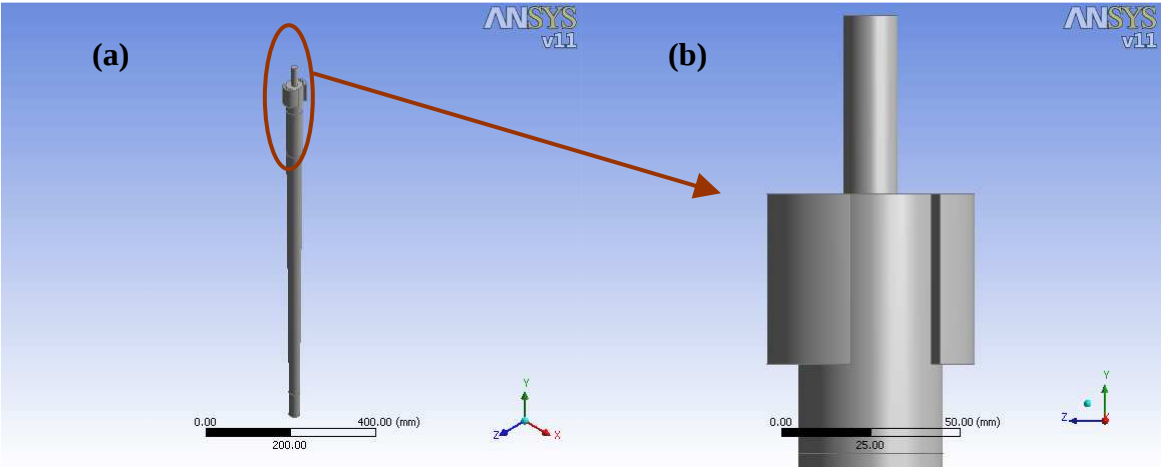


Figura B15 – HC17

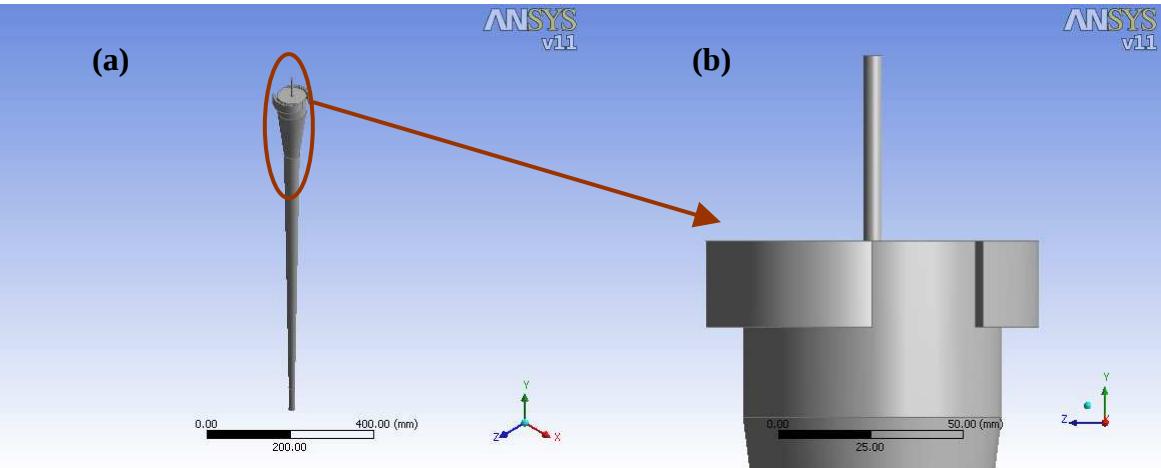


Figura B16 – HC18

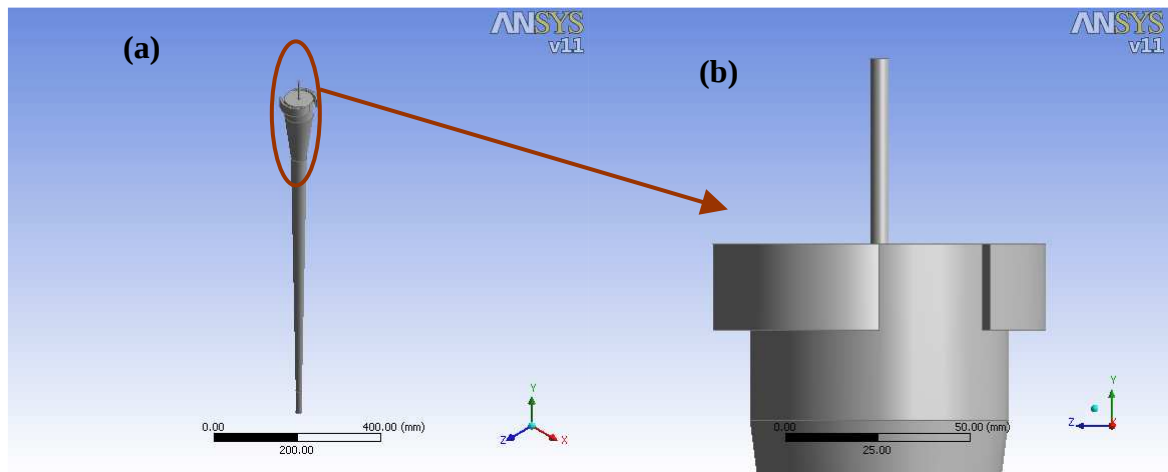


Figura B17 – HC19

Apêndice C

Tabela C- Resultados dos Balanços de Massa de Óleo e Água (%).

Experimento	Balanço de massa	
	%	
	óleo	água
HC1	0,40	0,01
HC2	0,35	0,00
HC3	0,39	0,00
HC4	0,32	0,01
HC5	0,29	0,00
HC6	0,09	0,00
HC7	0,14	0,00
HC8	0,04	0,00
HC9	0,19	0,00
HC10	0,15	0,00
HC11	0,41	0,03
HC12	0,01	0,00
HC13	0,48	0,01
HC14	0,36	0,00
HC15	0,04	0,00
HC16	0,37	0,00
HC17	0,09	0,00
HC18	0,07	0,00
HC19	0,02	0,00

Apêndice D

Tabela D - Cálculo da Eficiência Granulométrica Total para gotas de óleo com 250 μm .

Experimento	Wgo	Wgu	Wg	G	G (%)
HC1	0,00242	0,01270	0,01517	0,15953	15,95
HC2	0,00000	0,01517	0,01517	0,00000	0,00
HC3	0,00439	0,00107	0,01517	0,28921	28,92
HC4	0,01060	0,00454	0,01517	0,69874	69,87
HC5	0,00512	0,00100	0,01517	0,33728	33,73
HC6	0,00000	0,01514	0,01517	0,00000	0,00
HC7	0,00073	0,01442	0,01517	0,04798	4,80
HC8	0,01367	0,00151	0,01517	0,90107	90,11
HC9	0,00131	0,01384	0,01517	0,08629	8,63
HC10	0,00228	0,01287	0,01517	0,15043	15,04
HC11	0,01109	0,00403	0,01517	0,73107	73,11
HC12	0,00263	0,01254	0,01517	0,17333	17,33
HC13	0,01480	0,00044	0,01517	0,97588	97,59
HC14	0,00512	0,01002	0,01517	0,33721	33,72
HC15	0,00373	0,01144	0,01517	0,24582	24,58
HC16	0,00512	0,01002	0,01517	0,33720	33,72
HC17	0,00000	0,01511	0,01517	0,00000	0,00
HC18	0,00430	0,01087	0,01517	0,28331	28,33
HC19	0,00000	0,01516	0,01517	0,00000	0,00

onde:

Wgo = Taxa mássica de óleo no *overflow*

Wgu = Taxa mássica de óleo no *underflow*

Wg = Taxa mássica de óleo na alimentação

G = Eficiência Granulométrica para gota de óleo com 250 μm

Apêndice E

Tabela E - Cálculo da Razão de Fluido para gotas de óleo com 250 μm .

Experimento	Wlo	Wlu	Wl	Rf	Rf (%)
HC1	0,110	1,672	1,783	0,0620	6,20
HC2	0,000	2,214	1,783	0,0000	0,00
HC3	0,201	1,582	1,783	0,1125	11,25
HC4	0,627	1,156	1,783	0,3515	35,15
HC5	0,234	1,548	1,782	0,1315	13,15
HC6	0,000	1,816	1,783	0,0000	0,00
HC7	0,020	1,763	1,783	0,0110	1,10
HC8	0,710	1,072	1,783	0,3985	39,85
HC9	0,013	1,770	1,783	0,0074	0,74
HC10	0,053	1,729	1,783	0,0300	3,00
HC11	0,711	1,071	1,783	0,3991	39,91
HC12	0,104	1,679	1,783	0,0581	5,81
HC13	0,666	1,116	1,783	0,3738	37,38
HC14	0,234	1,548	1,782	0,1315	13,15
HC15	0,101	1,682	1,783	0,0565	5,65
HC16	0,234	1,548	1,782	0,1315	13,15
HC17	0,000	1,906	1,783	0,0000	0,00
HC18	0,087	1,695	1,783	0,0490	4,90
HC19	0,000	1,801	1,783	0,0000	0,00

onde:

Wlo = Taxa mássica de líquido no *overflow*
Wlu = Taxa mássica de líquido no *underflow*
Wl = Taxa mássica de líquido na alimentação
Rf = Razão de Fluido

Apêndice F

Tabela F - Cálculo da Eficiência Granulométrica Reduzida

Experimento	G	Rf	G'	G' (%)
HC1	0,15953	0,0620	0,1040	10,40
HC2	0,00000	0,0000	0,0000	0,00
HC3	0,28921	0,1125	0,1991	19,91
HC4	0,69874	0,3515	0,5354	53,54
HC5	0,33728	0,1315	0,2370	23,70
HC6	0,00000	0,0000	0,0000	0,00
HC7	0,04798	0,0110	0,0374	3,74
HC8	0,90107	0,3985	0,8355	83,55
HC9	0,08629	0,0074	0,0795	7,95
HC10	0,15043	0,0299	0,1242	12,42
HC11	0,73107	0,3991	0,5524	55,24
HC12	0,17333	0,0581	0,1224	12,24
HC13	0,97588	0,3738	0,9615	96,15
HC14	0,33721	0,1315	0,2369	23,69
HC15	0,24582	0,0565	0,2006	20,06
HC16	0,33720	0,1315	0,2369	23,69
HC17	0,00000	0,0000	0,0000	0,00
HC18	0,28331	0,0490	0,2464	24,64
HC19	0,00000	0,0000	0,0000	0,00

onde:

G' = Eficiência Granulométrica Reduzida

G = Eficiência Granulométrica Total

Rf = Razão de Fluido