



# Desenvolvimento de um Hidrociclone para Separação de Água dispersa em Óleo

João Pedro Souza de Oliveira

Projeto de Final de Curso

Orientadores:

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

Prof., Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Fevereiro de 2018

# DESENVOLVIMENTO DE UM HIDROCICLONE PARA SEPARAÇÃO DE ÁGUA DISPERSA EM ÓLEO

*João Pedro Souza de Oliveira*

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Fábio Pereira dos Santos, D.Sc.

---

Melissa Limoeiro Estrada Gutarra, D.Sc.

---

Rodrigo Petrone dos Anjos, M.Sc.

Orientado por:

---

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

---

Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2018

Oliveira, João Pedro Souza de.

Desenvolvimento de um Hidrociclone para Separação de Água dispersa em Óleo/  
João Pedro Souza de Oliveira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

x, 30 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018.

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e Tânia Suaiden Klein.

1. Hidrociclone. 2. Separação Água-Óleo. 3. Processamento Primário Subsea. 4.

Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho e Tânia  
Suaiden Klein. I. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, Adriana e Manoel, cujo apoio se mostrou indispensável para sua conclusão.

*"Never say, 'I tried it once and it did not work.'" - Ernest Rutherford*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Manoel e Adriana, por todo o apoio incondicional dado especialmente durante os últimos cinco anos, sem o qual eu não teria conseguido prosseguir.

Aos meus orientadores, professores Medronho e Tânia, por todo o conhecimento compartilhado, paciência e compreensão ao me acompanharem nesta trajetória.

Aos meus grandes amigos da Escola de Química, por todos os momentos de estudo, trabalho e descontração.

Aos amigos que fiz trabalhando no laboratório de Fluidodinâmica Computacional da Escola de Química, alunos e professores, tornando este espaço um ambiente muito agradável para estudo, trabalho e convivência.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

## **DESENVOLVIMENTO DE UM HIDROCICLONE PARA SEPARAÇÃO DE ÁGUA DISPERSA EM ÓLEO**

João Pedro Souza de Oliveira

Fevereiro, 2018

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Prof. Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Com o presente projeto, concebeu-se um hidrociclone para separação de dispersões do tipo água em óleo. Equipamentos ciclônicos dispõem de características altamente vantajosas para operação em plantas de processamento submarinas (subsea), um dos focos atuais prioritários dos desenvolvimentos tecnológicos na área de exploração e produção de óleo e gás. Mediante o emprego da técnica de delineamento composto central rotacional e de ferramentas de fluidodinâmica computacional, foram executadas simulações numéricas com distintas conformações de geometria nas quais foram variados os diâmetros de overflow e underflow. Com base na eficiência granulométrica de separação do diâmetro de gota escolhido (50  $\mu\text{m}$ ) e na razão de fluido obtidas na simulação das diferentes geometrias, foi possível otimizar os diâmetros de overflow e underflow de modo a obter-se a maior eficiência granulométrica com uma razão de fluido aceitável. Por meio de simulações com diferentes diâmetros de gota, determinou-se a curva de eficiência granulométrica para este hidrociclone, gerando um diâmetro de corte reduzido igual a 57  $\mu\text{m}$ .

## ÍNDICE

<b>Capítulo I – Introdução</b> .....	1
<b>Capítulo II – Fundamentação Teórica</b> .....	3
II.1 – O Petróleo e O Pré-Sal.....	3
II.1.1 – Petróleo: Visão Geral e Características .....	3
II.1.2 – O Pré-Sal.....	7
II.2 – Dispersões Água-Óleo.....	10
II.3 – Processamento Primário de Petróleo .....	13
II.4 – Sistemas de Separação Submarina .....	15
II.5 – Hidrociclones.....	21
II.5.1 – Sistemas Particulados: Caracterização e Eficiência de Separação .....	21
II.5.2 – Hidrociclones: Funcionamento e Fluidodinâmica .....	30
II.5.3 – Hidrociclones para Separação Líquido-Líquido .....	35
II.6 – Fluidodinâmica Computacional.....	38
II.6.1 – Aspectos Gerais .....	38
II.6.2 – Etapas da Solução CFD .....	41
II.7 – Turbulência.....	46
II.7.1 – Caracterização Geral de Escoamentos Turbulentos.....	46
II.7.2 – Média Temporal de Reynolds das Equações de Navier-Stokes.....	48
II.7.3 – O Modelo dos Tensores de Reynolds .....	49
II.8 – Abordagem Multifásica .....	50
II.9 – Planejamento de Experimentos .....	51
II.9.1 – Introdução.....	51
II.9.2 – Definições Estatísticas .....	53
II.9.2 – Planejamento Fatorial .....	56
II.9.3 – Delineamento Composto Central.....	57
<b>Capítulo III – Materiais e Métodos</b> .....	59
III.1 – O Hidrociclone Base .....	59
III.1.1 – Seleção e Descrição.....	59
III.1.2 – Condições Operacionais.....	60
III.1.3 – Geometria.....	61
III.1.4 – Teste de Malha .....	62
III.2 – Planejamento Experimental.....	64



III.2.1 – Matriz de Experimentos .....	65
III.2.2 – Geometrias .....	66
III.3 – Simulações .....	68
<b>Capítulo IV – Resultados e Discussão .....</b>	<b>71</b>
IV.1 – Teste de Malha .....	71
IV.2 – Planejamento Experimental .....	74
IV.2.1 – Eficiência Granulométrica .....	75
IV.2.2 – Razão de Fluido .....	80
IV.2.3 – Otimização Simultânea .....	85
IV.3 – Performance do Hidrociclone Ótimo .....	87
IV.4 – Análise da Convergência .....	91
IV.5 – Avaliação Fluidodinâmica .....	94
<b>Capítulo V – Conclusões .....</b>	<b>98</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - A província do pré-sal. ....	8
Figura 2 - Disposição entre as camadas pós-sal, sal e pré-sal. ....	9
Figura 3 – Gráfico da evolução da produção anual nos reservatórios do pré-sal entre 2010 e 2016. ....	10
Figura 4 - Entupimento de tubulação devido à formação de hidrato. ....	11
Figura 5 - Esquematização de uma planta de processamento primário de fluidos típica. ....	15
Figura 6 - Estação submarina ilustrativa da Statoil Subsea Factory™ ....	18
Figura 7 - Esquematização do sistema submarino do campo de Marlim. ....	20
Figura 8 - Exemplos de distribuições de tamanhos por frequência e cumulativas maior e menor que dado tamanho. ....	23
Figura 9 - Esquema de um separador típico com uma entrada e duas saídas. ....	25
Figura 10 - Curvas de eficiência granulométrica ideal e real. ....	27
Figura 11 – (a) Plano central evidenciando a geometria típica de um hidrociclone. (b) Representação do escoamento internamente desenvolvido. ....	30
Figura 12 - Dimensões características de um hidrociclone. ....	32
Figura 13 - Modelo experimental utilizado. ....	37
Figura 14 - Estratégias para solução de problemas de escoamento. ....	40
Figura 15 - Exemplos de malhas computacionais. (a) Malha estruturada. (b) Malha híbrida. ....	42
Figura 16 - Relação das equações de conservação para fluidos newtonianos e compressíveis. ....	44
Figura 17 - Comportamento típico da velocidade para o regime turbulento. ....	47
Figura 18 - Esquema de tratamentos de um planejamento fatorial completo do tipo 2-2. ....	57
Figura 19 - Esquema de um delineamento composto central rotacional. ....	58
Figura 20 - Esquema da geometria base do hidrociclones. ....	59
Figura 21 - Geometria do hidrociclone base. ....	62
Figura 22 - Vista frontal das malhas do teste: (a) 1 (b) 2 e (c) 3 de acordo com a Tabela 10. ....	63
Figura 23 - Porção superior da malha 2. ....	63
Figura 24 - Locais de avaliação do perfil de velocidades (linhas amarelas). ....	64
Figura 25 - Modelos geométricos do planejamento DCCR de acordo com a Tabela 12. ....	67
Figura 26 - Perfil de velocidades tangenciais para o óleo na linha 1. ....	71
Figura 27 - Perfil de velocidades tangenciais para o óleo na linha 2. ....	72
Figura 28 - Perfil de velocidades tangenciais para o óleo na linha 3. ....	72
Figura 29 - Análise de efeitos para eficiência granulométrica. ....	76
Figura 30 – Indicativos de confiabilidade. (a) Teste de normalidade. (b) Resíduos contra valores preditos. ....	82
Figura 31 - Diagrama de Pareto para $R_f$ . ....	83
Figura 32 - Superfície de resposta para eficiência granulométrica. ....	80
Figura 33 - Análise de efeitos para razão de fluido. ....	81
Figura 34 – Indicativos de confiabilidade. (a) Teste de normalidade. (b) Resíduos contra valores preditos. ....	82
Figura 35 - Diagrama de Pareto para $R_f$ . ....	83
Figura 36 - Superfície de resposta para razão de fluido. ....	84
Figura 37 - Aplicação da função desirability. ....	86
Figura 38 - Geometria e malha do hidrociclone otimizado. ....	87
Figura 39 - Curva de eficiência granulométrica reduzida. ....	88
Figura 40 - Regressão linear para obtenção do parâmetro n. ....	89

Figura 41 - Distribuição de eficiência total reduzida em função da distribuição granulométrica da alimentação.....	90
Figura 42 - Perfis de velocidade tangencial para as simulações com altos e baixos resíduos na linha 1.....	92
Figura 43 - Perfis de velocidade tangencial para as simulações com altos e baixos resíduos na linha 2.....	92
Figura 44 - Perfis de velocidade tangencial para as simulações com altos e baixos resíduos na linha 3.....	93
Figura 45 - Perfis de velocidade tangencial (a) e de pressão (b) plotados no plano central do hidrociclone ótimo. ....	95
Figura 46 - Linhas de corrente relativas à fase primária (óleo) partindo das seções de entrada. ....	96
Figura 47 - Distribuições de fração volumétrica da fase dispersa na porção superior do hidrociclone para diâmetros de gota de: (a) 90 (b) 50 e (c) 30 micrômetros. ....	97

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Análise elementar do óleo cru. Adaptado de: Thomas et. al. (2001).....	5
Tabela 2 - Frações típicas do petróleo. Adaptado de: Thomas et al. (2001) .....	5
Tabela 3 - Especificações a serem atingidas no processamento primário. Fonte: Kunert et al. (2007) .....	14
Tabela 4 - Famílias de hidrociclones. Fonte: Cruz apud Araújo (2015). .....	32
Tabela 5 - Termos do modelo RSM. ....	50
Tabela 6 - Coeficientes empregados no modelo RSM. ....	50
Tabela 7 - Tipos de erro em testes de hipóteses. ....	53
Tabela 8 - Valores das variáveis geométricas do hidrociclone base. ....	60
Tabela 9 - Condições de operação para o hidrociclone.....	61
Tabela 10 - Malhas utilizadas no teste de independência. ....	62
Tabela 11 - Níveis dos fatores para o delineamento. ....	65
Tabela 12 - Desenho experimental.....	66
Tabela 13 - Teste de malha: eficiência de separação e razão de fluido.....	73
Tabela 14 - Matriz de experimentos após as corridas. ....	75
Tabela 15 - ANOVA do modelo para G.....	77
Tabela 16 - Coeficientes do modelo de regressão para G. ....	79
Tabela 17 - ANOVA para o modelo de $R_f$ . ....	81
Tabela 18 - Coeficientes do modelo de regressão para $R_f$ .....	84
Tabela 19 - Índices de "desejabilidade" para eficiência granulométrica.....	85
Tabela 20 - Índices de desejabilidade para razão de fluido.....	85
Tabela 21 - Níveis ótimos. ....	87
Tabela 22 - Distribuição de eficiência de granulométrica para o hidrociclone otimizado. ....	88
Tabela 23 - Valores de eficiência granulométrica e razão de fluido para as simulações comparadas.....	94

## NOMENCLATURA

$d'_{50}$	diâmetro da partícula que é separada com 50% de eficiência;
$C_{ij}$	adição de momento devido à convecção;
$D_c$	diâmetro da seção cilíndrica do hidrociclone;
$D_i$	diâmetro do duto de alimentação;
$D_{L,ij}$	adição de momento devido à difusão viscosa;
$D_o$	diâmetro do tubo de <i>overflow</i> ;
$D_{T,ij}$	difusão turbulenta (equação dos tensores de Reynolds);
$D_{T,ij}^T$	termo de Difusão Turbulenta (equação dos tensores de Reynolds);
$D_u$	diâmetro do <i>underflow</i> ;
$d_p$	diâmetro de gotas;
$E_T$	eficiência total do hidrociclone;
$E_{T'}$	eficiência total reduzida do hidrociclone;
$G$	eficiência granulométrica;
$G'$	eficiência granulométrica reduzida;
$k$	parâmetro do modelo RRB;
$L_1$	comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone;
$m$	parâmetro do modelo RRB;
$n$	parâmetro da equação de $G'$ ;
$P_{ij}$	adição de momento devido ao termo de produção;
$Q_o$	vazão volumétrica de óleo na entrada do hidrociclone;
$Q_a$	vazão volumétrica de água na entrada do equipamento;
$Q_t$	vazão volumétrica total (óleo + água);
$R_f$	razão de fluido (vazão vol. de óleo no overflow / vazão vol. de óleo na entrada);
$l$	comprimento do <i>vortex-finder</i> do hidrociclone;
$\varepsilon_{ij}$	tensores de dissipação viscosa;
$\Theta$	ângulo da seção cônica do hidrociclone;
$\mu$	viscosidade dinâmica do fluido;
$\mu_t$	viscosidade turbulenta.
$\rho$	densidade do fluido;

$\rho_q$

densidade da fase q;

## Capítulo I – Introdução

De acordo com dados do boletim anual de exploração e produção de petróleo e gás natural do Ministério das Minas e Energia (2017), no ano de 2016, superou-se a marca de 1 milhão de barris de petróleo para a média de produção diária relativa aos reservatórios situados na província do Pré-Sal. Para a exploração de óleo e gás nos campos da camada pré-sal, foram necessários robustos desenvolvimentos tecnológicos para superar os enormes desafios inerentes à extração de hidrocarbonetos em elevadas lâminas d'água. Os atuais rumos da progressão científico-tecnológica atrelada à produção de petróleo e gás natural apontam para a consolidação de técnicas e metodologias que viabilizem a implantação de sistemas de processamento subsea em extensões cada vez mais amplas, isto é, a transferência dos procedimentos que caracterizam o chamado processamento primário dos fluidos produzidos de instalações na superfície marítima ou terrestre para o solo marinho. Esta transferência visa a expandir as fronteiras da atividade extrativa, de modo a se alcançar reservatórios em áreas mais remotas, em águas ultra profundas e a grandes distâncias da costa.

A trajetória que se estabelece no sentido da implementação das tecnologias de processamento submarino passa pela utilização de equipamentos responsáveis por conduzir as operações necessárias que sejam compactos e apresentem altas performance e confiabilidade. Neste sentido, têm-se os equipamentos ciclônicos constituindo ótimas opções para etapas de separação gás-líquido e líquido-líquido necessárias à obtenção dos hidrocarbonetos produzidos. Em comparação aos tradicionais tanques de separação gravitacional empregados em instalações na superfície, hidrociclones possuem demandas substancialmente inferiores de área da planta de processo como consequência dos reduzidos tempos de residência vinculados à sua performance, o que, por sua vez, decorre do princípio de funcionamento no qual se pautam – a separação de fases explorando a diferença de densidades por meio da aplicação de um campo centrífugo milhares de vezes superior ao campo gravitacional. Além disto, o referido equipamento não dispõe de partes móveis, sendo de simples construção e operação, não requerendo manutenções frequentes. (SILVA, 2013; SVAROVSKY, 2000)

O advento de ferramentas de Fluidodinâmica Computacional (CFD), em conjunto com o aumento da velocidade de processamento e da capacidade de armazenamento, levou ao estabelecimento de uma nova via para o tratamento de problemas que envolvam

escoamentos por intermédio do uso de abordagens numéricas, exibindo uma vasta gama de aplicações, incluindo o projeto de equipamentos para processos industriais. (PATANKAR, 1980)

O presente projeto apresenta como principal finalidade desenvolver um hidrociclone para o processamento de dispersões do tipo água em óleo para compor sistemas de separação submarina instalados em campos de exploração novos. Para a consecução de tal objetivo, foram empregadas simulações numéricas de CFD representativas da execução de ensaios que seguem a aplicação de um método de delineamento experimental concernente à otimização geométrica do equipamento em questão em relação a seus parâmetros de desempenho, os quais determinam sua capacidade separativa. Complementarmente, foram avaliadas características fluidodinâmicas e de performance do dispositivo resultante da otimização.



## Capítulo II – Fundamentação Teórica

### II.1 – O Petróleo e O Pré-Sal

#### II.1.1 – Petróleo: Visão Geral e Características

Descrito por Thomas et. al. (2001) como uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com odor característico e cor variando do preto ao castanho-claro quando no estado líquido, o petróleo iniciou sua era como fonte energética com a descoberta de que sua destilação leva a produtos, como o óleo combustível, capazes de substituir, levando a margens de lucro sensivelmente maiores, o querosene advindo do carvão e o óleo de baleia, antes empregados hegemonicamente em iluminação. A invenção dos motores a gasolina e a diesel, derivados do petróleo, acarretou expressivos incrementos de lucro às atividades ligadas à busca por petróleo, contribuindo para a completa sustentação de sua afirmação na sociedade moderna.

Cumprido destacar a relevância dos desenvolvimentos em tecnologia referentes às técnicas de perfuração no tocante à viabilização da ampliação da capacidade produtiva de petróleo. A introdução de melhorias na qualidade do aço, projetos de brocas e avanços nos métodos de perfuração proporcionou a multiplicação de poços e a produção a partir de profundidades superiores a 10.000 metros, resultados também oriundos de contribuições propiciadas pelos progressos concomitantes relacionados à elaboração estruturas marítimas para o porte dos equipamentos utilizados na prospecção, incluindo diferentes tipos de embarcações e plataformas. (THOMAS et. al., 2001)

O petróleo consiste em uma mistura de hidrocarbonetos e de compostos orgânicos nitrogenados, sulfurados e oxigenados, contendo frações de organometálicos e de matéria inorgânica. Sua formação se processa no decorrer de extensos períodos temporais, atingindo-se a ordem de milhões de anos, a partir do acúmulo de matéria orgânica de origem animal e vegetal submetida a condições de ampla severidade localizado em camadas mais internas da crosta terrestre. Denominados de rochas reservatório, exibindo uma estrutura porosa, os depósitos naturais de óleo e gás se situam sob terra ou mar, onde o petróleo ocorre, majoritariamente, na forma líquida.

Quando dos processos de exploração petrolífera, em face às expressivas quedas de pressão experimentadas ao longo do trajeto em direção à superfície, sofrendo perdas de carga adicionais devido a distintos acidentes existentes (como válvulas), componentes

de baixo peso molecular solubilizados no petróleo migram para a fase gasosa. Apesar de não se tratarem de constituintes intrínsecos da mistura petrolífera, água, na realidade, solução salina (ou salmoura), a qual se encontra presente no próprio reservatório ou decorre de reinjeções no campo exploratório como mecanismo de recuperação secundária de óleo, e sedimentos, oriundos das formações rochosas ou de processos de corrosão e incrustação, acompanham a produção de óleo e gás inevitavelmente. Desta maneira, as correntes obtidas a partir dos poços produtores de petróleo carregam compostos que se apresentam nos estados sólido, líquido e gasoso, o que gera dispersões sujeitas a intensos graus de agitação durante a recuperação. (BRASIL *et al.*, 2011)

O petróleo se exhibe com diferentes aspectos a depender do campo do qual provém, o que reflete distintas propriedades físico-químicas, as quais, por sua vez, se devem às variadas proporções dos tipos de compostos presentes. Alguns ocorrem com coloração mais escura, altamente viscosos e densos e liberando pouco ou nenhum gás ao passo que outros, mais claros, com reduzidas viscosidade e densidade e emanando quantitativos significativos de gás. (THOMAS *et. al.*, 2001).

No que diz respeito à composição química elementar, no entanto, os petróleos se apresentam com diminuta variabilidade, visto que há sempre predominância de carbono e hidrogênio como principais responsáveis pela massa que possuem, exprimindo o fato de consistirem, em essência, em séries homólogas de hidrocarbonetos. Heteroátomos como nitrogênio, enxofre, oxigênio e metais respondem por uma parcela minoritária da composição. Em contrariedade ao caráter elementar mais homogêneo, tem-se, de um modo geral, uma ampla discriminação para os petróleos no tocante às razões entre as classes de substâncias componentes, que, diferenciadas segundo um aspecto macro, se dividem em: hidrocarbonetos propriamente ditos e não-hidrocarbonetos. (BRASIL *et al.*, 2011)

Na Tabela 1, ilustra-se a análise elementar de um óleo cru típico, retratando a predominância dos elementos carbono e hidrogênio em termos composicionais para petróleos de características macroscópicas substancialmente variáveis.

Tabela 1 - Análise elementar do óleo cru. Adaptado de: Thomas et. al. (2001).

<b>Hidrogênio</b>	11 – 14%
<b>Carbono</b>	83 – 87%
<b>Enxofre</b>	0,06 – 8%
<b>Nitrogênio</b>	0,11 – 1,7%
<b>Oxigênio</b>	0,1 – 2%
<b>Metais</b>	até 0,3%

No que concerne ao grupo dos hidrocarbonetos, figuram, no petróleo, as substâncias classificadas como alcanos ou parafinas, cicloalcanos ou naftênicos, insaturados (olefinas e alcinos) e aromáticos. Todas as classes ocorrem ao longo de toda a faixa de pontos de ebulição do petróleo, verificando-se a tendência de, nas frações mais leves, predominarem hidrocarbonetos parafínicos, enquanto que, nas mais pesadas, encontram-se maiores teores de naftênicos e aromáticos. Nos derivados com temperaturas de ebulição mais elevadas, tendem a se concentrar espécies do óleo cru de maior complexidade estrutural, havendo porções naftenoaromáticas, poliaromáticas e que dispõem de heteroátomos em suas moléculas.

A Tabela 2 dispõe a relação entre as frações tipicamente obtidas no processamento de refino do óleo cru e suas faixas de ebulição, composição quanto ao tamanho de cadeia e destinos aos quais se aplicam:

Tabela 2 - Frações típicas do petróleo. Adaptado de: Thomas *et al.* (2001)

<b>Fração</b>	<b>Temperatura de ebulição (°C)</b>	<b>Composição aproximada</b>	<b>Usos</b>
<b>Gás residual</b>	Até 40	C <sub>1</sub> – C <sub>2</sub>	Gás combustível.
<b>Gás liquefeito de petróleo – GLP</b>		C <sub>3</sub> – C <sub>4</sub>	Gás combustível engarrafado, uso comercial e doméstico.
<b>Gasolina</b>	40 – 175	C <sub>5</sub> – C <sub>10</sub>	Combustível de automóveis. Solvente.

<b>Querosene</b>	175 – 235	C <sub>11</sub> – C <sub>12</sub>	Iluminação. Combustível de aviões a jato.
<b>Gasóleo leve</b>	235 – 305	C <sub>13</sub> – C <sub>17</sub>	Diesel. Fornos
<b>Gasóleo pesado</b>	305 – 400	C <sub>18</sub> – C <sub>25</sub>	Combustível. Matéria-prima para lubrificantes.
<b>Lubrificantes</b>	400 – 510	C <sub>26</sub> – C <sub>38</sub>	Óleos lubrificantes
<b>Resíduo</b>	Acima de 510	C <sub>38</sub> +	Asfalto. Piche. Impermeabilizantes.

O comportamento das diferentes frações se atrela às propriedades físico-químicas que as caracterizam, determinadas, por evidente, pela distribuição dos tipos de hidrocarbonetos correntes em suas composições. Como função do processamento que sofrem e do uso ao qual se destinam, destacam-se as propriedades e características de: densidade, viscosidade, ponto de fluidez, estabilidade termo-oxidativa, qualidade de queima e faixa de ebulição.

No que tange aos constituintes não-hidrocarbônicos, constantes em todo o intervalo de ebulição do petróleo, conforme tratado por Brasil *et al.* (2011), tem-se:

- Substâncias majoritariamente formadas por carbono e hidrogênio que contêm heteroátomos em sua estrutura, englobando compostos de enxofre (por exemplo, tiofeno e sulfeto de hidrogênio), de nitrogênio (por exemplo, piridina e pirrol), de oxigênio (por exemplo, fenol) e organometálicos diversos. Configuram-se como contaminantes do petróleo em razão da conferência de características indesejáveis aos derivados que proporcionam, tais quais emissão de poluentes quando de sua combustão, comprometimento de desempenho e favorecimento de processos corrosivos em unidades de refino.
- Asfaltenos e resinas, frações mais pesadas do cru, apresentando altas massas molares, expressiva complexidade em termos estruturais e heteroátomos em suas moléculas, a partir das quais fabricam-se asfalto e óleos combustíveis pesados.

- Contaminantes inorgânicos como água, sais e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), cuja presença incorre em numerosos impactos negativos relacionados ao transporte, armazenamento e processamento das correntes fluidas de produção geradas na exploração de óleo e gás.

É imprescindível que se proceda com etapas de qualificação, que se baseiam em critérios determinados, dos petróleos explorados de diferentes tipos com a finalidade de oferecer fundamentação à avaliação econômica e técnica do processamento a ser executado. Para tanto, conduzem-se procedimentos analíticos que visam a definir ou mensurar propriedades intrínsecas e aspectos qualitativos e quantitativos dos óleos. (BRASIL *et al.*, 2011).

A partir do exame das características físicas, que envolve a aferição de propriedades como densidade, viscosidade e ponto de fluidez<sup>1</sup>, extraem-se informações a respeito do potencial de produção dos distintos derivados e das dificuldades associadas à movimentação, estocagem e processamento. Qualitativamente, avalia-se a composição do óleo cru em função das proporções das classes de hidrocarbonetos presentes e dos teores de heteroátomos e de contaminantes inorgânicos, de forma a se averiguar sua adequação à obtenção de frações de mais alto ou mais baixo valor agregado. Por fim, segue-se com a submissão de cru em análise à destilação com fins de se compor o que é conhecido por frações básicas de refino, viabilizando-se a verificação dos rendimentos dos diversos derivados que resultarão do processamento nas refinarias, bem como a especificação de propriedades físicas e químicas. (BRASIL *et. al.*, 2011)

Em particular, em se tratando da caracterização química do petróleo, tem-se os testes de nitrogênio e enxofre, os quais revelam a extensão do processo de refino ao qual se submete o petróleo necessária, a análise cromatográfica para medida dos teores dos compostos saturados, aromáticos e asfaltenos e resinas (teste SARA) e a mensuração da concentração de água, sais e sedimentos por meio do chamado teste de BS&W (do inglês, *basic sediments and water*).

## II.1.2 – O Pré-Sal

Denomina-se de pré-sal a sequência de rochas sedimentares cuja formação remonta há mais de 100 milhões de anos e que se localizam na região geográfica

---

<sup>1</sup> Temperatura mínima na qual o petróleo que se analisa ainda escoar.

decorrente da segregação do megacontinente da Gondwana<sup>2</sup>. Em particular, em face à progressão do processo deriva continental, a separação entre as porções relativas aos continentes sul americano e africano, iniciada por volta de 150 milhões de anos atrás, conduziu à geração de grandes depressões, nas quais se depositaram as rochas geradoras do petróleo de pré-sal e que, por seu turno, originaram extensos lagos, onde, em razão de o curso dos rios se destinar às localidades de menor altitude, volumosos quantitativos de material orgânico se acumularam. (PETROBRÁS, 2017)

No decorrer de milhões de anos, com o oceano Atlântico então se formando, sucedeu-se o estabelecimento de uma camada de sal, que atualmente conta com mais de 2 mil quilômetros de espessura, retendo a matéria orgânica acumulada, transformada em hidrocarbonetos mediante a ação de processos térmicos e químicos após períodos suficientemente longos. (PETROBRÁS, 2017)

A chamada província do Pré-Sal consiste em uma área situada no litoral entre os estados do Espírito Santo e Santa Catarina, compreendendo um polígono com cerca de 800 km de extensão por 200 km de largura. Na Figura 1, encontra-se representada a região. Em tal zona, ocorrem as rochas capazes de gerar e armazenar petróleo na então descrita camada pré-sal.

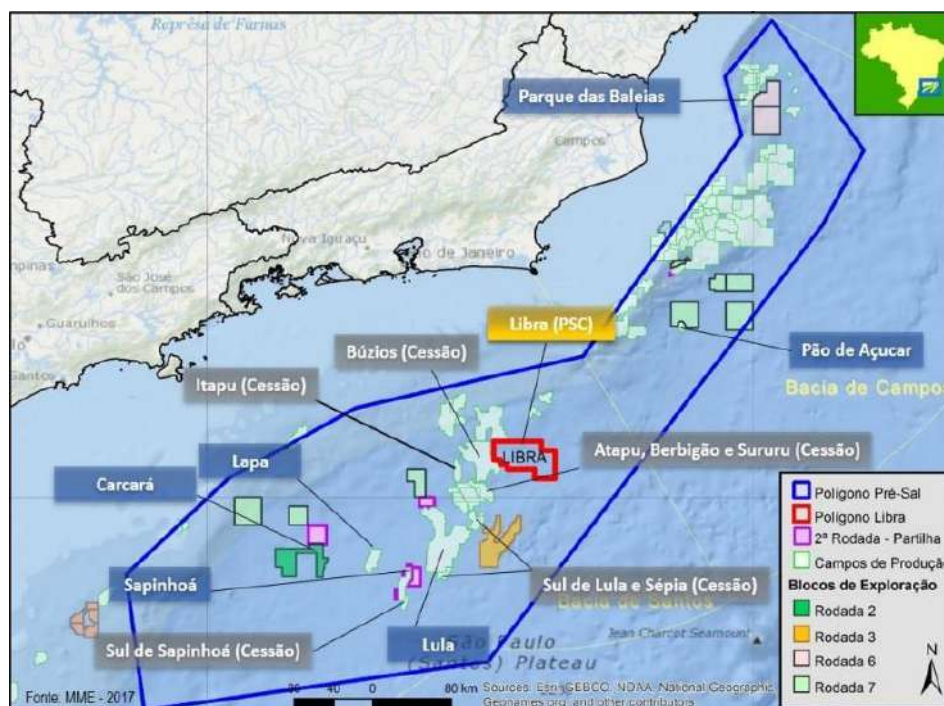


Figura 1 - A província do pré-sal.  
Fonte: MME (2017)

<sup>2</sup> Em conjunto à Laurásia, compõe os megacontinentes oriundos da separação da Pangeia, agregando em sua extensão os territórios hoje correspondentes à América do Sul, África, Austrália e Índia.

A Figura 2 ilustra a conformação existente entre as camadas pós-sal, sal e pré-sal no interior da crosta terrestre.

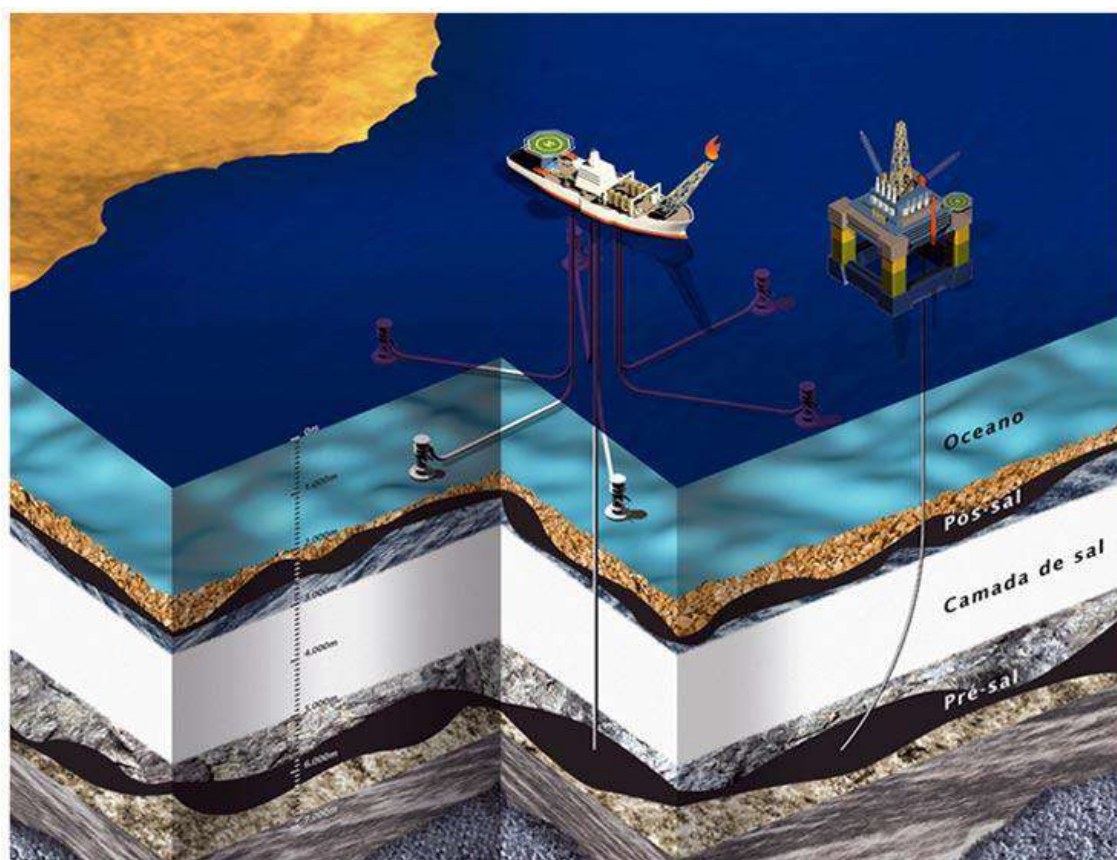


Figura 2 - Disposição entre as camadas pós-sal, sal e pré-sal.  
Fonte: <https://www.estudopratico.com.br/a-camada-pre-sal/>

Impulsionando de maneira expressiva o desenvolvimento tecnológico no segmento industrial de energia, a descoberta do pré-sal, camada geológica constituída de acúmulos de óleo leve, com alta qualidade e valor de mercado, e as subsequentes explorações através dos poços perfurados acarretaram elevados níveis de produção apesar dos desafios intrínsecos. Estes se associam aos fatores dificultadores inerentes à atividade exploratória de petróleo e gás em águas profundas e ultra profundas, onde se situam os campos da província do Pré-Sal. Vislumbrando a elucidação no que concerne aos aspectos relacionados ao cenário vivenciado pela indústria de óleo e gás brasileira quanto à camada pré-sal, apresentam-se dados e constatações disponibilizados pela Petrobrás (2017) em seu sítio eletrônico.

A partir da primeira descoberta da ocorrência de petróleo na camada pré-sal, que se deu no campo de Lula, localizado na bacia de Santos, atingiu-se a cifra de 1 milhão de

barris de petróleo diários em um período inferior a uma década, em que se passou de 55,8 mil de barris por dia em 2010 para 1.017,9 mil ao final de 2016, tendo-se a evolução anual da média produtiva retratada no gráfico constante na figura 3. (MME, 2017) A Petrobrás havia alcançado, anteriormente, a mesma marca somente após 45 anos desde quando iniciou suas operações. Ainda, é notável que a produção mencionada adveio das extrações realizadas em 52 poços nos campos do pré-sal, valor consideravelmente reduzido se comparado à produção diária de 500 mil barris por dia a partir das atividades em mais de 4 mil poços em 1984 pela companhia. Tem-se, nos dias atuais, uma média de volume explorado de 25 mil barris por dia nos poços do pré-sal na bacia de Santos. Vale também ressaltar as substanciais diminuições experimentadas pelo custo médio unitário de produção de petróleo de tal camada, variando de U\$ 9,1 por barril de óleo equivalente<sup>3</sup> em 2014 para a marca de U\$ 8 no primeiro trimestre de 2016. (PETROBRÁS, 2017)

O conjunto de resultados apontados revelam uma crescente elevação da produtividade de óleo e gás na camada pré-sal, configurando a consequência dos esforços, parcerias e investimentos direcionados aos avanços e inovações tecnológicas que permitem uma progressiva superação dos grandes desafios envolvidos na extração e produção nos referidos campos de petróleo.

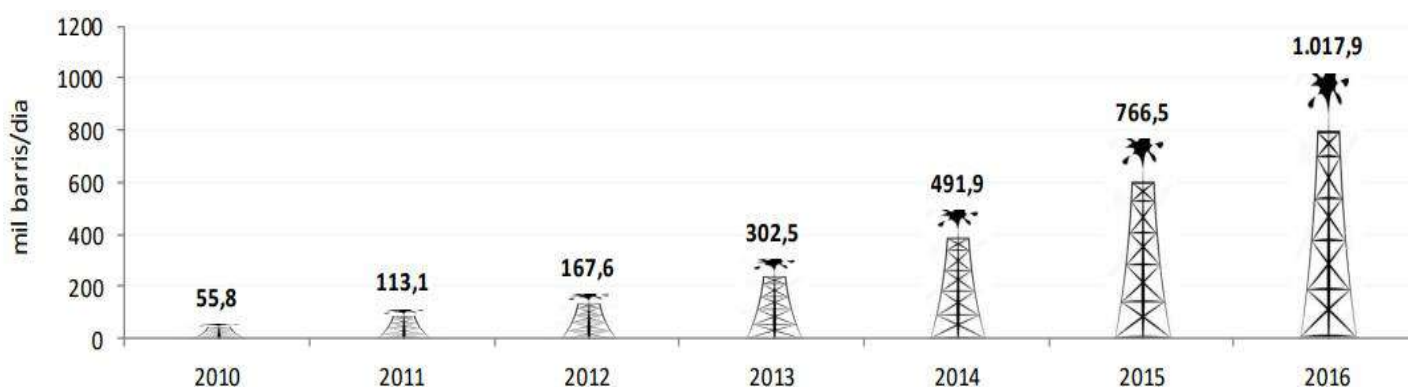


Figura 3 – Gráfico da evolução da produção anual nos reservatórios do pré-sal entre 2010 e 2016.  
Fonte: ANP (2017).

## II.2 – Dispersões Água-Óleo

Em decorrência das condições requisitadas para a exploração e da configuração apresentada pela distribuição de fases nos reservatórios, tem-se não somente a produção

---

<sup>3</sup>



de hidrocarbonetos (óleo e gás), mas também de água e sedimentos, incluindo areia e particulados oriundos de incrustações e corrosões nas linhas produtivas. A água constitui a impureza que acompanha a produção petrolífera que incorre em maiores prejuízos para o processo exploratório e em etapas subsequentes do processamento de óleo e gás iniciadas pelo refino. Em particular, a parcela aquosa dos fluidos obtidos não possui valor econômico e contém contaminantes, tais quais sais diversos, micro-organismos e sólidos inorgânicos, solubilizados ou em suspensão, os quais exibem elevado potencial de ocasionar danos aos dutos de produção e transporte, bem como a equipamentos e instrumentos instalados em unidades de armazenamento e refino, induzindo processos corrosivos, deposição de sólidos e formação de hidratos, em que a última, exemplificada na Figura 4 a seguir, se dá em condições de baixas temperaturas e altas pressões a partir de vapor d'água em combinação a CO<sub>2</sub> e hidrocarbonetos de baixa massa molar. (KNUERT et al., 2007)



Figura 4 - Entupimento de tubulação devido à formação de hidrato.  
Fonte: Kunert *et al.* (2007)

São duas as fontes da água produzida em combinação às correntes de hidrocarbonetos. Têm-se a água de formação, de ocorrência natural nos reservatórios de petróleo, e a água introduzida em função da aplicação de métodos de recuperação secundária de óleo e gás, como a injeção vapor d'água ou água líquida para manutenção do nível de pressão de um reservatório. O conteúdo de água produzida define um relevante indicador acerca da maturidade dos poços de produção. Ao longo do tempo de operação

de um poço petrolífero, os níveis de água se apresentam pouco expressivos no início da exploração, passando a representar a quase totalidade da produção fluida ao final de sua vida útil. (THOMAS *et al.*, 2001)

Originalmente separados nos reservatórios de petróleo, óleo e água dão origem a dispersões uma vez iniciado o processo exploratório de um reservatório. A intensa agitação provocada pelo bombeamento durante o processo de elevação e a forte despressurização decorrente das perdas de carga sofridas proporcionam expressivos graus de mistura às fases líquidas em questão, o que contribui para criarem-se condições favoráveis à formação de emulsões.

Atribui-se a denominação de emulsão à mistura que resulta do íntimo contato ocasionado por uma forte agitação de fases imiscíveis, em que uma passa a se encontrar sob a forma de gotículas (ou bolhas) dispersas na outra. Na indústria do petróleo, ocorrem, frequentemente, os tipos de emulsão/dispersão: óleo-em-água (O/A) e água-em-óleo (A/O). Vale apontar que a presença de espécies químicas conhecidas como agentes emulsificantes figura como uma condição imperativa para a formação e, principalmente, estabilização de uma emulsão. Na sua ausência, as gotas da fase dispersa tendem a se aglutinar de modo a se gerarem fases completamente segregadas, estado termodinamicamente mais favorável, dada a imiscibilidade das fases. Tais compostos dispõem de um caráter anfifílico, isto é, hidrofílico e lipofílico simultaneamente como consequência da estrutura molecular que possuem, contendo porções eletricamente carregada ou polarizada e apolar na forma de longas cadeias hidrocarbônicas, que exibem afinidade pelas fases aquosa e oleosa, respectivamente. Os emulsificantes, então, migram para a interface água-óleo recobrando a fase dispersa pela formação do que se define como película ou filme interfacial. Na composição do petróleo, há substâncias que desempenham a função descrita na estabilização de dispersões e emulsões, que se tratam dos asfaltenos e das resinas. (KUNERT *et al.*, 2007)

As metodologias de quebra de emulsões/dispersões se baseiam no aprimoramento de condições que facilitam a progressão dos mecanismos de desestabilização, que se traduzem nos processos de floculação (formação de agregados), coalescência (ampliação de tamanho) e sedimentação das gotículas dispersas. A partir das relações expressas na lei de Stokes (equação 2.1), identificam-se os princípios em que se fundamentam as principais técnicas para separação de emulsões/dispersões. O uso de agentes desemulsificantes e o aumento do teor de disperso constituem medidas que favorecem a coalescência, o que leva à ampliação do diâmetro das gotas, que sedimentam mais

prontamente. O aquecimento da mistura reduz a viscosidade da fase contínua, permitindo o alcance de maiores taxas de decantação. O emprego de campos elétricos ou centrífugos promovem a segregação pela intensificação do campo de força através do qual as gotículas sedimentam. (KUNERT *et al.*, 2007)

$$v = \frac{(\rho_a - \rho_o)d^2}{18\mu} |g| \quad (2.1)$$

### II.3 – Processamento Primário de Petróleo

Define-se o processamento primário como a reunião de etapas de tratamento às quais se submetem as correntes de fluidos produzidos nas atividades de exploração de óleo e gás que precedem os processos de maior complexidade conduzidos nas refinarias. Conforme já mencionado anteriormente, além de componentes não hidrocarbonetos presentes em diversos derivados em teores variados a depender da proveniência do petróleo considerado, têm-se, em combinação ao óleo cru, porções gasosas e sólidas, bem como uma fase aquosa (livre, emulsionada e dissolvida). Dada a ocorrência intrínseca de tais impurezas, torna-se essencial a execução do chamado processamento primário de petróleo. (BRASIL *et al.*, 2011)

Com a aplicação do processamento primário, objetiva-se tratar as correntes de óleo, água e gás produzidas adequando-as aos requisitos de qualidade que se impõem às respectivas destinações na cadeia produtiva da indústria petrolífera. Em particular, uma vez separadas, a corrente de gás natural necessita sofrer remoção de impurezas tais quais gás sulfídrico, dióxido de carbono e vapor d'água, além de compressão para ajuste dos níveis de pressão para armazenamento e transporte, a corrente de petróleo requer um tratamento fino para retirada de água emulsionada e dos sais nela solubilizados, e a corrente aquosa precisa ter seu nível de óleos e graxas corrigido em consonância às exigências regidas por regulamentações ambientais específicas no que se refere ao seu descarte e injeção em poços. Na tabela 3, relacionam-se indicadores e suas especificações para as três correntes de produção em questão (KUNERT *et al.*, 2007)

Tabela 3 - Especificações a serem atingidas no processamento primário. Fonte: Kunert *et al.* (2007)

Corrente	Parâmetro	Especificação
Gás	Teor de água	Máx. 3 a 5 lb/Mscf
	Teor de H <sub>2</sub> S	Máx. 10 a 15 ppm
	Teor de inertes, CO <sub>2</sub>	Máx. 4% vol
Óleo	BS&W	Máx. 1% vol p/ refino
		Máx. 0,5% vol p/ exportação
	Teor de sais	Máx. 570 mg/L p/ refino Máx. 285 mg/L p/ exportação
Água	TOG	Máx. 20 ppm
	Temperatura	Máx. 40°C

Seja a esquematização simplificada de uma planta típica de processamento primário apresentadas na figura 5. Construídas como sendo instalações terrestres ou marítimas, denominam-se tais plantas como facilidades de produção. Diferentes configurações são admitidas em função do que é demandado a partir das características do reservatório que se considera e de estudos de viabilidade técnico-econômica. Projetam-se, assim facilidades de processamento desde as mais simples, contando apenas com a separação bifásica gás-líquido, até as de maior complexidade, nas quais, além de se promover a separação trifásica gás/óleo/água, realizam-se o tratamento e compressão do gás, o tratamento do óleo separado com tratadores eletrostáticos e o condicionamento da água produzida para descarte ou reinjeção nos poços.

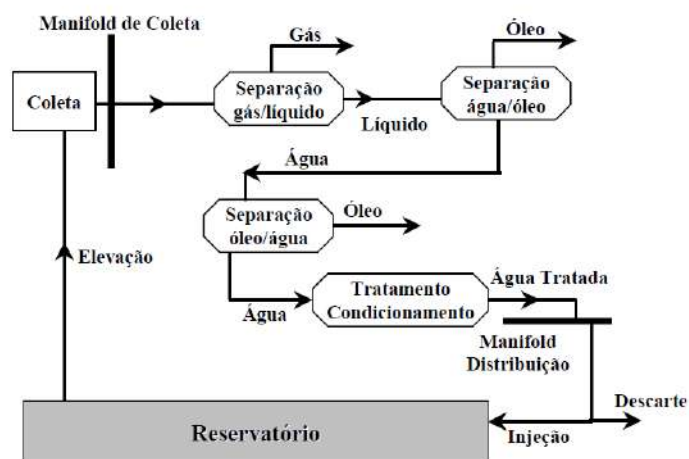


Figura 5 - Esquematização de uma planta de processamento primário de fluidos típica.  
 Fonte: Kunert et al., 2007.

## II.4 – Sistemas de Separação Submarina

Os sistemas de separação submarinos, alternativamente designados *subsea* ou no fundo do mar, se encontram atrelados a uma das categorias tecnológicas que compõem a área de pesquisa e desenvolvimento em exploração de óleo e gás *offshore* concernente ao processamento e produção *subsea*. Visando ao estabelecimento de uma definição, toma-se tais sistemas como o conjunto de etapas de processos empregados com a finalidade de, em extensão mais ampla ou diminuta, submeter a produção fluida advinda dos reservatórios marítimos a quaisquer níveis de processamento ou condicionamento em instalações situadas no solo marinho, precedendo eventuais tratamentos a jusante em estruturas *topside offshore*, isto é, plataformas fixas ou flutuantes na superfície do mar, ou, até mesmo, substituindo-as. (MARJOHAN, 2012)

O atual cenário exploratório mundial se traduz na busca pela viabilização técnica e econômica das tecnologias submarinas de produção. Tal quadro constitui uma consequência da crescente depleção das reservas petrolíferas associadas a menores lâminas d'água e distâncias à costa, o que confere relevância à dedicação de esforços para os desenvolvimentos tecnológicos relacionados à extração de óleo em águas mais profundas, em condições mais drásticas, bem como para incrementar a eficiência econômica e ambiental da exploração nos campos já em operação.

Em concordância ao elencado por Marjohan (2012) e Silva (2013), têm-se as tecnologias apresentadas a seguir compondo o conjunto de processos englobados no que

se entende por processamento submarino. Cumpre ressaltar o caráter incipiente da maior parcela de tais desenvolvimentos, ainda sendo objeto de numerosas pesquisas desempenhadas por parcerias entre companhias do setor de energia e o meio acadêmico, que objetivam consolidar técnicas economicamente viáveis e ambientalmente seguras.

- Sistemas de separação gás-líquido: contêm separadores responsáveis por segregar a fração gasosa da corrente de produção a partir dos poços, destinando-a à exportação, aplicação em *gas lift* ou injeção em reservatórios e encaminhando a porção líquida a uma instalação *topside*.
- Sistemas de separação água-óleo: por meio de uma sequência de procedimentos, executa-se a separação primária das três principais fases, gasosa, oleosa e de água e sedimentos, da corrente produzida nas dependências da própria facilidade submarina; conduzem-se os efluentes hidrocarbônicos resultantes diretamente à exportação no caso de os tratamentos específicos das fases individuais ocorrerem na unidade *subsea* ou para o condicionamento em uma instalação superficial fixa ou flutuante.
- Compressão e tratamento do gás: dispositivos e compressores empregados para adequação do nível de pressão e ajuste composicional da corrente gasosa, permitindo seu direcionamento para seus usos finais.
- Sistemas de bombeamento: equipamentos de bombeamento em conjunção às linhas de produção e injeção promovendo a transferência das correntes de produção e provenientes do tratamento submarino sofrido entre os poços, unidade *subsea* e facilidade *topside*, sendo projetados para impulsionar fluxos monofásicos ou multifásicos.
- Injeção de água do mar ou água produzida: captação e tratamento de água do mar para injeção em reservatórios ou reinjeção de água produzida como mecanismo de manutenção da pressão do reservatório, assegurando a produção.

Com fundamentação nos apontamentos de Økland *et al.* (2013), identificam-se os principais aspectos motivadores da implementação de sistemas de produção submarinos analisando os focos de aplicação separadamente no tangente à maturidade do campo, em que vantagens distintas se vinculam ao seu emprego em reservatórios já em exploração (*brown fields*) e novos campos petrolíferos (*green fields*). À medida que se torna mais maduro, determinado campo de óleo e gás possui um teor crescente de água em sua

produção, o que, eventualmente, configura o gargalo do processo exploratório em decorrência da complexidade conferida à recuperação de hidrocarbonetos, onerando, demasiadamente, as etapas de elevação, com a transferência excessiva de cargas não hidrocarbônicas, e processamento primário, saturando a capacidade de tratamento de água oleosa para seu descarte o reinjeção, a qual passa a ser limitante.

Em campos maduros, nos quais a produção de água já alcança níveis expressivos, a adoção dos sistemas de processamento submarino, valendo-se de uma ou mais tecnologias correspondentes, leva ao prolongamento da vida útil dos reservatórios e das unidades de produção construídas. Tal benefício decorre do fato de que, em meio a um sistema de separação *subsea*, se torna possível segregar as frações não desejadas da corrente produzida, incluindo água produzida e sedimentos, evitando a sobrecarga dos equipamentos de bombeamento, que se responsabilizarão pela elevação de hidrocarbonetos majoritariamente, compostos de interesse, a contrapressão nos poços produtores pela reinjeção da fase aquosa separada nos reservatórios e/ou *gas lift* nos poços, o comprometimento das linhas de produção e injeção em consequência de processos corrosivos e de formação de hidratos, ambos associados ao carreamento de água salgada através dos dutos utilizados na unidade produtiva, e a saturação dos módulos na instalação *topside* empregados no tratamento de água oleosa. No que se refere aos novos campos, o advento tecnológico submarino em análise expande as fronteiras relativas à exploração de hidrocarbonetos; as vantagens introduzidas pela realização de uma fração ou da totalidade das etapas componentes do processamento primário de fluidos produzidos no próprio leito marinho abrem caminho para a extração de óleo em campos localizados em águas profundas e ultra profundas, com lâminas d'água superiores a 3 mil metros, e a maiores distâncias da costa, assim como em regiões mais remotas, de difícil acesso, dada a necessidade reduzida ou completamente mitigada de efetivo em plataformas para a operação destes sistemas, que se dará sob monitoramento e controle em bases *onshore*. (SILVA, 2015; ØKLAND *et al.*, 2013)

Tal qual para os aspectos favoráveis à adesão dos sistemas submarinos de produção de óleo e gás, é imperativo que se pontuem os principais desafios a serem vencidos ao longo da trajetória percorrida no sentido da implantação e vigência das tecnologias em consideração nas atividades de exploração e produção *offshore*. Conforme destacado por Silva (2013), as barreiras impostas ao processamento submarino abrangem compromissos de: tamanho e confiabilidade dos equipamentos, em que se requerem dispositivos de construção e operação suficientemente simplificadas, com dimensões

compactas e para os quais se assegure funcionamento sem a necessidade de interrupções para manutenção e reparo por períodos extensos o bastante dada a elevada profundidade a qual se situam as unidades submarinas; segurança operacional, tanto para os operadores, que não mais se encontrariam em instalações *topside*, quanto para os ambientes marinho e terrestre adjacentes, implementando-se medidas de operação segura para evitar falhas no processo, cujos danos eventualmente causados exibem elevado potencial de originar impactos socioambientais irreversíveis; e controle de processos, ponto crucial para viabilização técnica da utilização de sistemas *subsea*, sendo de absoluta relevância a definição de estratégias de controle promissoras, capazes de regular a operação de modo a evitar falhas e garantir os níveis estabelecidos de produtividade, suportando as condições oscilatórias e abruptas da alimentação das correntes produzidas.

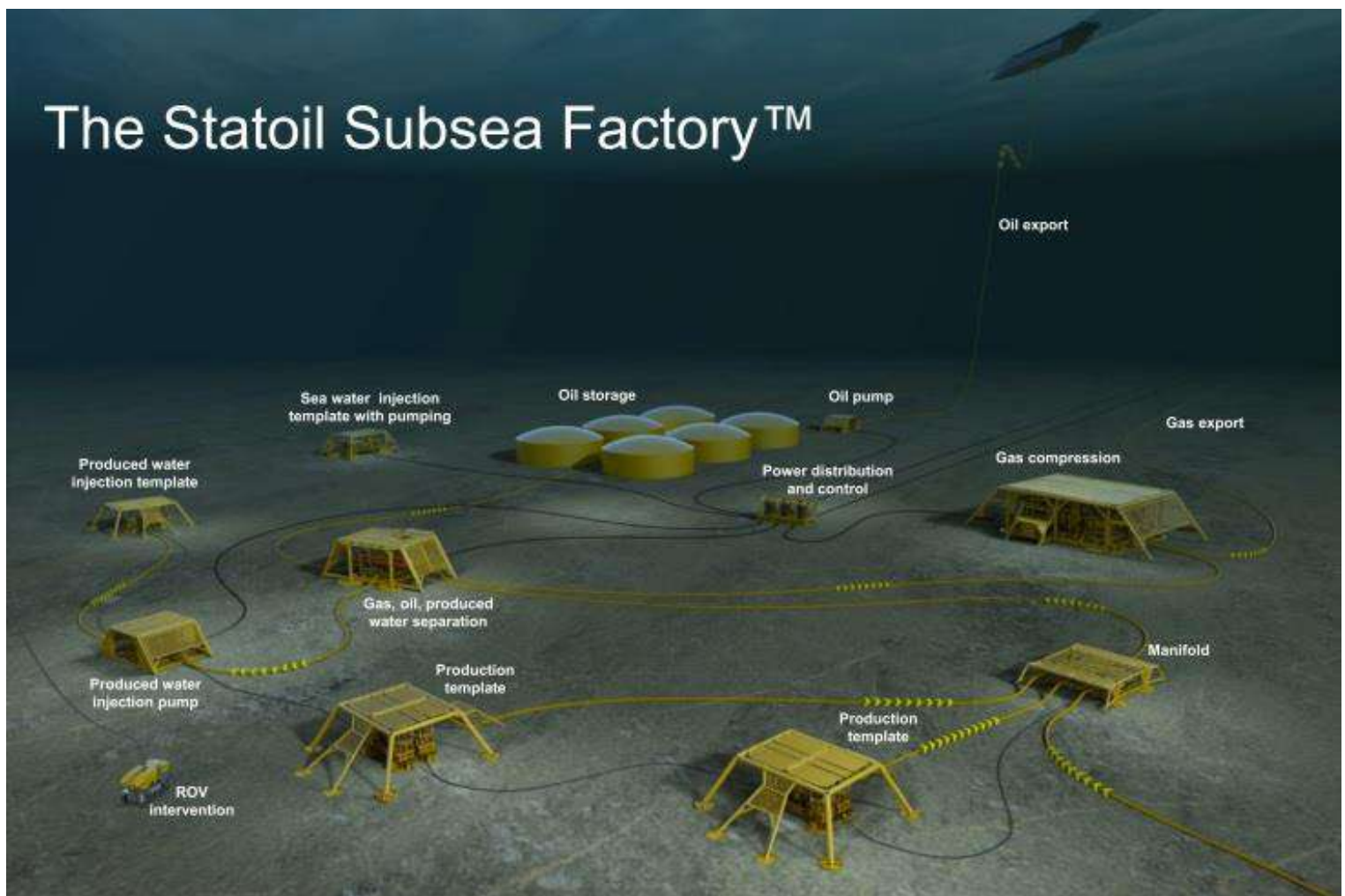


Figura 6 - Estação submarina ilustrativa da Statoil Subsea Factory™

Fonte: Økland *et al.* (2013)



Na Figura 5, fornece-se uma representação esquemática de uma estação de processamento e produção de óleo e gás situada no leito marinho. Descrevendo-a, observam-se: poços submarinos conectados a um manifold através de dutos correspondentes a linhas de produção, que carregam os fluidos produzidos a partir dos respectivos reservatórios, e/ou linhas de injeção, no interior das quais encaminham-se fluidos de *gas lift* ou para reinjeção como mecanismo de recuperação secundária; seção de separação trifásica da produção reunida e equalizada pelo manifold nas três principais fases que a compõem, gás, óleo e água com sedimentos; sistema de bombeamento da água produzida segregada para o poço de injeção associado visando à manutenção da pressão dos reservatórios explorados, o que também se consegue em função da injeção de água do mar diretamente após um condicionamento; tanques de armazenamento e dispositivos de bombeamento da fase oleosa obtida para unidades fixas ou flutuantes na superfície para ajuste fino ou diretamente à destinação a jusante do processamento primário; e sistemas de compressão e tratamento da corrente gasosa, disponibilizando-a à exportação e/ou emprego na própria estação *subsea* para auxiliar a recuperação de hidrocarbonetos. A visualização de tal esquema elucidada a necessidade de equipamentos compactos e de operação conduzida mediante sistemas de controle que garantam uma performance segura.

Vale apresentar alguns dos sistemas de processamento *subsea* que se encontram em operação como exemplificação. A Petrobrás iniciou o primeiro sistema de separação bifásica gás-líquido submarino no mundo em 2000 na bacia de Campos, empregando o VASPS (*Vertical Annular Separation and Plumping System*), o qual executa a separação da corrente gasosa, sendo mais apropriado para campos com altas razões gás/óleo na corrente produzida, visto que, em combinação a um eficiente sistema de compressão, permite que o gás separado, ou parte dele, seja diretamente injetado no reservatório, assegurando elevada produtividade. Em relação à separação trifásica, o primeiro sistema a entrar em funcionamento se localiza no campo de Troll na Noruega, explorado pela Statoil, no qual se consegue reinjetar a água produzida no reservatório e exportar a produção segregada de hidrocarbonetos (correntes de óleo e gás) à instalação *topside*. No Brasil, ao final de 2011, implantou-se o primeiro sistema deste tipo no campo de Marlim na bacia de Campos, encontrado sob uma lâmina d'água de 870 metros. (SILVA, 2015)

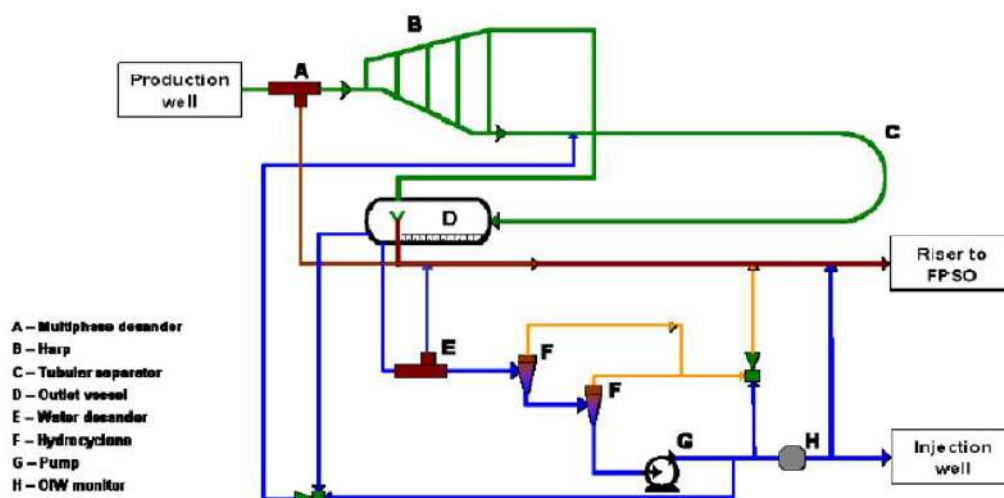


Figura 7 - Esquemática do sistema submarino do campo de Marlim.

Fonte: Orłowski (2012).

O sistema de separação água-óleo instalado no campo de Marlim na Bacia de Campos se baseia na tecnologia de *pipe separator* e seu projeto apresenta como principais parâmetros: ativação da operação ao se atingir a cifra de 65% de água produzida na corrente de produção; capacidade de processamento de 3500 m<sup>3</sup> por dia; eficiência global de separação próxima a 70%; e teores de óleo e de material particulado na água oleosa aplicada como fluido de injeção no reservatório de 100 ppm e 10 ppm, respectivamente. Na figura 7, exibe-se uma representação esquemática do processo desempenhado pelo sistema em consideração. Os fluidos produzidos seguem para um desaerador multifásico (A), responsável por separar a maior parcela de sedimentos mais grosseiros sendo arrastados, cujo efluente, que se trata de uma dispersão gás-líquido, alimenta o arranjo de tubulações conhecido como arpa (B), o qual promove a segregação do fluxo de gás natural. A corrente líquida resultante prossegue escoando através do chamado *pipe separator* (C), com 60 metros de comprimento, sucedendo-se a separação água/óleo, finalizada no tanque a jusante (D). A água separada passa por outro desaerador (E) e por uma série de hidrociclones (F) para ajuste de seus níveis de sedimentos e de óleo disperso para reinjeção no reservatório por meio de um bombeamento (G), tendo sua composição continuamente monitorada (H). Os hidrocarbonetos obtidos, gás e óleo, são encaminhados à unidade flutuante através de *risers* de produção. A operação se processa a 55 °C e 85 bars, sendo a temperatura mais baixa e a pressão mais alta em comparação ao processamento *topside*. (SILVA, 2015)

Uma vez contextualizados os desenvolvimentos associados ao processamento no leito marinho de petróleo e gás, evidencia-se a motivação para o corrente projeto. Almejando contribuir para a viabilização técnica de sistemas de separação submarinos em face às numerosas vantagens descritas e ao enfoque tecnológico recentemente voltado para a exploração de águas ultra profundas na camada pré-sal, no presente trabalho, avalia-se e otimiza-se a performance de um hidrociclone para tratamento de dispersões de água em óleo, referindo-se a uma alternativa mais compacta que os separadores gravitacionais. Comumente, concebem-se tais equipamentos nos sistemas tanto *topside* como *subsea* para o processamento de água oleosa, que consiste em uma dispersão de óleo em água.

## II.5 – Hidrociclones

Os conceitos e equacionamentos apresentados na presente seção se encontram atrelados à descrição da operação e projeto dos equipamentos pertencentes à categoria dos então chamados hidrociclones. Inicia-se explanando concisamente em relação aos sistemas particulados, levantando-se aspectos relativos à sua caracterização e à avaliação de performance dos processos de separação envolvendo-os. Procede-se centrando a análise nos hidrociclones propriamente ditos, elucidando seu princípio de funcionamento e o comportamento fluidodinâmico do escoamento desenvolvido em seu interior, bem como apontando seus principais tipos, variáveis geométricas e aplicações. Ao final, faz-se uma revisão de publicações que tratam do emprego do referido equipamento na separação líquido-líquido entre água e óleo utilizando metodologias de simulação computacional.

### II.5.1 – Sistemas Particulados: Caracterização e Eficiência de Separação

Os sistemas particulados compreendem materiais sólidos puros ou formando misturas com outras substâncias sólidas ou com materiais fluidos, submetidos a operações que englobam desde sua movimentação ou agitação até processos reacionais ou de separação. Em sua investigação, tem-se como fundamental característica a preocupação com os efeitos decorrentes das interações estabelecidas dos tipos sólido-sólido e sólido-fluido no que tange à descrição de aspectos fluidodinâmicos. Apesar de não incluírem espécies no estado sólido em sua composição, dispersões de fluidos imiscíveis nas quais

uma das fases espalha-se na outra na forma de gotículas comportam-se tais quais sistemas particulados para efeitos de modelagem, sendo mais comum, para as primeiras, a ocorrência de processos de quebra e coalescência, responsáveis pela modificação de tamanho do disperso, que possuem como análogos no caso de fases sólidas a aglomeração e cominuição de partículas. Os desenvolvimentos conceituais aplicados aos estudos de separação envolvendo particulados sólidos, assim, se constituem igualmente relevantes ao exame de dispersões líquido-líquido, visto que compartilham numerosas estratégias de separação.

#### *II.5.1.1 – Tamanho da Partícula e Distribuição de Tamanhos*

No que concerne ao tratamento de sistemas particulados, a primeira tarefa a ser cumprida consiste em suceder a caracterização primária dos materiais sólidos e/ou fluidos compondo-os. Determinam-se, então, suas propriedades físico-químicas, como densidade e viscosidade, a concentração e a distribuição de tamanhos das partículas, além de se identificarem as condições operacionais às quais se sujeita o sistema em consideração. Tais informações mais basilares permitem, por exemplo, para fins de separação de fases, qualitativamente, selecionar o conjunto mais apropriado de equipamentos mais apropriados, bem como alimentam equações e correlações empíricas ou semi-empíricas relativas ao projeto e à previsão de performance de dispositivos de separação.

Dada a irregularidade do formato das partículas presentes em uma suspensão por exemplo, a atribuição de seu tamanho se dá mediante a aferição de uma medida representativa de uma extensão espacial pautada na propriedade que possuem mais relevante para determinado processo ou sistema ao qual se aplicarão. Como exemplo, citam-se os grupos de mensurações baseados em esferas e círculos de propriedades equivalentes (mesmo volume, mesma área projetada, mesma velocidade terminal etc.). (SVAROVSKY *et al.*, 2000)

Caracterizar um particulado quanto ao tamanho requer que se decida, além da forma de medição que se empregará, acerca do tipo de distribuição de tamanhos, cuja diferenciação se pauta na base tomada: numérica, de comprimento, superficial e mássica (ou volumétrica). Distintas metodologias experimentais fornecem espectros de tamanho de materiais particulados de um dos tipos anteriores em função do princípio do qual lançam mão.

Independentemente do tipo ao qual se referem, há duas modalidades de apresentação das distribuições de tamanhos: distribuição de frequência e cumulativa. No primeiro caso, tem-se, equivalentemente, uma distribuição de probabilidade, denotada por 'x', em relação à variável contínua diâmetro da partícula, cuja representação gráfica exprime o percentual de ocorrência ou frequência associada a cada valor assumido pelo tamanho da partícula em seu domínio. A segunda abordagem adotada em tal descrição consiste em relacionar os diâmetros das partículas de cifras de percentual acumulado de partículas que possuem diâmetros inferiores ('y') ou superiores ('z'), sendo obtida calculando a área sob a curva de distribuição de frequências entre 0  $\mu\text{m}$  até dado 'd' ou deste até infinito, respectivamente. Na figura 8, exibem-se exemplos das formas de expressão das distribuições. (SVAROVSKY *et al.*, 2000)

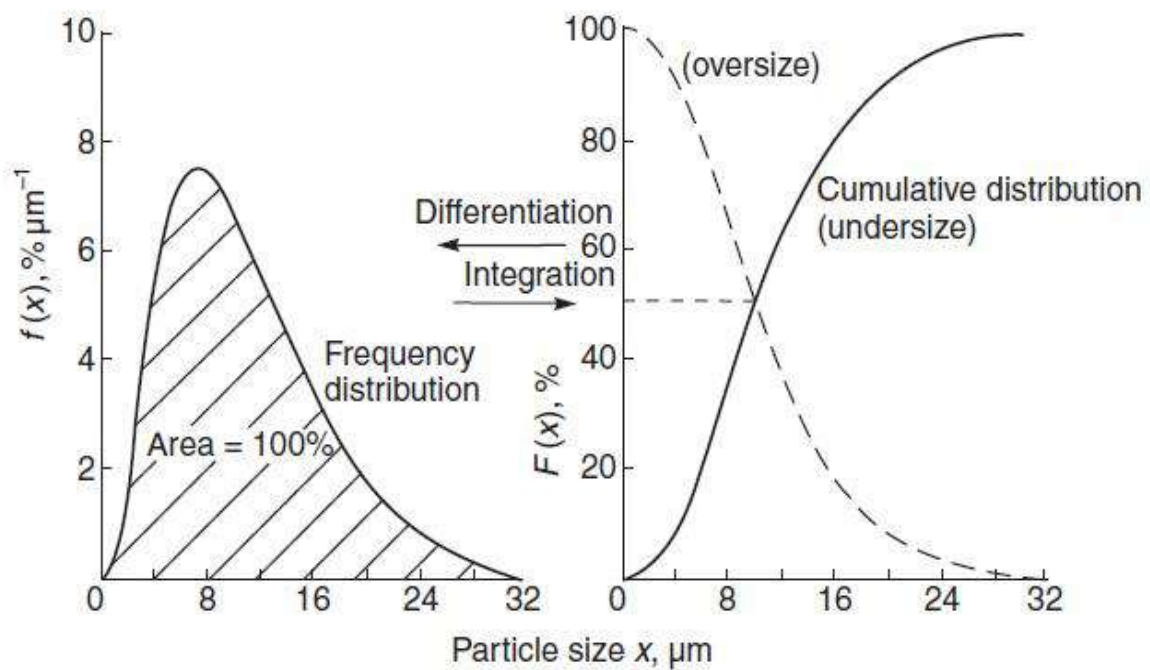


Figura 8 - Exemplos de distribuições de tamanhos por frequência e cumulativas maior e menor que dado tamanho.

Fonte: Svarovsky (2000)

Em se tratando de uma distribuição de probabilidades, a área total sob a curva  $x(d)$  se igual à unidade. As distribuições por frequência e cumulativa relacionam-se por:

$$x = \frac{dy}{dd} \quad (2.2)$$

Ou, alternativamente:

$$y = \int x dd \quad (2.3)$$

Além da representação por gráficos e tabelas, exprime-se a distribuição de tamanhos da fase dispersa em uma suspensão ou dispersão por meio de correlações, isto é, com equações que fornecem a frequência ou o percentual cumulativo maior ou menor que dado  $d$  em função do diâmetro da partícula. Para tanto, ajustam-se os dados coletados experimentalmente a expressões comumente de dois ou três parâmetros. Para exemplificação, segue a equação de Rosin, Rammeler e Bennet (RRB), também aplicada à caracterização da dispersão cujo tratamento se objetiva realizar com o equipamento desenvolvido no presente trabalho. (SVAROVSKY, 2000)

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

em que denota-se por  $k$  e  $m$  os parâmetros a determinar, o que se alcança mediante regressão linear dos dados de tamanhos da distribuição a ser modelada em consonância à forma linearizada da correlação acima.

### *II.5.1.2 – Eficiência de Separação*

Frente à imperfeição inerente aos equipamentos que se destinam à separação de fases em dispersões, com fins de estabelecimento de relações quantitativas associadas à avaliação e previsão de performance, apresenta-se como essencial a definição de um parâmetro por meio do qual se mensura o desempenho do dispositivo em executar o processo separativo para que se destina. A tal grandeza, atribui-se a designação de eficiência de separação, cuja formulação é fornecida a seguir em termos da nomenclatura assumida para a esquematização de um separador típico na figura 9.

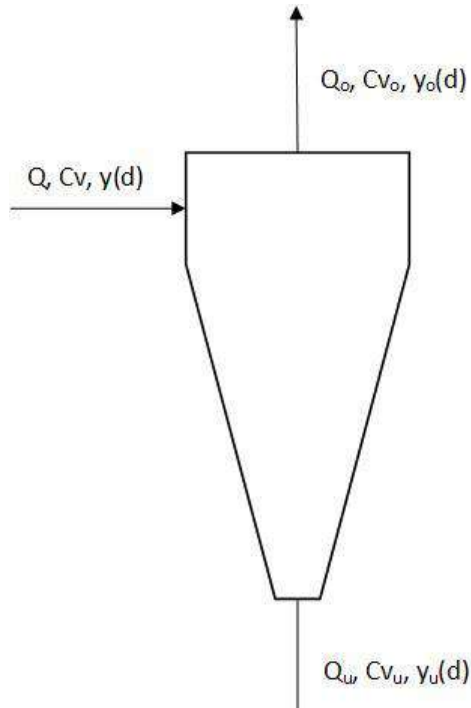


Figura 9 - Esquema de um separador típico com uma entrada e duas saídas.

Denota-se por  $Q$  a vazão volumétrica e por  $C_v$  a concentração em termos de percentual volumétrico. Os subscritos ‘o’ e ‘u’ indicam a correspondência das grandezas nas quais são inseridos às correntes de saída do equipamento hipotético tomado *overflow* e *underflow*, respectivamente, ao passo que sua ausência se associa à alimentação do sistema. A partir de tais designações, exprime-se a eficiência total de separação, definida como a fração do disperso admitido que deixa o dispositivo junto à corrente *underflow* (se sua densidade for superior à da fase contínua; caso contrário, considera-se a corrente de *overflow*), matematicamente como se segue (SVAROVSKY, 2000):

$$E_t = \frac{Q_u C_{v_u}}{Q C_v} \quad (2.5)$$

Os próximos passos apresentados levam à obtenção de relações entre as distribuições de tamanho nas diferentes correntes envolvidas e a eficiência de separação.

Admitindo-se operação em regime permanente e ausência de consumo ou geração mássica, a aplicação de um balanço de massa macroscópico ao separador em relação à fase discreta conduz à igualdade entre a entrada desta ( $Q C_v$ ) e a soma de suas saídas ( $Q_o C_{v_o} + Q_u C_{v_u}$ ). Fazendo, ainda, a assunção de não modificação de tamanho para todas

as partículas ou gotas presentes na dispersão, valendo-se da distribuição de frequências, tem-se como resultado do balanço mássico por tamanho:

$$x = x_u E_t + x_o (1 - E_t) \quad (2.6)$$

Visto que a eficiência total se mantém constante, com a integração de ambos os membros da equação 2.5, obtém-se a balanço de massa por tamanho expresso em termos das distribuições cumulativas para as distintas correntes.

$$y = y_u E_t + y_o (1 - E_t) \quad (2.7)$$

O emprego das relações dadas nas equações 2.5 e 2.6, então, permite, em posse do valor de eficiência total, especificações da distribuição de alimentação uma vez conhecidas as distribuições nas correntes resultantes da separação, bem como daquela para uma das saídas estando determinadas as duas demais. Similarmente, afere-se a eficiência de separação partindo-se das granulometrias das saídas e da entrada. (SVAROVSKY, 2000)

É importante que se enfatize a intrínseca dependência existente da eficiência de separação total para com a distribuição de tamanhos do fluxo de *inflow*, além das condições operacionais definidas no problema analisado. Não se trata, assim, de uma quantidade apropriada para caracterização de um dispositivo de separação no que diz respeito à sua capacidade separativa. Cumprindo tal função, tem-se o parâmetro denominado de eficiência de separação granulométrica ou por tamanho, simbolizado por *G*, representado por meio de um gráfico que relaciona a eficiência total para o caso de se alimentar ao separador um único diâmetro de disperso a cada tamanho. (SVAROVSKY, 2000)

A então chamada curva de eficiência granulométrica se configura como um aspecto inerente de cada equipamento de separação, independentemente da distribuição granulométrica do material a ser processado e mantendo-se invariável para um conjunto fixo de regime operacional, que abrange especificações de taxa volumétrica, temperatura, viscosidade da fase contínua entre outras. Tipicamente, em dispositivos separativos cujo princípio de funcionamento se baseia no deslocamento de partículas através de um meio fluido em decorrência da contraposição entre a força proporcionada por um campo (gravitacional, centrífugo etc.) e o arraste efetuado pela fase contínua, o que é o caso dos hidrociclones, o gráfico para eficiência granulométrica apresenta um formato sigmoide.



Os valores assumidos por  $G$  denotam uma probabilidade de separação para cada tamanho de partícula. Idealmente, contudo, conforme discute Svarovsky (2000), esperar-se-ia um comportamento do tipo degrau para a referida quantidade, situação que não se sucede na prática como consequência do fato de, por mais que possuam o mesmo tamanho, diferentes partículas experimentam distintas condições de escoamento no interior de dado equipamento, não desenvolvendo a mesma trajetória exatamente. Desta forma, resulta um espalhamento, em que parcela dos finos saem através do *underflow* e parte dos grossos deixam o separador junto à corrente de *overflow*. O comparativo entre as conformações para a curva  $G(d)$  está ilustrado na Figura 10.

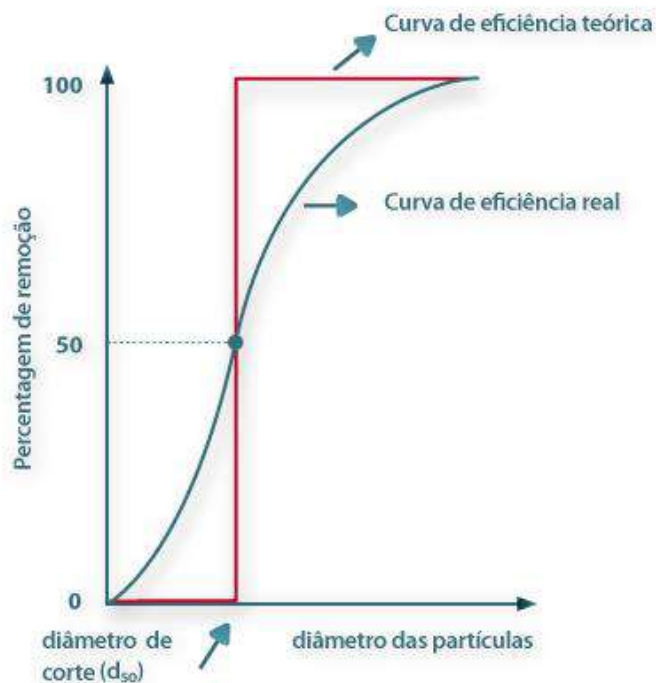


Figura 10 - Curvas de eficiência granulométrica ideal e real.

Fonte: Portal Laboratório Virtual de Processos Químicos.

Dois pontos notáveis na curva de eficiência de separação por tamanho também utilizados para caracterização de determinado dispositivo separativo consistem no diâmetro de corte e limite de separação. Respectivamente, referem-se aos tamanhos de partícula correspondentes a 50% e a 100% de probabilidade de coleta. Em um contexto de idealidade dos equipamentos de separação, ter-se-ia o  $d_{50}$  coincidindo com o diâmetro avaliado no qual a função de distribuição cumulativa de tamanhos menores que dado  $d$

da corrente alimentada se igualaria à eficiência total de separação. Vale notar, ainda, que as correlações empíricas e semi-empíricas de predição de desempenho se pautam no valor do diâmetro de corte. (SVAROVSKY, 2000)

Relações análogas àquelas desenvolvidas para eficiência total de separação ocorrem em termos da eficiência granulométrica, sendo colocadas abaixo (SVAROVSKY, 2000):

Definição de eficiência de separação por tamanho:

$$G = \frac{x_u Q_u C_{v_u}}{x Q C_v} = E_t \frac{x_u}{x} \quad (2.8)$$

Combinando-se com a equação 2.1, segue que:

$$G = E_t \frac{dy_u}{dy} \quad (2.9)$$

Reescrevendo-se as relações de balanço de massa em relação ao disperso por tamanho em termos da eficiência granulométrica, resulta:

$$G = 1 - (1 - E_t) \frac{dy_o}{dy} \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{G} = 1 + \left( \frac{1}{E_t} - 1 \right) \frac{dy_o}{dy_u} \quad (2.11)$$

Cumprir verificar que, para certos equipamentos de separação, tais quais os hidrociclones, a curva de eficiência granulométrica não parte da origem dos eixos coordenados, quando o diâmetro de disperso tende a zero. Esta característica reflete o fato de que, além de promoverem a segregação de fases em uma dispersão ou suspensão, os dispositivos que exibem o referido comportamento atuam, fundamentalmente, como um divisor de corrente. Deste modo, sempre haverá uma fração de finos sendo coletada pela saída de *underflow* (ou pela saída de *overflow* no caso de a fase discreta possuir densidade inferior à da contínua) em decorrência da partição sofrida pela alimentação em seu escoamento através do equipamento, representando a mesma proporção desta, o que impede a anulação da eficiência de separação conforme enunciada por mais diminutos que sejam os tamanhos das partículas carregadas. Objetivando contabilizar isoladamente o

efeito de separação proporcionado pelo princípio de operação empregado pelo equipamento considerado, definem-se os conceitos de: razão de fluido ( $R_f$ ), eficiência total reduzida ( $E_t'$ ) e eficiência granulométrica reduzida ( $G'$ ) (SVAROVSKY, 2000):

$$R_f = \frac{Q_u(1 - Cv_u)}{Q(1 - Cv)} \quad (2.12)$$

$$E_t' = \frac{E_t - R_f}{1 - R_f} \quad (2.13)$$

$$G_t' = \frac{G_t - R_f}{1 - R_f} \quad (2.14)$$

Em posse da curva de eficiência granulométrica para um conjunto de condições de operação, consegue-se determinar a eficiência total de separação para quaisquer distribuições de tamanhos da suspensão ou dispersão que se deseja tratar. A relação entre tais quantidades advém da própria definição de  $G$  em função das distribuições cumulativas, bastando separar variáveis e integrar em  $y$  entre os limites de integração de 0% a 100% (SVAROVSKY, 2000):

$$\int_0^1 G dy = E_t \int_0^1 dy_u \quad (2.15)$$

O que leva a:

$$E_t = \int_0^1 G dy \quad (2.16)$$

A mesma relação se aplica para as eficiências reduzidas.

## II.5.2 – Hidrociclones: Funcionamento e Fluidodinâmica

Os hidrociclones consistem em equipamentos ciclônicos especificamente projetados para o processamento de dispersões nas quais a fase contínua se trata de um líquido. Em contraposição aos ciclones, que, fundamentalmente, se destinam a diferentes categorias de condicionamento de suspensões de fluxos gasosos, apresentam dimensões substancialmente inferiores e operam com valores não desprezíveis de razão de fluido. Tipicamente, possuem como design a conjugação entre duas partes principais, uma com formato cilíndrico e outra com configuração cônica. Na primeira, tem-se acoplados dutos de alimentação tangencial e de saída superior, este conduzindo a corrente de *overflow* e se projetando a certa distância para o interior do dispositivo, constituindo o que se designa por *vortex finder*. No ápice da parcela com forma de tronco de cone, situa-se a outra saída, conhecida como orifício *underflow*. A Figura 11 fornece uma visualização da geometria padrão descrita mediante um corte longitudinal em sua seção central.

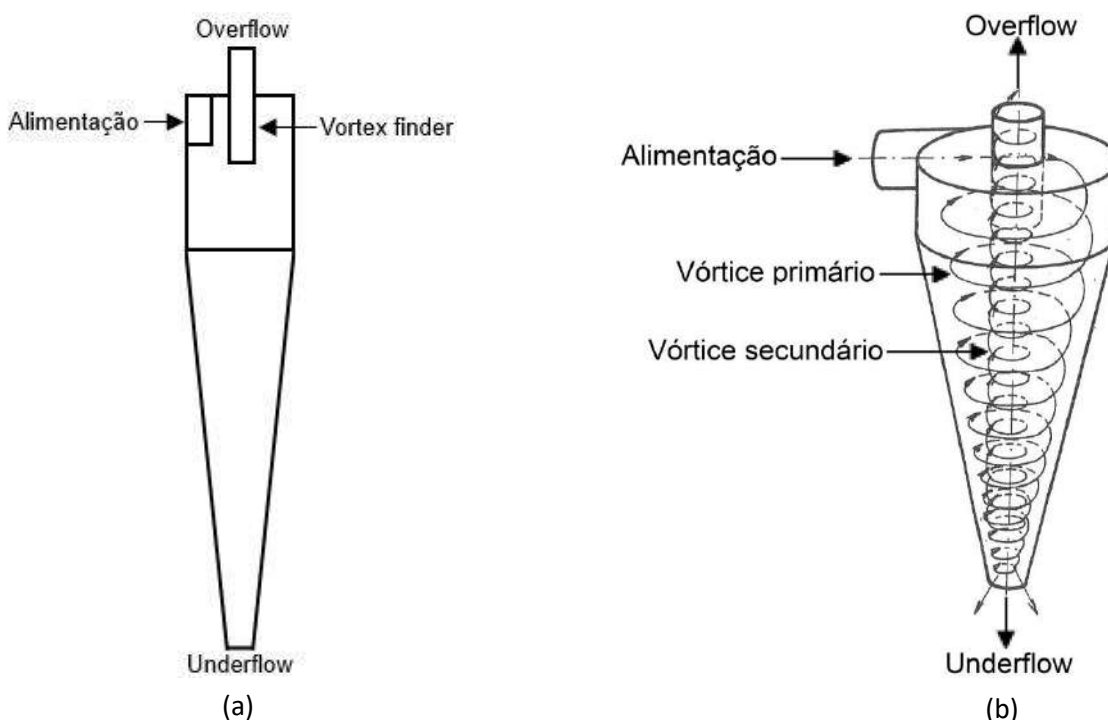


Figura 11 – (a) Plano central evidenciando a geometria típica de um hidrociclone. (b) Representação do escoamento internamente desenvolvido.

Fonte: Braga (2015).

Em decorrência da introdução tangencial a taxas suficientemente elevadas da corrente submetida à ciclonação, sucede-se um escoamento em vórtice no interior do

equipamento, dando origem a um campo centrífugo. Função da componente tangencial da velocidade do fluxo que se desenvolve, este se estabelece na direção radial, promovendo um gradiente de pressão orientado no sentido do eixo central para as paredes do hidrociclone. Como resultado da constrição sofrida pelo líquido carreador em face à progressiva redução do diâmetro da seção transversal ao seu escoamento à medida que avança rumo ao orifício *underflow* e do campo de pressão estática supracitado, considerando que ambas as saídas estão a mesma pressão, uma fração  $(1 - R_f)$  da fase contínua, que conduz a parcela mais fina do particulado, segue em direção ao *overflow* em um fluxo espiralado ascendente, formando um vórtice secundário.

Cada partícula (sólido, gota ou bolha) dispersa escoando no referido equipamento apresenta sua movimentação condicionada à ação de dois tipos de força majoritariamente: centrífuga (força de campo) e de arraste (força superficial). Decompondo o deslocamento global das fases no hidrociclone em componentes cilíndricas, vê-se contraposição entre tais forças na direção radial em cada ponto do fluxo desenvolvido, em que, a força centrífuga orienta a fase menos densa para a zona central e a fase mais densa no sentido contrário ao passo que o arraste exercido pela fase contínua impõe um movimento para o interior em maior ou menor extensão em função do escoamento secundário em direção à saída de topo. Em analogia ao funcionamento desempenhado por tanques de decantação gravitacionais, Svarovsky (2000, p. 192, tradução nossa) atribui a designação de “sedimentação centrífuga” ao princípio de operação em equipamentos de separação ciclônica, tratando-se da segregação de partículas a partir de uma fase fluida contínua proporcionada pela atuação de um campo centrífugo. Através da saída de recolhimento do material disperso (*underflow* se este possuir maior densidade ou *overflow* caso contrário), obtém-se uma vazão composta pelo corte sofrido pela fase contínua alimentada ( $R_f$ ) mais o particulado inserido em todo o espectro de tamanhos acompanhando-o acrescido da porção de grossos separados do fluxo remanescente que segue para a outra saída. (SVAROVSKY, 2000)

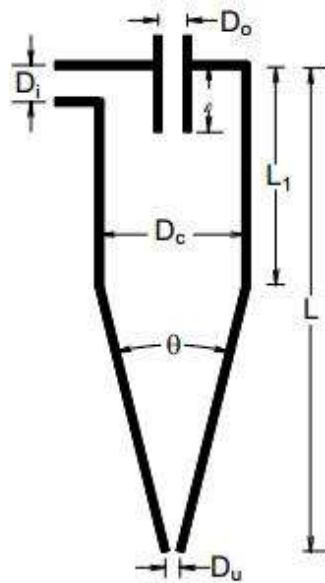


Figura 12 - Dimensões características de um hidrociclone.

Fonte: Medronho, Schuetze e Deckwer (2005).

Na representação esquemática ilustrada na figura 12, discriminam-se as variáveis geométricas de um hidrociclone típico. Estão destacados: diâmetros de alimentação ( $D_i$ ), *overflow* ( $D_o$ ), *underflow* ( $D_u$ ) e seção cilíndrica ( $D_c$ ), alturas total ( $L$ ), da parte cilíndrica ( $L_1$ ) e do *vortex finder* ( $l$ ) e ângulo sólido da seção cônica ( $\theta$ ). Trata-se de um design característico para a classe de equipamentos em questão. Formatos e proporções geométricas definem as famílias de hidrociclones, valendo ressaltar a plena difusão e estudo de dispositivos pertencentes às famílias Bradley (1965) e Rietema (1961). Na tabela 3, dispõem-se alguns grupos de hidrociclones, relacionando-os a especificações para razões entre variáveis de sua geometria, expressas em relação a  $D_c$ .

Tabela 4 - Famílias de hidrociclones. Fonte: Cruz apud Araújo (2015).

Hidrociclone	$D_i/D_c$	$D_o/D_c$	$VF/D_c$	$L/D_c$	$\Theta$
RIETEMA	0,280	0,340	0,400	5,000	15,0° – 20,0°
BRADLEY	0,133	0,200	0,330	6,850	9,0°
DEMCO I	0,217	0,500	1,000	4,700	25,0°
DEMCO II	0,244	0,313	0,833	3,900	20,0°
KREBS	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
MOSLEY I	0,154	0,214	0,571	7,430	6,0°
MOSLEY II	0,160	0,250	0,571	7,710	6,0°
AKW	0,200	0,320	0,800	6,240	15,0°

De modo geral, tem-se que configurações de parâmetros geométricos resultando em maior resistência ao escoamento que se desenvolve no interior dos hidrociclones

contribuem para ampliação da extensão da recuperação de fase dispersa, atingindo-se maiores níveis de separação. Contudo, isto se dá às custas de perdas de carga mais expressivas, o que onera o processo que se considera no tocante ao requisito de potência. Uma relação similar se observa quanto à característica operacional de vazão de processamento. Impondo taxas de escoamento mais elevadas, permite-se o alcance de maiores velocidades tangenciais no equipamento, intensificando, então, o campo centrífugo aplicado; desta forma, é aumentada a eficiência de separação assim como o gradiente de pressão, recaindo na problemática citada. A seleção do design e definição das condições de operação constituem, portanto, problemas passíveis de otimização. (SVAROVSKY, 2000)

Tendo sido realizada a descrição geral referente à operação de hidrociclones, mostra-se pertinente apontar seus principais usos tecnológicos, com base nos quais aclarase os segmentos industriais para que se destinam ou exibem potencial de aplicação para atendimento a demandas dos tipos de separação sólido-líquido, gás-líquido e líquido-líquido. Neste sentido, citam-se (SVAROVSKY, 2000):

- Clarificação de suspensões
- Espessamento de suspensões
- Lavagem de sólidos
- Classificação de particulados
- Ordenamento de sólidos em função da densidade ou forma
- Separação de fases líquidas imiscíveis

As utilizações de hidrociclones se apresentam variadas, sendo proveitosas a numerosos processos industriais, especificamente para o condicionamento de correntes de suspensões e dispersões diversas. O objetivo almejado no projeto de unidades a serem empregadas para os diferentes fins supraditos, no entanto, abrange duas possibilidades fundamentalmente. Definição das grandezas geométricas e do regime de operação, incluindo vazão volumétrica e concentração de alimentação, de maneira a se ter: (1) um diâmetro de corte,  $d'_{50}$ , suficientemente diminuto para garantia de separação de fases e (2) uma curva de eficiência granulométrica com baixo grau de espalhamento (ou alta resolução), viabilizando a obtenção de correntes de grossos e finos carreando o menor teor possível de partículas com tamanhos incompatíveis ao corte feito na distribuição granulométrica processada. (SVAROVSKY, 2000)

Numerosos autores identificaram os aspectos vantajosos associados à opção pelo emprego de hidrociclones na execução de processos de separação. Dentre estes, cumpre destacar: reduzidos custos relativos à construção, operação e manutenção das unidades de hidrociclones, baixo requisito de área na planta de processo, elevada versatilidade e capacidade em suas aplicações de classificação e separação de dispersões, pequenos tempos de residência, permitindo atuações prontas de sistemas de controle, e simplicidade de projeto e operação, não dispondo de partes móveis. É necessário que se enunciem as características desfavoráveis em relação ao seu uso. Têm-se: inflexibilidade operacional por conta da expressiva sensibilidade da eficiência de separação às condições do processo, altas tensões de cisalhamento contribuindo para susceptibilidade à abrasão e dificuldade na separação líquido-líquido pelo favorecimento ao fenômeno de quebra das gotas e necessidade de arranjos com distintas conformações em série e/ou em paralelo de equipamentos para adequação à demanda de processamento no que se refere à vazão e especificações de pureza das correntes. (SVAROVSKY, 2000; BAI E WANG; 2006)

As investigações, sejam elas no âmbito teórico, experimental, ou semi-empírico, conduzidas a respeito de hidrociclones visam, por meio de progressos na compreensão de aspectos do complexo escoamento desenvolvido no interior de tais separadores, a determinar estratégias para previsão da performance que desempenham e, em última análise, viabilizar o ótimo projeto de dispositivos. Neste contexto, foram sendo elaboradas abordagens pautadas em teorias para o funcionamento de hidrociclones, correlações puramente empíricas a partir de dados experimentais, funções envolvendo parâmetros adimensionais das variáveis relevantes à operação e na completa predição do campo de escoamento estabelecido com base na resolução das equações de conservação de grandezas físicas. De modo geral, procede-se empregando uma metodologia para estimativa do diâmetro de corte do equipamento partindo das condições consideradas para operação, propriedades dos materiais e geometria do separador e, então, obtendo a curva de eficiência granulométrica, comumente traçada utilizando uma correlação apropriada que fornece  $G'(d/d'_{50})$ .

Comparando as diferentes vias para condução de problemas de projeto e avaliação de desempenho de hidrociclones, Bai e Wang (2006) apontam a abordagem classicamente empregada a partir de correlações empíricas como limitadoras do potencial de ótimo design de tais equipamentos. Investigações envolvendo modificações de parâmetros com base em testes laboratoriais, afirmam, incorrem em demasiados dispêndios, tanto em termos de custos como de tempo demandado, restringindo as possibilidades de análise. O



uso de modelagem fluidodinâmica e sua resolução por metodologias numéricas por meio de simulações computacionais constituiria uma alternativa promissora a essas limitações uma vez validadas.

Um dos exemplos de correlação da qual se lança mão para construção da curva de eficiência de separação por tamanho é a de Plitt (1971), proposição do tipo Rosin-Ramler:

$$G\left(\frac{d}{d_{50}}\right) = 1 - \exp\left[-0,693\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^n\right] \quad (2.17)$$

### II.5.3 – Hidrociclones para Separação Líquido-Líquido

O emprego de hidrociclones em diversos setores industriais no que tange a soluções tecnológicas desenhadas para etapas de separação sólido-líquido se encontra plenamente consolidado. A primeira patente de tal equipamento remonta ao ano de 1891, e uma ampla difusão de sua utilização se deu após a Segunda Guerra Mundial, vigorando em sistemas de processamento mineral. As aplicações na indústria de óleo e gás também se mostram numerosas. No que se refere a processos de separação líquido-líquido, apesar de já alvos de expressivos quantitativos de investigações, somente nas últimas décadas, hidrociclones especificamente projetados para de separação água-óleo passaram a ser utilizados em unidades de processamento primário de petróleo.

Atualmente, as facilidades de processamento terrestres e marítimas, comumente, dispõem de hidrociclones para o tratamento de água produzida. Esta constitui uma demanda crescente no decorrer da vida útil de poços para os quais se vale de injeção de água para manutenção do nível de pressão. Baterias de hidrociclones atuam reduzindo o teor de óleo disperso suficientemente para destinação final ou uma etapa subsequente de condicionamento fino em flotadores. Contribuindo significativamente para a disseminação desta categoria de separação entre líquidos com o uso de ciclonação, figuram as vantagens marcantes existentes em comparação aos tradicionais vasos de decantação, que, valendo-se da sedimentação sob ação gravitacional para a remoção das gotículas de disperso, ocupam grande espaço no convés das plataformas como reflexo dos exacerbados tempos de residência com os quais operam, dada a pequena diferença de densidade entre as fases aquosa e oleosa.

Em meio às suas características favoráveis, em particular, pelo fato de se tratarem de equipamentos compactos e amplamente versáteis, hidrociclones também definem

objetos de pesquisas relacionadas à aplicação para separação de água dispersa em óleo. Na indústria petrolífera, tal utilização de equipamentos ciclônicos se apresenta especialmente desejável por conta da atual tendência de projeto de sistemas de separação submarina para exploração em águas profundas e ultra profundas, em que são requisitadas soluções compactas e de alta confiabilidade para as etapas do processamento da produção, que abrangem, dentre outras, a separação primária de água em óleo.

Apesar de não possuir o mesmo grau de estabelecimento tecnológico e industrial que o tratamento de águas oleosas, o uso de hidrociclones para separação de dispersões do tipo água em óleo consiste no alvo de numerosas pesquisas há algumas décadas. Tem-se como provável justificativa para o descompasse entre as modalidades separativas líquido-líquido supramencionadas os inerentes obstáculos que se impõem ao processo no caso de a fase contínua exibir maior viscosidade, o que leva a maiores tensões de cisalhamento sobre as gotículas de disperso, requerendo-se uma maior compreensão dos efeitos interfaciais envolvidos. Ainda assim, consegue-se citar alguns exemplos de estudos nesta linha, como os de Smyth (1988), Belaidi *et al.* (2006) e Bai e Wang (2006).

Smyth (1988) desenvolveu estudos referentes a aplicações de hidrociclones do tipo *dewatering*. Especificamente, considerou o processamento de dispersões de água em óleo para a produção fluida advinda do campo de Forties, localizado no Mar do Norte. Conduziu suas investigações por meio de testes experimentais nos quais avaliou a performance do processo separativo para distintas condições de operação. Para tanto, variaram-se teores de água de formação na alimentação, viscosidade da fase contínua e distribuição granulométrica da água em dispersão. Conclusões esperadas decorreram dos experimentos realizados: maior discrepância entre densidades das fases, menor viscosidade do óleo e ocorrência de coalescência aprimoram a separação.

Belaidi, Thew e Munaweera (2003) desempenharam uma avaliação da performance de hidrociclones para o tratamento de emulsões complexas<sup>4</sup> presentes na alimentação do sistema. Trata-se de um trabalho de caráter exploratório cujas principais finalidades consistiram em verificar o comportamento da eficiência de separação em função do teor de água (variado entre 0 e 60%) e da vazão operacional, monitorar as características da emulsão a partir das distribuições de tamanhos de entrada e saída e comparar a estabilidade da emulsão no decorrer de seu processamento.

---

<sup>4</sup> Os autores indicam emulsões complexas como aquelas em que ocorrem gotículas dispersas nas gotas da fase discreta, tendo-se os exemplos de emulsões do tipo água-óleo-água e óleo-água-óleo. (BELAIDI *et al.*, 2003)

Os autores se valeram de uma abordagem empírica para realização da investigação, desenvolvendo testes em uma unidade experimental (Figura 13). As conclusões mais relevantes que alcançaram, além de demais observações, remetem à identificação de uma região na faixa de concentrações volumétricas de água dispersa entre 30% e 38% na qual deve ocorrer o fenômeno de inversão de fases da emulsão, o que se constatou mediante a visualização de mínimos para a eficiência de separação para ambas as vazões e tipos de emulsão (simples e complexa) considerados e de máximos para a viscosidade aparente da mistura, bem como à verificação de maior estabilidade do sistema, consistindo de menores gotículas emulsionadas, com menor fração de óleo livre.

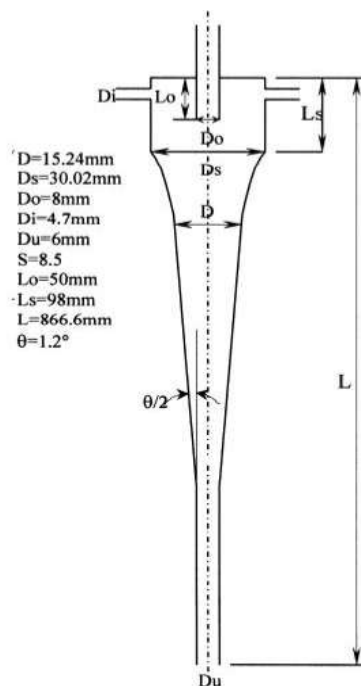


Figura 13 - Modelo experimental utilizado.  
 Fonte: Belaidi et al. (2003)

Bai e Wang (2006) conduziram um dos primeiros trabalhos tratando de hidrociclones para separação de dispersões do tipo em questão com base em estudos de simulação computacional. Valendo-se de ferramentas de Fluidodinâmica Computacional (CFD), com modelo de turbulência de tensores de Reynolds e abordagem multifásica ASM<sup>5</sup>, os autores modificaram valores de abertura da saída de *overflow* e de vazão de alimentação avaliando os efeitos ocasionados sobre a performance do separador. Como

<sup>5</sup> ASM denota *Algebraic Slip Model*, abordagem disponível na plataforma Fluent® para modelagem de escoamentos multifásicos aplicando a formulação euleriana para a fase contínua do sistema e resolvendo a velocidade relativa da(s) fase(s) dispersas empregando expressões algébricas, e não pela solução de um conjunto de equações de transporte.

resultados, obtiveram um nível elevado de concordância com dados empíricos de eficiência granulométrica validando a modelagem utilizada, e identificaram que aumentos nos fatores analisados contribuem para separação, evidentemente, dentro dos intervalos tomados para avaliação.

## II.6 – Fluidodinâmica Computacional

### II.6.1 – Aspectos Gerais

Desafios das mais diversas naturezas que abarcam em suas proposições escoamentos de fluidos constituem alvo da aplicação das ferramentas de Fluidodinâmica Computacional, ou, abreviadamente, CFD (*computational fluid dynamics*) para sua resolução. Em concordância ao definido por Versteeg e Malalasekera (2007), tal metodologia compreende procedimentos pertinentes à análise de sistemas que envolvam fluidos escoando, transferência de calor e fenômenos correlatos, tais quais reações químicas, mediante simulações computacionais. Técnicas de computação científica em combinação à implementação de algoritmos numéricos conduzem à geração de códigos que se destinam à obtenção de solução por via numérica para as chamadas equações de conservação.

Todas as aplicações de CFD possuem como fator comum a representação dos problemas estabelecidos por intermédio da teoria de Fenômenos de Transporte. Neste sentido, tem-se sempre a utilização dos princípios de conservação de grandezas físicas, abrangendo massa, *momentum*, energia e espécie química, que, matematicamente, se expressam na forma de equações diferenciais e integrais mutualmente convertíveis por meio dos Teoremas de Transporte de Reynolds. A solução das formulações que resultam conduz a determinações que incluem desde informações de caráter macroscópico até minuciosas descrições relativas à distribuição de propriedades como pressão, velocidade, concentração e temperatura, além de todas que derivem destas, para um sistema englobando processos os mais diversificados (sendo eles físicos, químicos e/ou biológicos).

Do conjunto de aplicações para a abordagem CFD enumeradas por Versteeg e Malalasekera (2007), destacam-se para fins de exemplificação:

- Estudos aerodinâmicos para o projeto e análise de veículos automotores e aeronaves.

- Investigações hidrodinâmicas e hidrostáticas relacionadas ao projeto e operação de estruturas marítimas como plataformas e embarcações.
- Geração de energia, com a análise de processos de combustão.
- Simulação, dimensionamento e otimização de processos químicos industriais, incluindo operações de mistura e separação, bombeamento, geração de utilidades e reação química.
- Estudos ambientais relacionados à dispersão de poluentes e efluentes.

Outros problemas sujeitos ao emprego de métodos de Fluidodinâmica Computacional englobam previsão do tempo e tratamentos de dinâmica estelar.

A fim de se aclarar as principais motivações que induzem à seleção por estratégias numéricas para o ataque a problemáticas concernentes às áreas de Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Transferência de Massa, cumpre evidenciar as limitações intrínsecas às metodologias alternativas à Fluidodinâmica Computacional.

- A via analítica para a resolução das equações diferenciais representativas das leis de conservação de propriedades conduz a soluções exatas dadas por perfis de grandezas que permitem a especificação das quantidades de interesse em qualquer ponto do domínio no qual determinado problema se encerra. No entanto, casos de escoamento reais, usualmente, se apresentam demasiadamente complexos para que as ferramentas analíticas de solução de EDPs (equações diferenciais parciais) sejam aplicáveis, suscitando-se a consideração de hipóteses simplificadoras que afastam em extensão substancial os problemas tratados de seus moldes reais.
- Por sua vez, a alternativa experimental, apesar de altamente relevante por fornecer o comportamento fisicamente exibido pelo sistema que se submete a dado exame, implica em restrições, em geral, inviabilizadoras de seu emprego. Estas advêm de eventuais custos excessivos incorridos pela necessidade de fabricação ou compra e operação de protótipos ou modelos em larga escala e de instrumentos de mensuração, dificultando ou impedindo a condução de estudos paramétricos e de otimização, por exemplo, bem como da impossibilidade de reprodução de sistemas exacerbadamente extensos, de difícil controle ou que acarretem situações de alto risco, o que seria o caso de análises de dispersões de poluentes, processos com radiação e os mais variados cenários acidentais em escalas suficientemente grandes.

Proceder com o uso de técnicas numéricas desempenhadas com simulações computacionais constitui uma estratégia eficiente para resolver as equações governantes em razão de estas, sendo apropriadamente selecionadas e implementadas em compatibilização às características do escoamento cujo campo se pretende conhecer, permitirem a geração de resultados com níveis amplos de detalhamento a respeito de perfis de propriedades em uma região de interesse em volumosos quantitativos, com a inclusão de parcial ou total dos aspectos que conferem a complexidade de casos reais e sem levar a dispêndios adicionais. O seu emprego, contudo, não acarreta a dispensa das outras vias de ataque aos problemas de escoamento supracitadas. Pelo contrário, os métodos analíticos e experimentais possuem enorme utilidade, visto que se aplicam à validação da formulação numérica da qual se lança mão; os primeiros fornecem referências para casos de maior simplicidade para comparação dos resultados derivados da metodologia numérica, e os segundos se mostram essenciais para atribuição de confiabilidade ao recurso numérico, servindo à etapa de validação física. Na Figura 14, segue uma esquematização das formulações então apresentadas para resolver-se problemas de escoamento. (MALISKA, 2004)

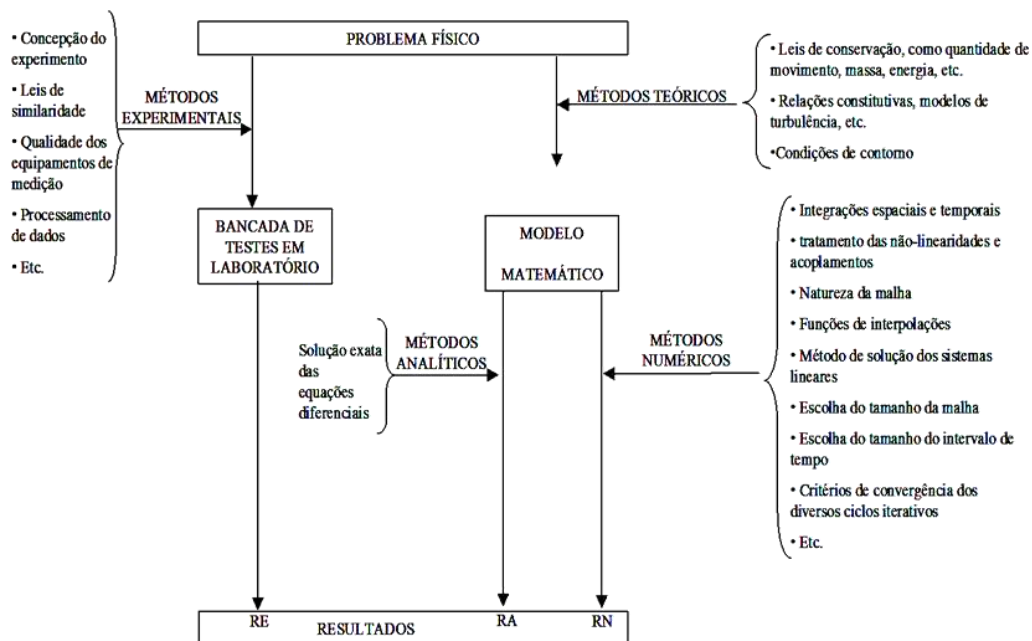


Figura 14 - Estratégias para solução de problemas de escoamento.  
Fonte: Maliska apud Braga (2015).

## II.6.2 – Etapas da Solução CFD

Na presente seção, sumarizam-se os principais procedimentos envolvidos quando do desenvolvimento ou utilização de códigos de Fluidodinâmica Computacional. Para tanto, faz-se seu agrupamento em três estágios oriundos da partição aplicada aos estudos de simulação CFD: pré-processamento, *solver* e pós-processamento. Pacotes comerciais, via de regra, dispõem de interfaces gráficas amigáveis ao usuário que viabilizam a sucessão dos passos requisitados para consecução das simulações, apesar de, em contrapartida, limitarem o acesso às estruturas de solução implementadas, não admitindo plena manipulação dos recursos que disponibilizam; para tais intuítos, a opção por códigos *open source* deve ser considerada.

### II.6.2.1 – Pré-Processamento

O que se designa de pré-processamento consiste no conjunto de atividades que se destinam à definição do problema a ser simulado. Deste modo, encontram-se compreendidos neste estágio: a construção do modelo geométrico representativo do domínio computacional, o que conta com o auxílio de *softwares* CAD (*computer-aided design*); a elaboração da grade ou malha computacional, resultante da fragmentação (ou discretização) de um domínio contínuo em elementos discretos (células ou subdomínios), aos quais se atribuem pontos nodais, responsáveis por armazenar valores locais das propriedades físicas relativas às equações de conservação então discretizadas, isto é, aproximadas por formulações algébricas vinculadas a cada subdomínio; a seleção da modelagem física a ser empregada, a qual depende da natureza dos fenômenos considerados no sistema simulado; a inclusão de propriedades físico-químicas dos materiais fluidos e sólidos presentes no domínio de cálculo; e a especificação de condições iniciais para a totalidade do domínio e de contorno para as células que coincidem ou tangenciam as regiões de fronteira da geometria considerada. (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007)

No que tange às grades ou malhas computacionais, que merecem especial destaque em função do papel crítico que exercem nas simulações CFD, vale apontar sua classificação em três categorias principais. A saber, têm-se malhas estruturadas, não-estruturadas e híbridas. A primeira classe diz respeito à disposição e formato de elementos em um domínio bidimensional ou tridimensional que apresentam igual número de

vizinhos. Malhas não-estruturadas não asseguram tal característica, incorrendo, assim, em problemas numéricos, mas possuem a vantagem de pronto ajuste às mais complexas conformações geométricas. Em numerosos casos, o emprego de grades híbridas conduz à obtenção de soluções suficientemente satisfatórias, resultando da combinação entre porções prismáticas estruturadas nas zonas de altos gradientes em dado domínio com parcelas não-estruturadas nas demais regiões em que não se verificam expressivas variações de propriedades. Na Figura 15, fornecem-se exemplos de malhas bidimensionais:

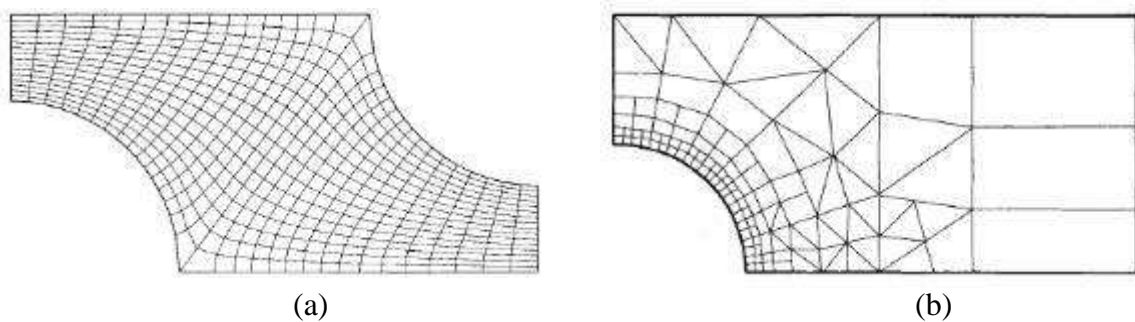


Figura 15 - Exemplos de malhas computacionais. (a) Malha estruturada. (b) Malha híbrida.  
Fonte: Ferziger e Perić (2002)

A discretização das equações de transporte mediante sua aproximação por um conjunto de equações algébricas aplicadas aos distintos elementos da malha que se emprega comporta-se de tal forma que os erros numéricos tendam à anulação conforme se amplia a quantidade de partições realizadas no domínio de cálculo. Ao elaborar a grade computacional, deve-se estabelecer o compromisso entre acurácia da solução obtida, menor para malhas mais grosseiras em decorrência de maiores erros de discretização, e custo computacional, maior para malhas mais finas em função da maior extensão dos sistemas lineares resultantes, exigindo capacidades de armazenamento e processamento mais amplas. Para tanto, mostra-se imprescindível a realização do que se conhece por teste de independência de malha, que visa a determinar a partir de qual nível de refino de malha as soluções encontradas passam a não se distinguir significativamente, não fazendo sentido aumentar a quantidade de células com o ônus de maiores tempos de simulação para pouca ou nenhuma modificação dos perfis de propriedades. (FERZIGER *et al.*, 2002)



### II.6.2.2 – Solver

Uma vez estabelecido o problema que se deseja simular, sucede-se a etapa de solução, cuja condução ocorre por meio de um *software* no qual se encontra implementado um código para aplicação da metodologia numérica em que se fundamenta. De modo geral, os pacotes de Fluidodinâmica Computacional se pautam no método dos volumes finitos (FVM – *finite volumes method*) para resolução numérica das equações de transporte que regem os processos de escoamento de fluidos e de transferência de calor e de massa em um sistema que se submete à análise. (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007) Expressas na forma de equações diferenciais parciais representativas dos balanços entre os processos que contribuem para ampliação ou depleção das propriedades conservadas em cada ponto de um domínio contínuo, as referidas equações de conservação apresentam o formato fornecido para uma grandeza genérica  $\phi$  a seguir:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \underline{v}) = -\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (2.18)$$

Em tal proposição, em sendo a variável  $\phi$  considerada exprimida em base mássica, tem-se, para um volume de controle infinitesimal atrelado a cada ponto do domínio de cálculo, a relação entre a taxa de variação do quantitativo acumulado da propriedade que se supõe, dada pela derivada temporal, e os demais termos, que se associam às taxas de transporte advectivo ( $\nabla \cdot (\rho \phi \underline{v})$ ) e difusivo ( $-\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)$ ), vinculadas aos mecanismos de transporte de carreamento pelo escoamento fluido e originário de um gradiente estabelecido da propriedade tomada, respectivamente, e de geração ou consumo da grandeza ( $S_{\phi}$ ), a qual define o chamado termo fonte.

Na Figura 16, exibem-se as aplicações da formulação genérica apresentada na equação 2.17 para as grandezas físicas conservadas em um escoamento, obtendo-se as equações da continuidade (balanço de massa global), as três componentes cartesianas da equação do movimento e a equação da energia. Fez-se menção também às equações de estado, que relacionam propriedades termodinâmicas, as quais, em conjunção a leis constitutivas, possuem o intento de se incorporar características particulares aos materiais efetivamente envolvidos nas equações de conservação, absolutamente gerais, isto é, independentemente da natureza dos fluidos desde que válida a hipótese do contínuo, na solução de problemas de Fenômenos de Transporte.

Continuity	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$
x-momentum	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx}$
y-momentum	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My}$
z-momentum	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz}$
Energy	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{ div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i$
Equations of state	$p = p(\rho, T)$ and $i = i(\rho, T)$ e.g. perfect gas $p = \rho RT$ and $i = C_v T$

Figura 16 - Relação das equações de conservação para fluidos newtonianos e compressíveis.  
Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

A metodologia FVM se caracteriza por sua formulação ser tal que se garanta a conservação das grandezas físicas em cada elemento resultante da discretização de um domínio contínuo. Para tanto, sua implementação se baseia nos procedimentos enumerados como se segue (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007):

- Discretização do domínio de cálculo pela elaboração da malha computacional.
- Integração das equações de conservação em cada volume de controle constituinte da malha.
- Emprego de métodos de integração numérica para aproximar as integrais dos termos volumétricos em função dos valores nodais das propriedades e dos termos superficiais pelos valores calculados nas fronteiras dos subdomínios.
- Discretização dos termos difusivo e advectivo avaliados nas interfaces das células mediante sua aproximação por expressões algébricas em função dos valores tomados nos pontos nodais da malha com o uso de esquemas de interpolação.
- Montagem e solução do sistema linear de equações algébricas decorrente da reunião das formas aproximadas das equações de transporte determinadas para cada volume de controle componente da discretização do domínio.

Os *softwares* de CFD, em geral, admitem a seleção de variadas metodologias de discretização dos termos temporal, difusivo e advectivo das equações de transporte, as quais, essencialmente, diferem na ordem de acurácia das aproximações algébricas a que conduzem e quanto a características relacionadas à estabilidade numérica e, conforme designado por Versteeg e Malalasekera (2007), ‘transportividade’. À medida que se incluem termos nas expansões em série de Taylor aplicadas para geração das aproximações, obtêm-se erros de magnitudes cada vez menores, definindo-se esquemas de interpolação para a grandeza  $\phi$  e de sua primeira derivada de ordens progressivamente superiores, que recaem em maiores acurácias. As ferramentas de resolução numérica de sistemas lineares se encontram sujeitas à desestabilização durante a execução de suas rotinas iterativas, o que leva à divergência do procedimento; os esquemas de discretização, para assegurar a estabilidade numérica em suas aplicações, devem garantir graus suficientemente elevados de dominância diagonal das matrizes dos coeficientes dos sistemas lineares a serem resolvidos tornando maiores os coeficientes da diagonal principal relativamente aos demais elementos nas respectivas linhas. A seleção da abordagem de discretização, ainda, necessita ser compatível ao caráter predominante no escoamento em exame no que tange aos mecanismos de transporte, ou seja, considerar o sobrepujamento de processos difusivos, que tendem a espalhar a propriedade em todas as direções, pelo transporte advectivo, que orienta a propagação de dado campo no sentido do fluxo desenvolvido.

No presente projeto, empregou-se o esquema de interpolação QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinects*) de Leonard (1979) implementado no solver da Fluent® v18.0 para os termos advectivos das equações de transporte. Como características gerais de sua formulação, destacam-se a utilização de três pontos nodais (em cada direção) relativos a células vizinhas para expressão das propriedades avaliadas nas interfaces dos subdomínios, a apresentação de terceira ordem de acurácia para malhas uniformes e, apesar da estabilidade condicional, a retenção da característica de ‘transportividade’ por envolver o uso de dois nós na direção *upwind* e um no sentido *downwind*. Um profundo detalhamento a respeito de suas derivação, aplicação e variações pode ser encontrado em Versteeg e Malalasekera (2007).

### II.6.2.2 – Pós-Processamento

Tão relevante quanto à execução da solução numérica, a visualização e manipulação dos resultados obtidos viabilizam a realização das análises que se valem do campo de escoamento determinado em uma região de interesse. Encontram-se compreendidas na etapa final de um estudo de simulação CFD, o pós-processamento, atividades que incluem, por exemplo, plotagens de vetores, linhas de contorno, superfícies tridimensionais, trajetória de partículas entre outras. (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007)

## II.7 – Turbulência

### II.7.1 – Caracterização Geral de Escoamentos Turbulentos

Numerosas são as aplicações de engenharia que envolvem fluidos se movimentando sob regime turbulento. Para qualquer categoria de escoamento, alcança-se sempre um estado de instabilidade, assinalado pela interpenetração desordenada das camadas fluidas, para cifras suficientemente elevadas do parâmetro adimensional expresso como número de Reynolds, cuja avaliação se dá mediante a especificação de valores característicos de velocidade e comprimento e que representa a dominância relativa entre forças de inércia (atreladas aos efeitos convectivos) e viscosas (ligadas ao transporte difusivo) no transporte de *momentum*. Em particular, a turbulência se manifesta em todo fluxo uma vez que se atinja um número de Reynolds crítico, que depende fundamentalmente da configuração geométrica considerada, conferindo um caráter inerentemente transiente ao escoamento, no sentido de que a velocidade e demais propriedades passam a exibir comportamentos oscilatórios (Figura 17).

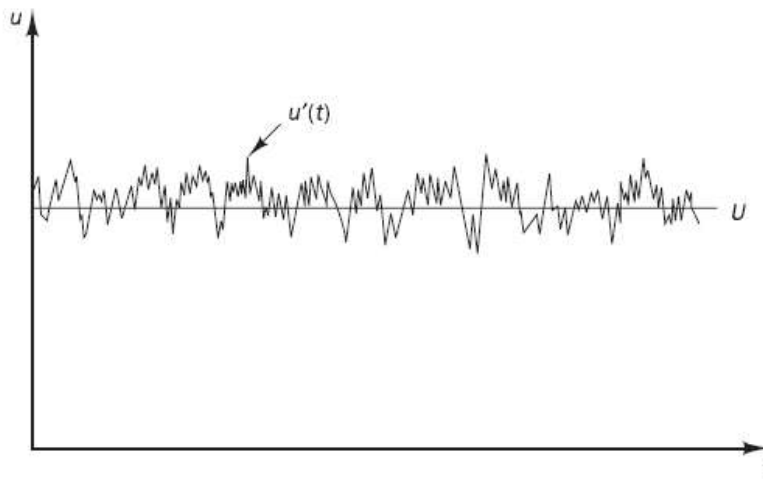


Figura 17 - Comportamento típico da velocidade para o regime turbulento.  
 Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

A fim de se proceder com tratamentos quantitativos do fenômeno de turbulência, adota-se a estratégia de decomposição da velocidade do escoamento em duas componentes, uma atrelada à média da distribuição temporal e outra associada às flutuações estatísticas inerentes ao caráter turbulento. Mesmo que gradientes da componente média estejam estabelecidos em uma ou duas direções apenas, o referido comportamento oscilatório ocorre inerentemente nas três direções espaciais. Tipicamente, formam-se estruturas de fluxo rotacionais com uma ampla faixa de escalas de tempo e comprimento características, designadas de turbilhões ou redemoinhos turbulentos (*turbulent eddies*). Como consequência, as linhas de corrente não evoluem segundo um arranjo organizado, o que leva à aproximação de porções fluidas outrora afastadas e, por conseguinte, acarreta intensas taxas de transferência de massa, calor e quantidade de movimento, promovendo um alto grau de mistura efetiva. (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007)

Em meio a um gradiente referente à componente média da velocidade, sucede-se um alongamento dos vórtices de maior extensão, representando a realização de trabalho por parte do escoamento médio de modo a conceder energia aos turbilhões de maior largura. Em decorrência de estes exibirem números de Reynolds da mesma ordem que o do fluxo médio, uma vez que suas escalas de comprimento e de velocidade são comparáveis, sendo, portanto, elevados, torna-se razoável desprezar a influência de efeitos viscosos. Desta maneira, em razão da conservação de momento angular, a movimentação do fluido passa a se dar progressivamente a maiores taxas de rotação e com escalas de comprimento e de tempo cada vez menores, levando à formação de

redemoinhos turbulentos de menores larguras. Os últimos apresentam números de Reynolds mais reduzidos, devendo vencer tensões viscosas agora já não mais negligenciáveis, o que ocasiona a dissipação de energia irreversivelmente para forma térmica. Há, então, um balanço entre a produção de energia advinda da interação com o escoamento médio nas altas escalas de largura e a destruição de energia pela dissipação viscosa nas baixas escalas. (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007)

## II.7.2 – Média Temporal de Reynolds das Equações de Navier-Stokes

Valendo-se da proposição de Reynolds de expressão da velocidade instantânea como a soma de duas contribuições, um valor médio e uma flutuação, tem-se como uma abordagem para o tratamento de escoamentos turbulentos, a resolução das equações de transporte aplicadas ao comportamento médio em relação ao tempo, explorando o fato de que a média da componente flutuante se anula. A equação da continuidade segundo tal metodologia não se altera. O mesmo não ocorre para as equações de Navier-Stokes em razão de a média temporal dos produtos de velocidades flutuantes existentes não ser em princípio nula, surgindo, conseqüentemente, termos adicionais atrelados ao que se define como ‘força turbulenta’ – os chamados tensores de Reynolds (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007)

Em notação indicial, segue a formulação para as equações RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2.19)$$

Dada a simetria dos tensores de Reynolds ( $\overline{u_i u_j}$ ), que compreendem 9 componentes, o emprego das equações RANS acarreta a introdução de 6 variáveis independentes adicionais ao sistema de equações governantes, até então composto por 4 incógnitas e 4 relações envolvendo-as, a equação da continuidade e as três componentes das equações de Navier-Stokes. Recai-se, desta forma, em um problema de fechamento no tocante ao excesso de graus de liberdade, suscitando-se, portanto, restrições independentes que expressem os tensores de Reynolds em função das demais variáveis inicialmente presentes, o que dá origem aos modelos de turbulência. (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007)

### II.7.3 – O Modelo dos Tensores de Reynolds

O modelo dos tensores de Reynolds (RSM – *Reynolds Stress Model*) consiste na proposição mais elaborada para o tratamento da turbulência com a utilização da abordagem RANS. Diferentemente de suas alternativas, que se pautam no modelo de viscosidade turbulenta de Boussinesq, tal formulação não incorre da hipótese de isotropia dos componentes normais dos tensores  $\overline{u_i u_j}$  em escoamentos cisalhantes, promovendo o fechamento do sistema de equações de transporte pelo emprego de equações de conservação adicionais para os tensores de Reynolds e para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ). Incluem-se, portanto, 7 novas equações diferenciais parciais, o que, apesar do substancial incremento de custo computacional em relação a vias de maior simplicidade, permite a contabilização de efeitos de curvatura, giro, rotação e rápidas mudanças nas taxas cisalhantes de modo mais preciso, conferindo acurácias satisfatórias às soluções as quais conduzem para escoamentos complexos. (BAI e WANG, 2006)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \cdot \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_k}(\varepsilon) \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + p_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.21)$$

A equação 2.19 representa o princípio de conservação sob formulação diferencial aplicado aos tensores de Reynolds em notação indicial. Igualados aos termos de acúmulo e advecção dispostos no membro esquerdo da equação, tem-se a soma de termos correspondentes à contribuição difusiva ( $D_{ij}$ ), à produção de turbulência ( $p_{ij}$ ), à interação pressão-tensão ( $\Pi_{ij}$ ) e à dissipação de energia cinética turbulenta ( $\varepsilon_{ij}$ ). Somente a parcela relativa à produção não requer modelagem. Na Tabela 5 a seguir, encontram-se sumarizadas as expressões atribuídas aos termos apontados conforme fornecidas por Versteeg e Malalasekera (2007):

Tabela 5 - Termos do modelo RSM.

Termos	Expressões	
$D_{ij}$	$\frac{\partial}{\partial x_m} \left( C_\mu \rho \frac{k^2}{\sigma_k \varepsilon} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_m} \right)$	(2.22)
$p_{ij}$	$-\rho \left( \overline{u_i u_m} \frac{\partial U_j}{\partial x_m} + \overline{u_j u_m} \frac{\partial U_i}{\partial x_m} \right)$	(2.23)
$\Pi_{ij}$	$-\rho \left( C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) + C_2 \left( p_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \right)$	(2.24)
$\varepsilon_{ij}$	$\frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}$	(2.25)

Os coeficientes empregados nos termos sujeitos à modelagem se encontram relacionados na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Coeficientes empregados no modelo RSM.

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_1$	$C_2$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
0,09	1,0	1,3	1,8	0,6	1,44	1,92

## II.8 – Abordagem Multifásica

Industrialmente, há uma vasta gama de modalidades de escoamentos classificados como multifásicos. O mesmo conjunto de equações governantes apresentado anteriormente se aplica incluindo contribuições decorrentes da interação estabelecida entre as diferentes fases constituintes do sistema que se analisa em termos de trocas mássica, térmica e de *momentum*. No tratamento de problemas multifásicos, mostra-se imperativo que, inicialmente, se decida acerca da abordagem a ser conduzida no que toca à modelagem das fases. Fundamentalmente, encontram-se disponíveis nos pacotes de Fluidodinâmica Computacional estratégias multifásicas derivadas dos pontos de vista lagrangeano e euleriano para análise de escoamentos.

Seja um fluxo bifásico com partículas dispersas em uma fase fluida contínua. A metodologia lagrangeana se pauta no acompanhamento da trajetória desenvolvida no escoamento que se estabelece de cada partícula presente, registrando-se propriedades primárias como posição, temperatura e concentração em função do tempo a partir das



quais se obtêm demais grandezas derivadas. Alternativamente, na abordagem euleriana, o foco da análise se trata não das partículas individuais, mas sim de uma região do domínio, um volume de controle, tomando-se pontos fixados nos quais avaliam-se as propriedades de interesse de forma a obter-se suas distribuições ou campos, cuja definição e evolução constituem os objetos efetivamente acompanhados neste tratamento. Para o problema multifásico genérico considerado, em ambas as visões, vale-se da formulação euleriana para a fase contínua, havendo distinções quanto à modelagem da fase discreta. (HAUKE, 2008)

No presente projeto, emprega-se a abordagem denominada de Euleriana-Euleriana, que se fundamenta na resolução de equações de transporte propostas para todas as fases existentes. Determina-se a distribuição das fases pela solução da equação para fração volumétrica, decorrente da aplicação da continuidade para  $n-1$  fases de um sistema  $n$ -fásico, agregando-se termos relativos ao transporte mássico global interfásico e a um eventual consumo ou geração. Já os campos de propriedades resultam da solução das equações de conservação para as diferentes fases incluindo as frações volumétricas e termos de interação entre fases. Por exemplo, na equação do movimento par cada fase, estão englobados termos que referem a forças de arraste, sustentação, massa virtual, tensão interfacial, interação turbulenta e dispersão turbulenta, representando o efeito multifásico no transporte de quantidade de movimento.

## II.9 – Planejamento de Experimentos

### II.9.1 – Introdução

As estratégias de planejamento estatístico de experimentos consistem em conjuntos de ferramentas estatísticas para a elaboração de desenhos experimentais com a finalidade de se avaliar a influência de variáveis sobre determinadas respostas em um sistema de interesse. Em particular, com o emprego de tais técnicas, procura-se obter modelos de regressão descritivos do comportamento de tais respostas considerando as influências tanto individuais quanto mútuas dos diferentes fatores tomados na análise, bem como o impacto da variabilidade originária dos erros experimentais, aspectos usualmente negligenciados ao se optar por análises do tipo univariável. (MONTGOMERY, 2001)

Há diversas vantagens que motivam a opção pelo uso do planejamento experimental ao se conduzir uma investigação que objetive o aprimoramento de dado processo ou material, identificando-se especificações e limites apropriados para suas condições operacionais ou de fabricação. Como principais, apontam-se: o uso de técnicas que aliam informações confiáveis minimizando o empirismo dos métodos de tentativa e erro; a redução no número de ensaios e da necessidade de réplicas; a análise simultânea dos efeitos de todas as variáveis consideradas; a possibilidade do tratamento de mais de uma resposta concomitantemente, admitindo o objetivo de otimização; e a avaliação do erro experimental. (MONTGOMERY, 2001)

Em concordância com Calado e Montgomery (2003), os diferentes métodos de planejamento de experimentos se encontram fundamentados sobre três princípios – a saber, replicação, aleatoriedade e blocagem. A utilização de réplicas nos testes desempenhados se constitui relevante por conta da determinação do erro experimental, o que possibilita a discriminação estatisticamente respaldada de observações, e, para a aplicação da média para representação de uma distribuição de dada variável, permite a obtenção de estimativas com maior precisão. Mostra-se de suma importância para as ferramentas estatísticas que as grandezas mensuradas em certo teste empírico, e, igualmente, os seus erros, consistam em variáveis aleatórias distribuídas de maneira independente, assegurando a distribuição de modo não tendencioso dos fatores não levados em consideração nas medições realizadas. A blocagem, por sua vez, se refere a uma técnica destinada a ampliar a precisão de um experimento evitando sua heterogeneidade pela definição de blocos que segregam condições específicas de fatores que influenciam o sistema examinado que não se deseja, contudo, incluir na modelagem proposta.

O emprego da metodologia de planejamento de experimentos se encontra subsidiado em uma série de estágios bem definidos associados à problemática em si que se investiga e à estrutura do método estatístico que se sucederá. Uma vez estabelecido o problema, aclarando-se o objetivo a ser atingido, indicam-se as variáveis dependentes ou respostas, os fatores ou variáveis independentes que se julga influenciar significativamente as primeiras (o que é corroborado ou não após os resultados), os níveis destes, atrelados aos limites delimitadores da região a ser submetida à análise, eventuais restrições à quantidade de ensaios e o quantitativo de réplicas que se realizará. Seleciona-se, assim, o tipo de planejamento que se apresenta mais apropriado ao caso em estudo, seguindo-se com a construção da matriz de experimentos, condução dos ensaios e análise

estatística dos resultados obtidos. Avalia-se, por fim, a consecução da meta delineada inicialmente, sendo possível que se conclua pela reformulação do problema em termos de escolha dos fatores e/ou de seus níveis. (MONTGOMERY, 2001)

## II.9.2 – Definições Estatísticas

Apresentam-se, a seguir, sob uma abordagem concisa e focalizada, os conceitos de maior significância para a compreensão adequada dos apontamentos realizados em meio à análise estatística dos resultados encontrados com o uso do planejamento experimental. Especificamente, tratam-se das definições de teste de hipóteses, análise de variância e validação estatística de modelos.

### II.9.2.1 – Teste de Hipóteses

Consiste em uma avaliação estatística em relação à determinada característica de uma população. Para seu emprego, identificam-se duas hipóteses complementares designadas por  $H_0$  e  $H_1$ , denominadas hipóteses nula e alternativa, respectivamente; tipicamente, a primeira se trata do oposto à formulação que se propõe em uma análise. Como decorrência de a execução do teste se dar com base em uma amostragem, e não na totalidade da população estudada, incorre-se em erros atrelados à opção por uma das hipóteses, representando a probabilidade de se rejeitar a outra no caso de esta ser verdadeira. Na Tabela 7, fornecem-se os tipos de erros envolvidos em tais avaliações. (PINHEIRO et al., 2012)

Tabela 7 - Tipos de erro em testes de hipóteses.

Tipo	Definição
I	Probabilidade de rejeitar-se $H_0$ quando for verdadeira.
II	Probabilidade de rejeitar-se $H_1$ quando for verdadeira.

O erro do tipo I recebe a designação de nível de significância  $\alpha$  do teste de hipóteses, sendo especificado à priori da análise estatística propriamente dita. Procedese, assim, determinando o valor de p (ou p-valor) do teste, que denota o seu nível descritivo, de tal maneira que, para o caso de p-valor  $\leq \alpha$ , rejeita-se  $H_0$ . Deste modo, entende-se o p-valor como o menor nível de significância para o qual ainda se rejeita a

hipótese nula. Valores de p baixos, portanto, indicam ser pequena a chance de a estatística de teste possuir o valor observado para a amostra em consonância à  $H_0$ . (PINHEIRO et al., 2012)

### *II.9.2.2 – Análise de Variância*

Nesta seção, complementa-se a conceituação estatística que constitui a fundamentação para se processar o emprego das diferentes técnicas de planejamento de experimentos. Particularmente, introduz-se a maior porção do ferramental matemático tomando-se uma regressão linear hipotética por razões de simplicidade, avançando-se com o fornecimento de demais definições pertinentes a modelagens multivariáveis, assim como com a elucidação dos procedimentos seguidos para fins de validação estatística das relações determinadas entre variáveis resposta e os fatores em um planejamento.

Sejam duas variáveis  $y$  e  $x$  cuja relação de linearidade se deseja investigar mediante a execução de observações em testes. Para tal, a partir de uma amostragem, plotam-se os dados coletados nas experimentações e calcula-se o chamado coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ). Quanto mais próximo da unidade em módulo for, mais fortemente as grandezas tomadas se correlacionam segundo a forma funcional em consideração, no caso, linear. Somente a obtenção de tal parâmetro não se mostra suficiente para que se prove a existência de uma dependência linear real entre  $x$  e  $y$ . Para o modelo construído, necessita-se de testes de hipóteses para averiguação das significâncias estatísticas de seus parâmetros componentes e sua validação. A aplicação destes se dá mediante a condução de uma análise de variância, com a qual se determinam os erros entre o modelo proposto e a distribuição empírica.

Denotando por  $y^*_i$  a  $i$ -ésima observação,  $y_i$  o valor correspondente encontrado com o modelo e  $\bar{y}_i$  a média das observações, sendo o valor fornecido pelo modelo no caso de não existir dependência com a variável independente, seguem-se as definições de soma quadrática, medida que se utiliza a fim de representar a variabilidade, isto é, os erros associados.

Dado o conjunto formado pelos pontos experimentais e previsões a partir do modelo de regressão ajustado, tem-se a soma quadrática total do sistema sendo aferida pelo somatório dos quadrados das discrepâncias entre as observações e a média de sua distribuição:

$$SQ_T = \sum_i (y_i^* - \overline{y_i^*})^2 \quad (2.26)$$

Calcula-se, também, a soma quadrática para a regressão realizada, a qual expressa o desvio entre as predições do modelo obtido e a média das observações:

$$SQ_{RL} = \sum_i (y_i - \overline{y_i^*})^2 \quad (2.27)$$

Atribui-se tal medida de variabilidade aos resíduos da regressão a partir da diferença entre as somas quadráticas total e da regressão:

$$SQ_{RES} = SQ_T - SQ_{RL} \quad (2.28)$$

Vale notar que o resíduo da regressão se desmembra em duas contribuições: o lapso de ajuste e discrepâncias intrínsecas à reprodutibilidade. Esta define o chamado erro puro, e sua estimativa isolada ocorre por meio de réplicas, comumente, feitas em um único grupo de tratamentos do planejamento, o ponto central.

Para a consecução dos testes de hipóteses supraditos, procede-se calculando os termos quadrados médios, o que se faz pela divisão das somas quadráticas pelos respectivos números de graus de liberdade na análise, sendo o total destes dado pelo quantitativo de ensaios descontado em uma unidade. Em posse de tais informações, executa-se o teste propriamente dito lançando mão da estatística F, em que se comparam os valores de F calculado e tabelado, rejeitando-se  $H_0$  se o primeiro superar o segundo, ou avaliando o p-valor em relação ao nível de significância adotado. Equivalentemente, admite-se a seleção para hipótese nula com vistas a se aferir a validade de um modelo a anulação de seus parâmetros (representação da distribuição por uma reta posicionada na média das observações) – equação 2.29a - ou a adequação da equação proposta para descrição dos dados – equação 2.30b:

$$F_{calc} = \frac{QM_{RL}}{QM_{RES}} \quad (2.29)$$

$$F_{calc} = \frac{QM_{FA}}{QM_{RES}} \quad (2.30)$$

Em que o subscrita ‘FA’ se refere à falta de ajuste, uma das parcelas da variabilidade atrelada aos resíduos da regressão conforme já definido anteriormente.

A razão entre as somas quadráticas da regressão e total consiste no coeficiente de determinação,  $R^2$ , e representa o percentual da variação total do sistema que é explicado pelo modelo formulado.

$$R^2 = \frac{SQ_{RL}}{SQ_T} \quad (2.31)$$

Em se tratando de problemas multivariáveis, com ampla frequência, avaliam-se os chamados efeitos relacionados aos fatores do planejamento, que abarcam as influências sobre as variáveis de resposta tomadas correspondentes às variáveis independentes individualmente e às suas interações para diferentes ordens. A magnitude e o sinal dos efeitos, determinados a partir das observações levantadas para os distintos tratamentos do planejamento, indicam a dominância dos impactos exercidos pelos fatores aos quais se vinculam e as naturezas destes, isto é, se acarretam o aumento ou a redução das variáveis dependentes. Pautando-se nos efeitos calculados, obtêm-se os coeficientes do modelo que se ajusta, as somas quadráticas e, com estas e os números de graus de liberdade, os termos quadrados médios, o que viabiliza a consecução dos testes de hipóteses. Estes devem ser desempenhados verificando a significância estatística de cada parâmetro constituinte do modelo e a validade de toda a descrição fornecida pela regressão.

Com vistas a se verificar a confiabilidade estatística de uma proposta de regressão de dados experimentais, cumpre ressaltar a imprescindibilidade de que os resíduos se encontrem distribuídos normal e independentemente. Consegue-se atestar tal critério, dentre outros métodos, por intermédio da plotagem dos resíduos de determinada distribuição em função dos valores previstos das variáveis dependentes ou daqueles assumidos pelas variáveis independentes, atentando para ocorrência de um arranjo aleatório que não sugiram alguma tendência, tal como crescimento, decréscimo, oscilação etc.

## II.9.2 – Planejamento Fatorial

Refere-se à técnica de planejamento estatístico de experimentos que consiste no emprego de todas as possíveis combinações entre níveis para as variáveis independentes consideradas, identificadas como fatores.

Sejam  $n$  o número de níveis e  $k$  o número de variáveis tomado. Tem-se como quantidade de ensaios a serem executados a fim de se recobrir a totalidade dos agrupamentos fatoriais  $n^k$ . Em tal caso, é dito ter-se um planejamento do tipo  $n$ - $k$ . Para

fins de exemplificação, considere um planejamento do tipo 2-2. O número de corridas experimentais é 4. Representa-se a matriz de experimentos conforme a esquematização disponibilizada na Figura 18:

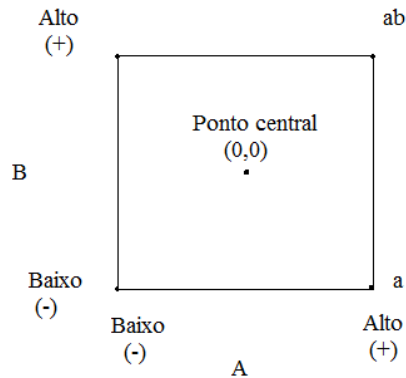


Figura 18 - Esquema de tratamentos de um planejamento fatorial completo do tipo 2-2.  
Fonte: Hammes *et al.* (2015)

Com tal técnica de delineamento experimental, resultam ajustes lineares para as distribuições de interesse, descritos pela formulação genérica de um caso 2-2 na equação 2.32. Graficamente, as representações correspondentes se tratam de planos. Em função de tal limitação, torna-se imperativo que se execute, além de réplicas no ponto central em quantidade suficiente para conferir confiabilidade às informações quantitativas advindas dos resultados obtidos no planejamento, uma análise de curvatura, a qual averigua a admissibilidade da descrição dos dados empíricos linearmente pela indicação da necessidade ou não de inclusão de termos de maior ordem no modelo de regressão que se propõe.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_{12} + \varepsilon \quad (2.32)$$

### II.9.3 – Delineamento Composto Central

Trata-se de uma técnica de planejamento de experimentos que admite a obtenção de modelos quadráticos relacionando respostas e fatores, sendo, então, uma opção viável quando o objetivo da pesquisa que se considera consiste em encontrar uma região de maximização ou minimização das variáveis dependentes, isto é, em otimização. Este não é o caso dos modelos lineares como aqueles fornecidos por planejamentos fatoriais com 2 níveis.

A montagem do desenho experimental parte da matriz referente a um planejamento fatorial completo de 2 níveis, que deve conter, ao menos, um ponto central,

englobando pontos axiais, cada um dos quais caracterizando-se por todas as variáveis serem avaliadas no centro, à exceção de uma, a qual se encontra em um nível  $\alpha$ . As variações existentes para a seleção dos pontos axiais definem os diferentes tipos de delineamento composto central, em que  $\alpha$  assume um valor situado entre 1 e  $\sqrt{k}$ . A Figura 19 contém uma representação esquemática da composição de tratamentos para um delineamento composto central de 2 fatores e  $\alpha = \sqrt{2}$ .

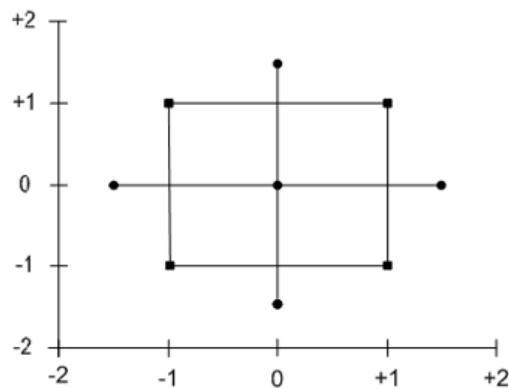


Figura 19 - Esquema de um delineamento composto central rotacional.

Segundo Box, Hunter e Hunter (2005), uma superfície de resposta deve ser rotacionável, o que se caracteriza por iguais estimativas de variâncias para predições fornecidas pelo modelo de segunda ordem ajustado para pontos situados a mesma distância do centro da região de análise tomada. Para tal, especifica-se o nível axial por  $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ .



## Capítulo III – Materiais e Métodos

### III.1 – O Hidrociclone Base

#### III.1.1 – Seleção e Descrição

Para a consecução do propósito de desenvolver-se um hidrociclone com geometria ótima para o processamento de dispersões de gotas de água em óleo, como procedimento inicial, definiu-se uma geometria básica, a partir da qual averíguam-se distintas variações de conformação. Desta forma, tomou-se por referência um modelo de hidrociclone de 10 cm de diâmetro que apresenta as proporções relativas à família Bradley, já fornecida na Tabela 4. Segue sua esquematização na Figura 20 abaixo:

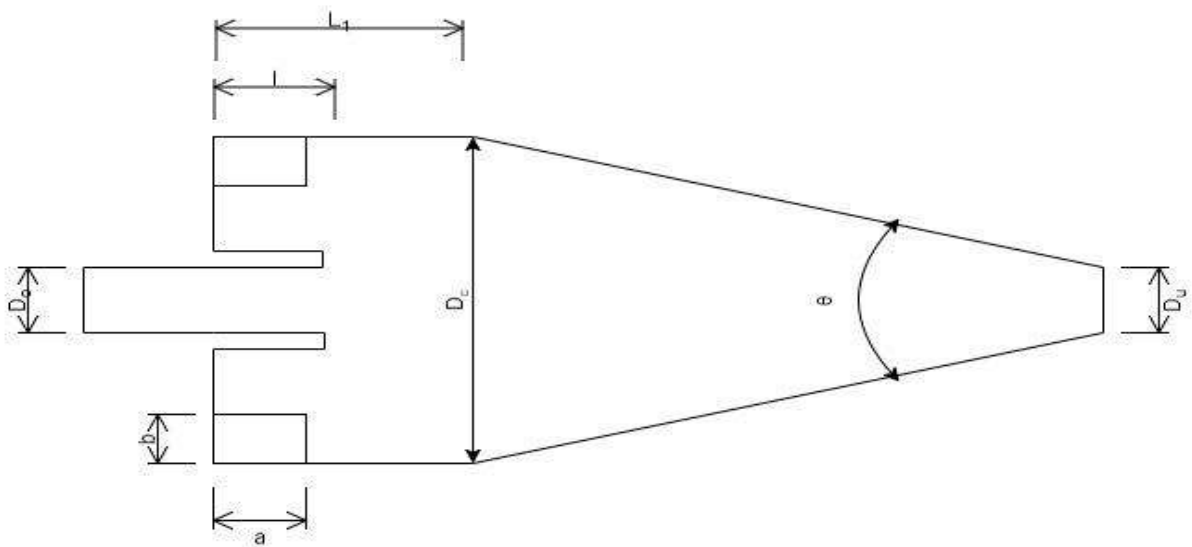


Figura 20 - Esquema da geometria base do hidrociclones.

Cumprir observar que, uma vez definido o diâmetro exibido pela porção cilíndrica do equipamento (no caso,  $D_c = 10$  cm), a aplicação das relações para hidrociclones do tipo Bradley conduz, imediatamente, à obtenção das dimensões de diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ), altura do *vortex finder* ( $l$ ), altura do corpo cilíndrico ( $L_1$ ), diâmetro de *inflow* ( $D_i$ ) e ângulo da seção cônica ( $\theta$ ). A definição do diâmetro de *underflow*, contudo, não se encontra amarrada pelo conjunto de razões entre grandezas geométricas. Para o

valor que lhe é atribuído, compatibiliza-se a altura do dispositivo de modo a assegurar o ângulo  $\theta$  já determinado pelo emprego das relações trigonométricas pertinentes.

Têm-se como ressalvas ao design básico de um hidrociclones Bradley clássico a consideração de dupla entrada com formato retangular. A especificação das dimensões para cada duto de admissão se deu por intermédio da conservação da área de seção transversal correspondente à forma cilíndrica através da qual escoava metade da vazão volumétrica originalmente estabelecida, mantendo-se a mesma velocidade superficial que a da tubulação com o diâmetro  $D_i$  e utilizando-se uma proporção de  $\frac{1}{2}$  entre os lados perpendicular e paralelo ao eixo central do equipamento. Na Tabela 8 a seguir, relacionam-se as dimensões atribuídas ao hidrociclone base.

Tabela 8 - Valores das variáveis geométricas do hidrociclone base.

Variável geométrica	Medida
$D_c$	10,0 cm
$D_u$	1,0 cm
$D_o$	2,0 cm
$l$	3,3 cm
$L_1$	5,0 cm
$a$	0,88 cm
$b$	1,76 cm
$\theta$	$9^\circ$

### III.1.2 – Condições Operacionais

Para determinação do cenário de operação com pauta no qual se guiará o projeto do hidrociclone a ser desenvolvido, tomaram-se especificações para as seguintes quantidades: vazão volumétrica de alimentação, propriedades físico-químicas das fases envolvidas e concentração de disperso na corrente a ser tratada. Os valores então definidos para tais grandezas encontram-se sumarizados na Tabela 9 abaixo. Em particular, consideraram-se cifras representativas das características de produções fluidas correspondentes a campos cuja exploração tenha se iniciado recentemente e a petróleos de elevada qualidade, apresentando altos valores de API e reduzida viscosidade. Rememorando, segue-se que o óleo consiste na fase contínua da dispersão e a água salgada, na fase discreta.

Tabela 9 - Condições de operação para o hidrociclone.

Propriedade	Valor
Densidade da fase dispersa (g/cm <sup>3</sup> )	1,03
Densidade da fase contínua (g/cm <sup>3</sup> )	0,9
Viscosidade da fase contínua (cP)	2
Vazão volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	923,6
Concentração volum. da fase dispersa (%)	10

Em face à relativamente limitada extensão do aporte de investigações científico-tecnológicas dedicadas à avaliação da separação ciclônica de dispersões do tipo em exame (A/O), a definição do teor aquoso da mistura submetida ao tratamento considerado merece especial atenção. A fim de se proceder com o estudo de simulação numérica via fluidodinâmica computacional do equipamento em questão, constatou-se que, como já bem consolidado na literatura e no meio industrial, em sendo o escoamento desenvolvido no interior de hidrociclones submetido a tensões cisalhantes de altas magnitudes, a dispersão com qualquer fração de água dispersa, tipicamente, se comportaria tal qual um fluido newtoniano no tratamento com hidrociclone. Particularmente, para a especificação de 10%, conforme avaliado por Wong *et al.* (2015) em seu estudo a respeito da reologia de emulsões de água em óleo cru leve, o caráter newtoniano ocorre para tensões superiores a 200 s<sup>-1</sup>. Trata-se, então, de uma escolha compatível à opção pelo emprego em instalações em campos novos, que possuem reduzidos teores de água nos fluidos produzidos, e que não incorre em maiores graus de complexidade na modelagem a ser utilizada. Espera-se, ainda, que esta seja uma abordagem conservadora no sentido de que, com o incremento da fração de água alimentada à medida que o reservatório petrolífero amadureça, efeitos líquidos de coalescência contribuam para a separação.

### III.1.3 – Geometria

Para a elaboração do domínio computacional referente ao modelo básico definido para o hidrociclone em desenvolvimento, lançou-se mão do software DesignModeler® v18.0 da Ansys®. As ferramentas de construção CAD disponibilizadas pelo programa mencionado se apresentaram suficientes para, de modo pronto, gerar a geometria base do equipamento. As etapas seguidas neste estágio do estudo de simulação envolveram a

definição de perfis bidimensionais das seções cilíndrica e cônica em conjunto ao tubo de *vortex finder* e das entradas, acompanhada por operações geométricas de revolução ao redor do eixo longitudinal do hidrociclone e extrusão. Na Figura 21, exibe-se a geometria resultante.

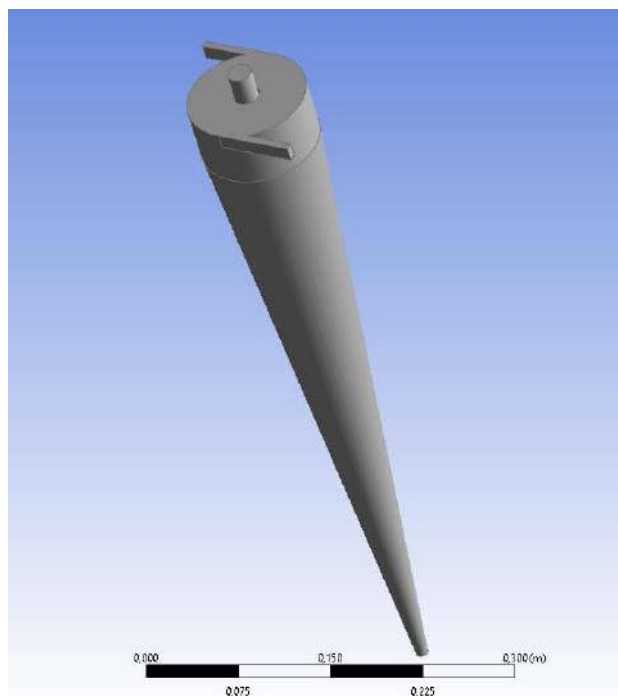


Figura 21 - Geometria do hidrociclone base.

#### III.1.4 – Teste de Malha

A condução do teste de malha, necessário para definição do grau de refinamento da discretização que concilie independência numérica quanto à malha empregada e custo computacional incorrido, que se traduz no tempo requisitado para consecução das simulações, ocorreu mediante a avaliação de três níveis de refino. A tabela 10 reúne as malhas consideradas com os respectivos quantitativos de nós (ou pontos nodais).

Tabela 10 - Malhas utilizadas no teste de independência.

Identificação	Nº de nós
Malha 1	226.323
Malha 2	558.988
Malha 3	901.660

Vale notar que se empregaram malhas do tipo estruturada, consistindo de hexaedros. Para sua construção, utilizou-se o software gerador de malhas da Ansys® ICEM CFD® v18.0. Na Figura 22, fornecem-se as ilustrações relativas aos três graus de refino submetidos à avaliação, e, na Figura 23, apresenta-se, em maiores detalhes, a zona superior da malha 2, incluindo tubo de overflow, entradas e seção cilíndrica.



Figura 22 - Vista frontal das malhas do teste: (a) 1 (b) 2 e (c) 3 de acordo com a Tabela 10.

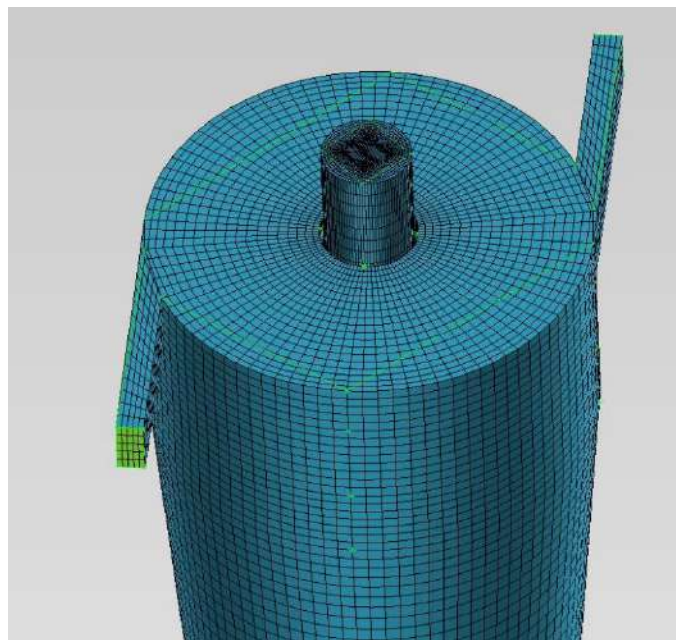


Figura 23 - Porção superior da malha 2.

A execução propriamente dita do teste de independência de malha se deu mediante a realização de simulações para os graus de discretização então considerados, cujas configurações são abordadas posteriormente na seção III.3. Em particular, comparam-se o comportamento fluidodinâmico estabelecido pelos perfis de velocidade tangencial em diferentes localizações ao longo do eixo central do hidrociclone e os resultados macroscópicos atrelados à performance do equipamento traduzidos pelos valores de eficiência granulométrica, razão de fluido e queda de pressão. Na Figura 24, indicam-se as posições onde se situam as linhas nas quais ocorreu a avaliação dos perfis citados.

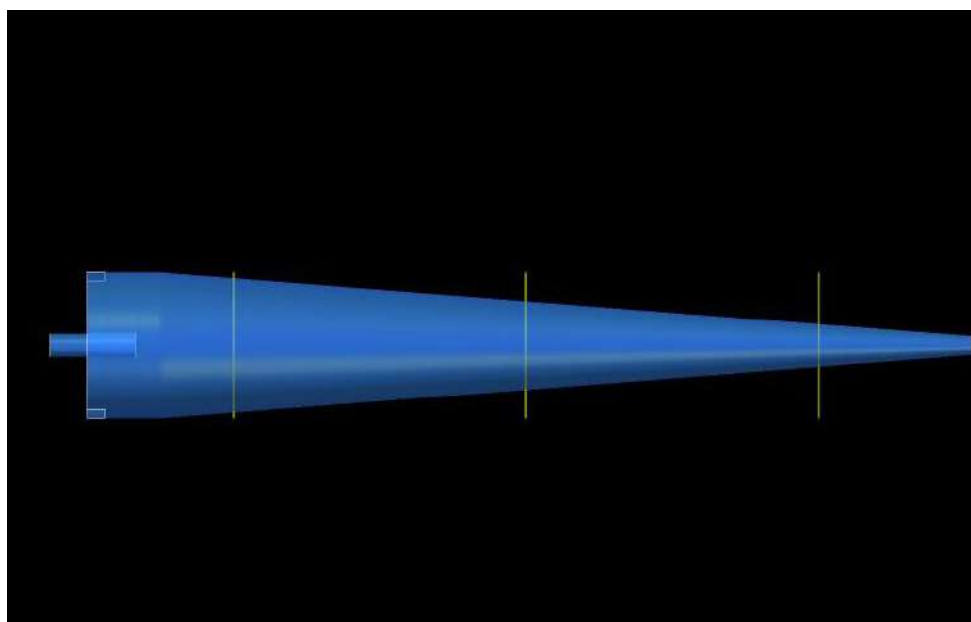


Figura 24 - Locais de avaliação do perfil de velocidades (linhas amarelas).

### III.2 – Planejamento Experimental

Conforme já apresentado, com o presente projeto, tem-se a finalidade de desenvolver um hidrociclone com dimensões ótimas para segregar as fases aquosa e oleosa de dispersões do tipo água em óleo. Recai-se, assim, em um problema de otimização que se pretende tratar por meio do recurso ao planejamento de experimentos.

Especificam-se como variáveis de resposta, que devem constituir as funções objetivo para o sistema em análise, a eficiência de separação granulométrica ( $G$ ) e a razão de fluido ( $R_f$ ), as quais exprimem a performance separativa do equipamento em estudo e se mostram antagônicas no sentido de que se almeja a maximização da primeira e a minimização da segunda. As variáveis independentes, de decisão, cuja influência sobre

as respostas se avalia, restringiram-se aos diâmetros das saídas de *overflow* e de *underflow* do dispositivo, mantendo-se inalteradas as demais grandezas geométricas do modelo básico selecionado de hidrociclone. Como limites inferior e superior, ou níveis, para os fatores eleitos no planejamento, tomaram-se as extremidades dos intervalos relacionados na tabela 11 abaixo. Já a técnica particularmente empregada consistiu no delineamento composto central rotacional, ou, abreviadamente, DCCR, uma das possíveis abordagens para casos de otimização.

Tabela 11 - Níveis dos fatores para o delineamento.

Fator	Nível mínimo (cm)	Nível máximo (cm)	Nível mínimo codificado	Nível máximo codificado
D <sub>o</sub>	0,7	2,3	-1	+1
D <sub>u</sub>	0,5	1,5	-1	+1

### III.2.1 – Matriz de Experimentos

Uma vez estabelecida a problemática à qual se emprega o planejamento de experimentos, segue-se a definição da matriz de ensaios a serem desempenhados, função do tipo de delineamento aplicado. Em se tratando de um DCCR, as corridas abrangem tratamentos associados à totalidade dos casos fatoriais acrescentada dos pontos axiais e de um ponto central, contabilizando-se 9 experimentos. Sendo um planejamento rotacional, os níveis axiais se referem às cifras +1,41 e -1,41, ou, em valores reais, a 2,628 cm e 0,372 cm para D<sub>o</sub> e 1,705 cm e 0,295 cm para D<sub>u</sub>. É válido notar que não se incluem réplicas no ponto central a despeito de sua relevância para a confiabilidade estatística em razão de a metodologia de análise consistir em simulações computacionais, as quais fornecem resultados invariáveis para um conjunto fixado de condições.

A Tabela 12 sumariza a matriz de ensaios de simulação executados para aplicação do DCCR:

Tabela 12 - Desenho experimental.

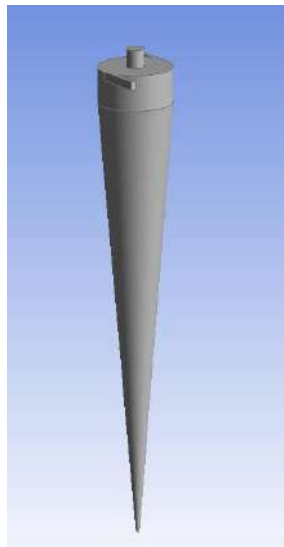
Tratamento	Nível – D <sub>o</sub>	Nível – D <sub>u</sub>	Nível – D <sub>o</sub> (real) (cm)	Nível – D <sub>u</sub> (real) (cm)
HC1	+1	-1	2,3	0,5
HC2	+1	+1	2,3	1,5
HC3	-1	-1	0,7	0,5
HC4	-1	+1	0,7	1,5
HC5	+1,41	0	2,628	1,0
HC6	-1,41	0	0,372	1,0
HC7	0	+1,41	1,5	1,705
HC8	0	-1,41	1,5	0,295
HC9	0	0	1,5	1,0

Para processamento das análises estatísticas subsequentes ao levantamento de dados com a realização, utilizou-se o software Statistica® v12.0.

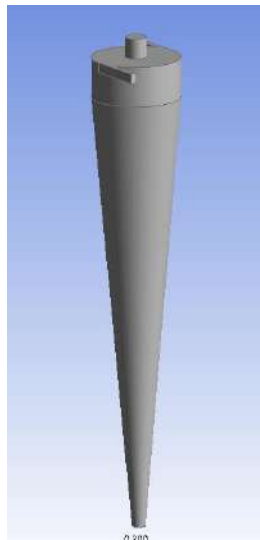
### III.2.2 – Geometrias

A partir do desenho de experimentos definido, elaboraram-se as geometrias correspondentes a cada corrida do planejamento. A cada uma destas, atribuiu-se uma malha computacional com o nível de refino resultante do teste de malha para se suceder com as simulações propriamente ditas. Visou-se, evidentemente, a determinar os valores correspondentes aos pontos da matriz experimental das respostas cujos comportamentos em relação a D<sub>o</sub> e D<sub>u</sub> se deseja modelar. Na Figura 25 a seguir, estão exibidos os modelos de geometria para os 9 tratamentos do delineamento utilizado.

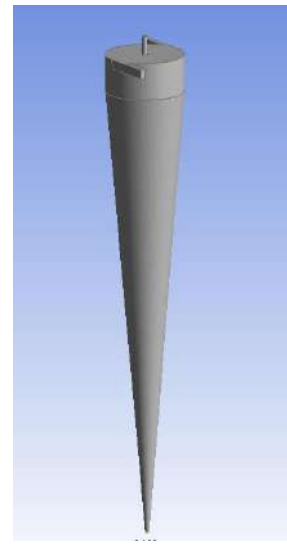




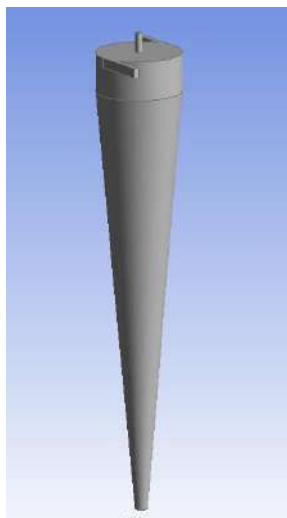
(a) HC1



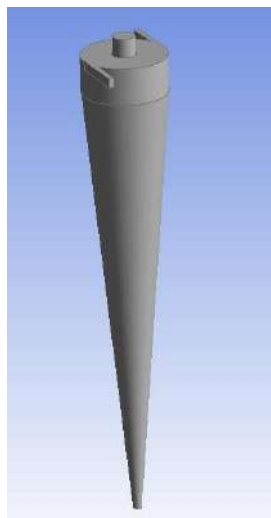
b) HC2



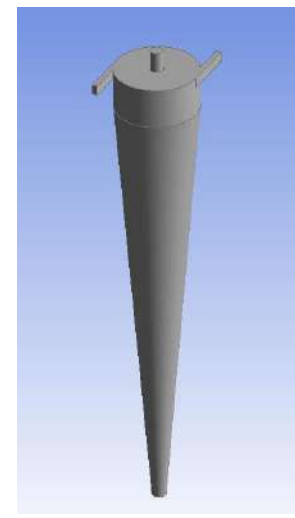
(c) HC3



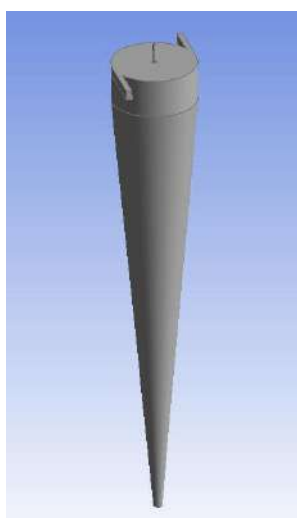
(d) HC4



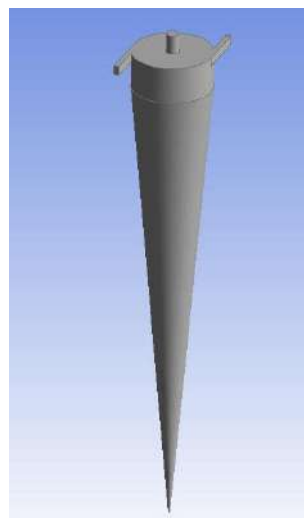
(e) HC5



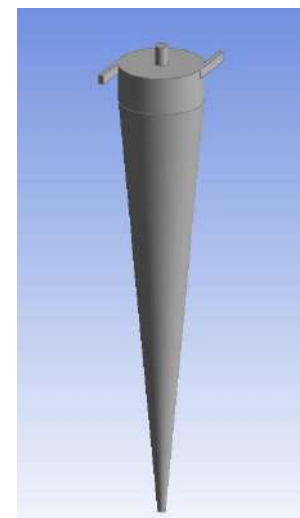
(f) HC6



(g) HC7



(h) HC8



(i) HC9

Figura 25 - Modelos geométricos do planejamento DCCR de acordo com a Tabela 12.

### III.3 – Simulações

A seguir, apresentam-se as configurações utilizadas para a realização das simulações. Estas se atrelam às definições do pré-processamento, englobando, então, modelagem fenomenológica, condições de contorno e especificações ligadas às metodologias numéricas de solução. Em seguida, enumeram-se as variadas simulações conduzidas para a obtenção dos resultados do presente projeto. Vale indicar que, para realiza-las, fez-se uso do software Fluent® v18.0, também da Ansys®.

Na Figura 26 abaixo, exhibe-se uma ilustração referente à interface do programa supramencionado responsável pelas etapas de pré-processamento e de solução numérica. A definição das configurações das simulações obedece a uma sequência característica de seleções. Inicialmente, aplicou-se a opção de tratamento estacionário para cada simulação. Uma vez inseridos os materiais constituintes do sistema a ser modelado e aplicados os respectivos valores de propriedades, os quais, no caso, correspondem à água salgada e óleo, prossegue-se com a determinação da modelagem matemática do problema. Para tanto, ativam-se as formulações relativas ao modelo de turbulência que se emprega e ao tratamento multifásico utilizado, consistindo, para as simulações desempenhadas em questão, no dos tensores de Reynolds (com 7 equações de transporte) e na abordagem Euleriana-Euleriana bifásica implícita, especificando-se óleo como a fase primária (contínua) e água como a fase secundária (dispersa), respectivamente, e adotando-se as interações multifásicas dadas pelas forças de massa virtual e de arraste (lei de Schiller-Naumann). Em meio a tais escolhas, estabelece-se o conjunto de equações governantes do escoamento a serem resolvidas, agregando continuidade, equações RANS para cada fase e equação para fração volumétrica da fase dispersa.

Tendo-se determinado a modelagem para o problema, a etapa que segue diz respeito à especificação das condições de contorno. Necessitam-se de 5, uma para cada porção da fronteira do hidrociclone modelado; a saber, as duas seções de entrada, as saídas de *overflow* e *underflow* e a parede, que compreende as demais parcelas do contorno. Para as entradas, fixou-se a velocidade de escoamento como uniforme a 6 m.s<sup>-1</sup> e a fração volumétrica de água em 10%. Nas saídas, especificou-se pressão manométrica em 0 Pa, para caracterizar abertura à pressão atmosférica, e fluxo reverso consistindo puramente de óleo, o que se trata de uma simplificação para o presente caso, uma vez que, como consequência da baixa pressão atingida na vizinha do eixo central do hidrociclone, é comum a formação de um núcleo de ar – o chamado *air core*, cuja

consideração nas simulações feitas requisitaria uma modelagem de escoamento trifásica. Na parede, utilizou-se a condição de aderência para ambas as fases.

No que tange à metodologia numérica, iniciou-se lançando mão da abordagem pseudo-transiente como estratégia de sub-relaxação implícita para a condução das simulações estacionárias. Explicitamente, atribuiu-se a cifra de 0,4 para os fatores de sub-relaxação para pressão, momentum, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação de energia cinética turbulenta e tensores de Reynolds. Adotou-se a formulação “*coupled*” para o acoplamento pressão-velocidade, que admite o tratamento pseudo-transiente, e “*least squares cell based*” para a discretização dos termos difusivos (proporcionais aos gradientes das propriedades). Para os termos advectivos de todas as equações de conservação envolvidas, empregou-se o esquema de 3ª ordem QUICK, aplicável somente para malhas hexaédricas.

Vale apontar que a seleção da abordagem pseudo-transiente para alcance do estado estacionário do escoamento em análise se fundamenta nos resultados do estudo de simulação conduzido por Anjos, Oliveira e Medronho (2017). Identificou-se que, com o regime pseudo-transiente, decorreram resultados com ampla concordância em relação àqueles obtidos pela formulação transiente demandando custos computacionais consideravelmente inferiores.

Valendo-se das configurações supramencionadas, executaram-se um total de 24 simulações com modelos de hidrociclone. O teste de malha requisitou 3 simulações com a geometria básica do hidrociclone. Já o delineamento experimental realizado compreendeu 9 simulações relativas às corridas fatoriais, ponto central e tratamentos axiais, cada qual com seu modelo geométrico particular (variando em termos de  $D_o$  e  $D_u$ ). Até então, procedeu-se considerando gotas com  $50 \mu m$ . Em face à obtenção do design ótimo para o hidrociclone em desenvolvimento como resultado do planejamento aplicado, sucederam-se mais 12 simulações nas quais se alterou somente o diâmetro de gota da fase aquosa entre  $10 \mu m$  e  $120 \mu m$ , de 10 em 10, para construção da curva de eficiência granulométrica do equipamento, o que viabiliza a previsão de sua performance para quaisquer distribuições de tamanhos consideradas para a corrente alimentada. Cumpre destacar que se estenderam tais simulações o suficiente para que a discrepância no balanço de massa de cada fase estivesse inferior a 0,5% em relação à respectiva vazão mássica admitida, o que levou a cerca de 6000 iterações em cada ensaio. Por fim,

desempenhou-se mais 1 simulação para avaliação da influência dos resíduos atingidos das equações de conservação na aplicação dos métodos de solução quanto à convergência.

A visualização dos resultados gerados com as simulações se deu por meio do software de pós-processamento da Ansys® CFD-Post® v18.0.

A realização das simulações então descritas ocorreu nas dependências do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LABCFD, EQ/UFRJ), com a utilização de cinco computadores dispondo das configurações e capacidades fornecidas a seguir:

- Processador: Intel® Core™ i7 CPU 860 @ 2.80 GHz 2.80GHz.
- Memória RAM: 8,00 GB.
- Tipo de sistema: 64-bit.
- Sistema operacional: Windows 10 Pro versão 1709.

## Capítulo IV – Resultados e Discussão

### IV.1 – Teste de Malha

Conforme anteriormente enunciado, a realização do teste de independência de malha se baseou tanto na avaliação do perfil de velocidades tangenciais perpendicularmente ao eixo central do equipamento em três distintas alturas como na comparação dos resultados associados à performance do processo separativo – a eficiência de separação para o tamanho de gota definido ( $50 \mu\text{m}$ ) e a razão de fluido – para as três malhas construídas com diferentes níveis de refino. Nas Figuras 26, 27 e 28 que se seguem, encontram-se apresentadas as referidas distribuições da componente tangencial do campo de velocidades para a fase contínua.

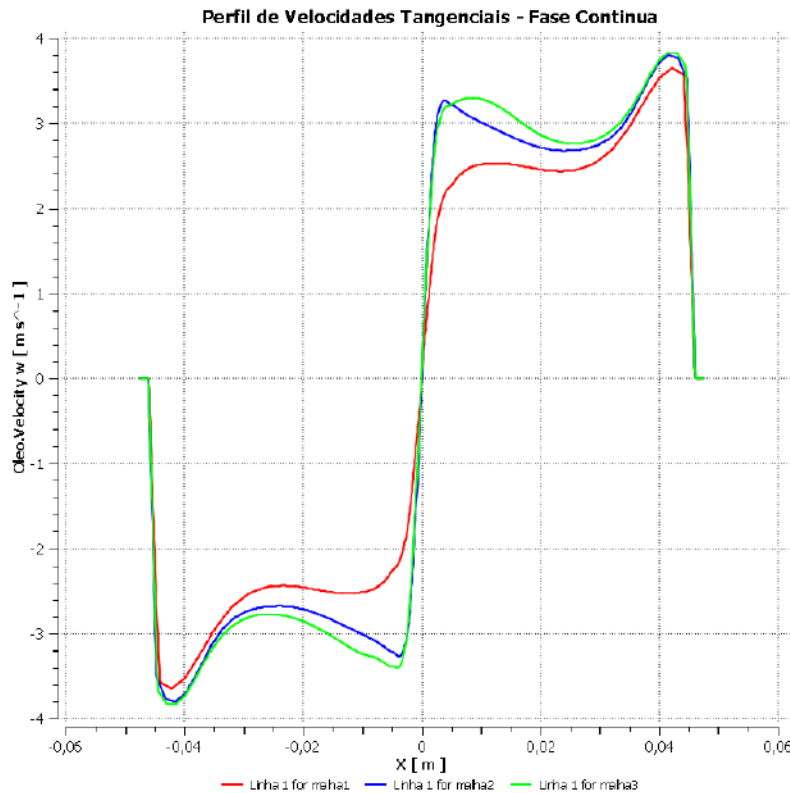


Figura 26 - Perfil de velocidades tangenciais para o óleo na linha 1.

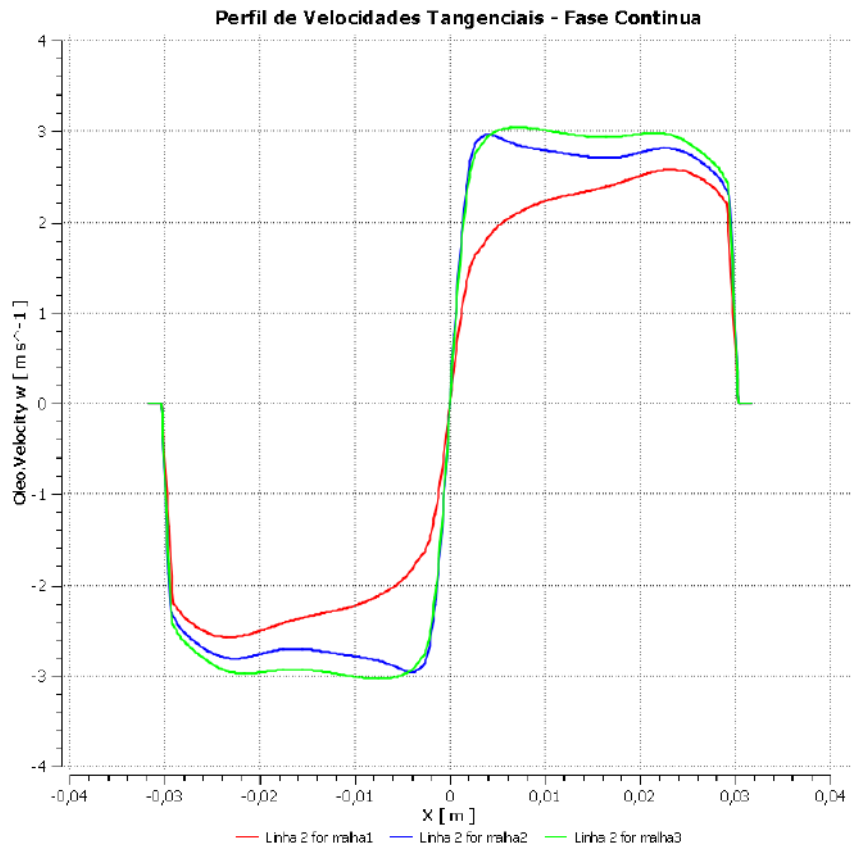


Figura 27 - Perfil de velocidades tangenciais para o óleo na linha 2.

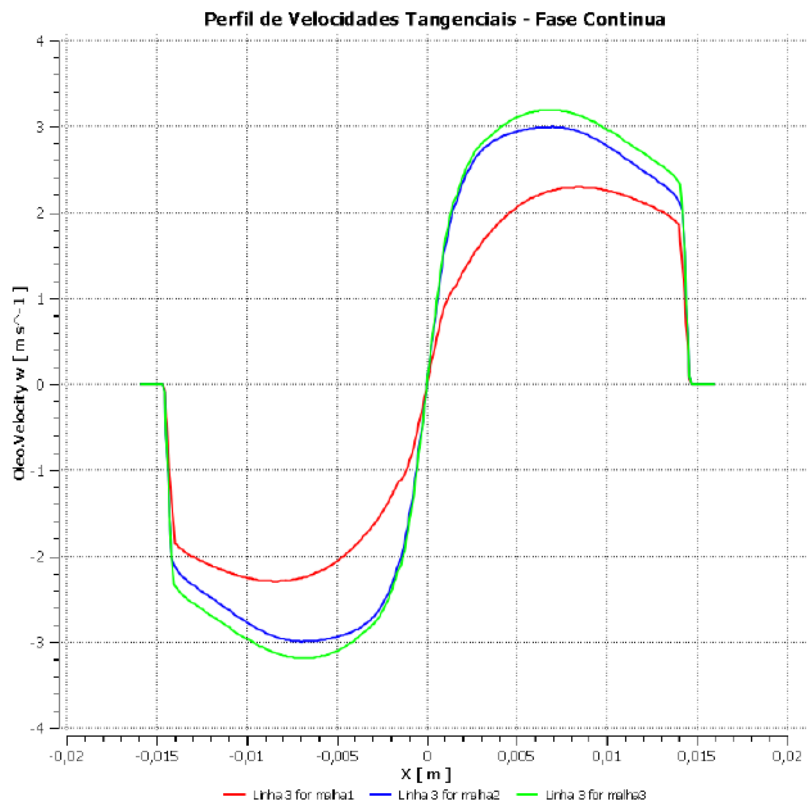


Figura 28 - Perfil de velocidades tangenciais para o óleo na linha 3.

Na Tabela 13 abaixo, fornecem-se os valores determinados de eficiência granulométrica e razão de fluido para as três malhas em questão, obtidos mediante as taxas mássicas das fases primária e secundária definidas calculadas nas seções de contorno do hidrociclone no próprio *solver*.

Tabela 13 - Teste de malha: eficiência de separação e razão de fluido.

Malha	G (%)	R <sub>f</sub> (%)	G' (%)	Erro Relativo à Malha 3 (G)	Erro Relativo à Malha 3 (R <sub>f</sub> )
1	32,3	16,6	18,8	8,5	23,9
2	34,8	12,0	25,8	1,4	10,4
3	35,3	13,4	25,3	-	-

De início, consideram-se os aspectos exibidos pelas distribuições da componente tangencial do campo de velocidade desenvolvido, grandeza de ampla relevância na operação do equipamento por impactar diretamente a intensidade do campo centrífugo gerado e, por conseguinte, o processo de separação. Visualmente, observam-se perfis axissimétricos, o que se concilia à expectativa em relação ao escoamento no interior de hidrociclones em zonas que não sofrem influência exacerbada da turbulência na alimentação, cuja discrepância existente se apresenta decrescente à medida que se passa do menor para o maior grau de refino de malha. Quantitativamente, corrobora-se esta assertiva por interposição dos desvios entre os valores máximos de velocidade tangencial nas linhas tomadas para as três malhas: para as linhas 1, 2 e 3, respectivamente, têm-se os máximos de 3,65 m.s<sup>-1</sup>, 2,58 m.s<sup>-1</sup> e 2,30 m.s<sup>-1</sup> para a malha 1, de 3,81 m.s<sup>-1</sup>, 2,96 m.s<sup>-1</sup> e 3,04 m.s<sup>-1</sup> para a malha 2 e de 3,83 m.s<sup>-1</sup>, 3,04 m.s<sup>-1</sup> e 3,19 m.s<sup>-1</sup> para a malha 3. Em relação ao maior número de elementos na malha, a diferença no perfil é substancialmente acentuada para a primeira malha e relativamente diminuta para a malha com quantidade de nós intermediária, mostrando-se aceitável.

Quanto aos parâmetros de desempenho do hidrociclone, um padrão similar ao acima discutido ocorre com respeito à diferenciação entre os resultados no teste de malha. Relativos à terceira malha, que possui o maior número de elementos, os desvios percentuais nos valores de eficiência granulométrica e razão de fluido são contabilizados em 8,5% e 23,9% para a primeira malha e em 1,4% e 10,4% para a segunda, respectivamente. Efetuando-se a mesma averiguação para a eficiência reduzida, quantidade que mede isoladamente o poder de separação do dispositivo pela remoção do

efeito decorrente da existência de uma razão de fluido, segue que os valores destoam em 25,7% para a malha 1 e 2,0% para a malha 2. Em meio a tais comparações, conclui-se pela não razoabilidade em se adotar a malha com menor número de nós para sequência do estudo de simulação e pelo fato de que, empregando a segunda malha, ainda que de forma reduzida, superestima-se a capacidade separativa do dispositivo. No entanto, ao se contrapor os custos computacionais demandados para os diferentes níveis de refinamento da malha, requisitando-se por volta de 10 horas, 24 horas e 4 dias para as malhas 1, 2 e 3, respectivamente, fica evidente a admissibilidade de se prosseguir com a segunda malha, que dispõe de cerca de 560 mil pontos nodais, dado seu expressivamente menor tempo de simulação incorrido e as suas relativamente baixas discrepâncias para com a malha de 900 mil nós, tanto em relação ao perfil de velocidade tangencial quanto, ainda mais relevante, as grandezas de performance.

## IV.2 – Planejamento Experimental

Como já mencionado no segundo capítulo, conduziram-se as simulações correspondentes às corridas do desenho experimental implantado, que deriva da técnica da qual se lançou mão de delineamento composto central rotacional. Na Tabela 14 que se segue, sumarizam-se os valores calculados das variáveis de respostas eficiência granulométrica e razão de fluido diretamente a partir dos resultados das simulações referentes ao total de 9 tratamentos, bem como os de eficiência reduzida então levantados com base em  $G$  e  $R_f$ . Vale rememorar a consideração do diâmetro de gota de água de 50  $\mu m$  em todos os ensaios executados.



Tabela 14 - Matriz de experimentos após as corridas.

Tratamento	Nível – Do	Nível – Du	Nível – Do (real) (cm)	Nível – Du (real) (cm)	G(%)	R <sub>f</sub> (%)	G'(%)
HC1	+1	-1	2,3	0,5	8,9	1,1	7,9
HC2	+1	+1	2,3	1,5	46,7	20,1	33,3
HC3	-1	-1	0,7	0,5	56,1	36,8	30,5
HC4	-1	+1	0,7	1,5	96,1	86,1	72,2
HC5	+1,41	0	2,628	1,0	18,6	4,9	14,4
HC6	-1,41	0	0,372	1,0	98,7	90,6	85,7
HC7	0	+1,41	1,5	1,705	80,3	58,8	52,2
HC8	0	-1,41	1,5	0,295	13,2	2,5	11,0
HC9	0	0	1,5	1,0	53,2	29,2	33,8

Em meio a tal conjunto de dados, sucedeu-se com as etapas de avaliação estatística, com as quais, em última instância, tem-se a pretensão de identificar modelos de correlação descritivos do relacionamento estabelecido entre as respostas em questão e as variáveis de decisão do projeto tomadas,  $D_o$  e  $D_u$ . Para tanto, em conformidade ao já citado no capítulo anterior, valeu-se dos recursos disponibilizados pelo *software* Statistica® v12.0. Uma vez inseridos os dados do planejamento no programa mencionado, procede-se com o emprego de uma análise de efeitos para cada uma das variáveis dependentes, visando-se a ajustar o modelo de regressão decorrente do DCCR pela retenção dos parâmetros que se exibirem significativos. Subsequentemente, aplica-se uma análise de variância para cada um dos modelos com o objetivo de se atestar sua validade. Por fim, deve-se checar as características de normalidade e aleatoriedade dos resíduos das regressões definidas.

#### IV.2.1 – Eficiência Granulométrica

Os estágios da aplicação da análise de efeitos ao modelo de regressão determinado para a resposta eficiência de separação por tamanho se encontram ilustrados na Figura 29. Sem a negligência de quaisquer das interações de fatores, têm-se cifras elevadas para os coeficientes de correlação ( $R$ ) e de determinação ( $R^2$ ), dados, respectivamente, por 99,212% e 97,898%. Os dois termos quadráticos e a interação de 1ª ordem entre  $D_o$  e  $D_u$  se apresentam não significativos, o que se observa pelas magnitudes dos respectivos

valores de p, que superam em demasia o nível de significância adotado para a análise de  $\alpha = 5\%$ . Em consonância ao que se espera, prossegue-se removendo um a um os fatores que não se mostram significativos estatisticamente mediante o acompanhamento das qualidades de ajuste e explicação do modelo. Retirando-se a interação linear entre  $D_o$  e  $D_u$ , verificam-se uma queda inexpressiva em  $R^2$ , que passa a 99,199%, e um leve aumento em R, elevado à marca de 98,398%. Ainda remanescem dois termos não significativos, que tiveram seus p-valores reduzidos em relação ao estado de partida. Excluindo-se, agora, o fator  $D_o$  quadrático, resulta um comportamento análogo ao anterior, em que R e  $R^2$  se modificam para 98,401% e 99,001%, respectivamente, mas, diferentemente, o termo  $D_u$  quadrático se torna marginalmente significativo, com um p-valor de 5,183%. A fim de se decidir quanto à manutenção deste, comparam-se os cenários em que está presente e ausente; já que, para o modelo linear oriundo da eliminação do referido fator, ocorrem quedas relativamente abruptas tanto na explicação ( $R^2 = 97,771\%$ ) como no ajuste ( $R = 96,947\%$ ), opta-se por conservar o termo proporcional a  $D_u^2$  no modelo.

Effect Estimates; Var.:G; R-sqr=.99212; Adj.:97898 (Spreadsheet14)										
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=24.82596										
DV: G										
Factor	Effect	Std. Err.	t(3)	p	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt
Mean/Interc.	53.1825	4.982388	10.6741	0.001758	37.3263	69.0387	53.1825	4.982388	37.3263	69.0387
(1)Do (L)	-52.5496	3.528458	-14.8931	0.000657	-63.7787	-41.3205	-26.2748	1.764229	-31.8894	-20.6602
Do (Q)	5.0963	5.863010	0.8692	0.448678	-13.5624	23.7651	2.5482	2.931505	-6.7812	11.8775
(2)Du (L)	43.2266	3.528458	12.2508	0.001171	31.9975	54.4557	21.6133	1.764229	15.9987	27.2279
Du (Q)	-6.8082	5.863010	-1.1612	0.329558	-25.4669	11.8505	-3.4041	2.931505	-12.7334	5.9253
1L by 2L	-1.0881	4.982565	-0.2184	0.841143	-16.9449	14.7686	-0.5441	2.491283	-8.4724	7.3843

Effect Estimates; Var.:G; R-sqr=.99199; Adj.:98398 (Spreadsheet14)										
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=18.91546										
DV: G										
Factor	Effect	Std. Err.	t(4)	p	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt
Mean/Interc.	53.1825	4.349036	12.2286	0.000257	41.1076	65.2574	53.1825	4.349036	41.1076	65.2574
(1)Do (L)	-52.5496	3.079927	-17.0620	0.000069	-61.1008	-43.9983	-26.2748	1.539964	-30.5504	-21.9992
Do (Q)	5.0963	5.117715	0.9958	0.375698	-9.1127	19.3054	2.5482	2.558858	-4.5564	9.6527
(2)Du (L)	43.2266	3.079927	14.0349	0.000150	34.6753	51.7778	21.6133	1.539964	17.3377	25.8889
Du (Q)	-6.8082	5.117715	-1.3303	0.254192	-21.0172	7.4009	-3.4041	2.558858	-10.5086	3.7004

Effect Estimates; Var.:G; R-sqr=.99001; Adj.:98401 (Spreadsheet14)										
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=18.88393										
DV: G										
Factor	Effect	Std. Err.	t(5)	p	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt
Mean/Interc.	56.8738	2.272679	25.0250	0.000002	51.0317	62.7159	56.8738	2.272679	51.0317	62.7159
(1)Do (L)	-52.5496	3.077359	-17.0762	0.000013	-60.4602	-44.6390	-26.2748	1.538680	-30.2301	-22.3195
(2)Du (L)	43.2266	3.077359	14.0467	0.000033	35.3160	51.1372	21.6133	1.538680	17.6580	25.5686
Du (Q)	-10.0421	3.952057	-2.5410	0.051832	-20.2012	0.1170	-5.0211	1.976028	-10.1006	0.0585

Effect Estimates; Var.:G; R-sqr=.9771; Adj.:96947 (Spreadsheet14)										
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=36.05759										
DV: G										
Factor	Effect	Std. Err.	t(6)	p	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95. % Cnf.Limt	+95. % Cnf.Limt
Mean/Interc.	52.4239	2.001599	26.1910	0.000000	47.5262	57.3217	52.4239	2.001599	47.5262	57.3217
(1)Do (L)	-52.5496	4.252363	-12.3577	0.000017	-62.9547	-42.1444	-26.2748	2.126181	-31.4774	-21.0722
(2)Du (L)	43.2266	4.252363	10.1653	0.000053	32.8214	53.6318	21.6133	2.126181	16.4107	26.8159

Figura 29 - Análise de efeitos para eficiência granulométrica.

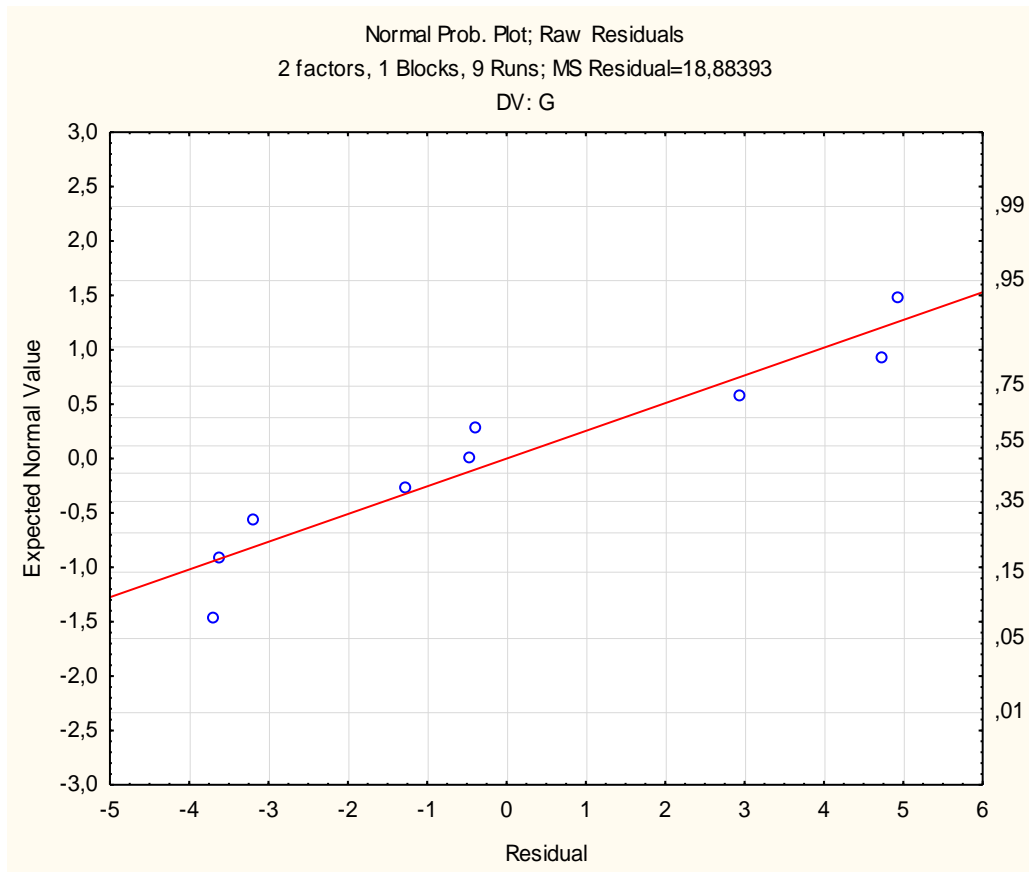
Na Tabela 15, fornece-se a utilização da ANOVA para o modelo contendo os termos que restaram após a análise de efeitos conduzida. Em sendo a totalidade de ensaios

contabilizada em 9, o total de graus de liberdade para o sistema se iguala a 8. Havendo 3 parâmetros compondo a regressão ajustada, atribuem-se 5 graus de liberdade para os resíduos da modelagem em proposição, os quais se limitam ao lapso de ajustamento, visto que não estão englobadas medidas de reprodutibilidade em compatibilidade ao fato de ter-se desempenhado um estudo de simulação computacional. Os dados então coletados subsidiam o teste de hipótese cuja hipótese nula se trata da representação da distribuição das observações pela sua média (ou anulação de todas os parâmetros à exceção do fator constante), rejeitando-a porque o valor p determinado em  $2.10^{-5}$  aproximadamente é inferior ao nível de significância definido. Portanto, conclui-se pela validade estatística do modelo obtido.

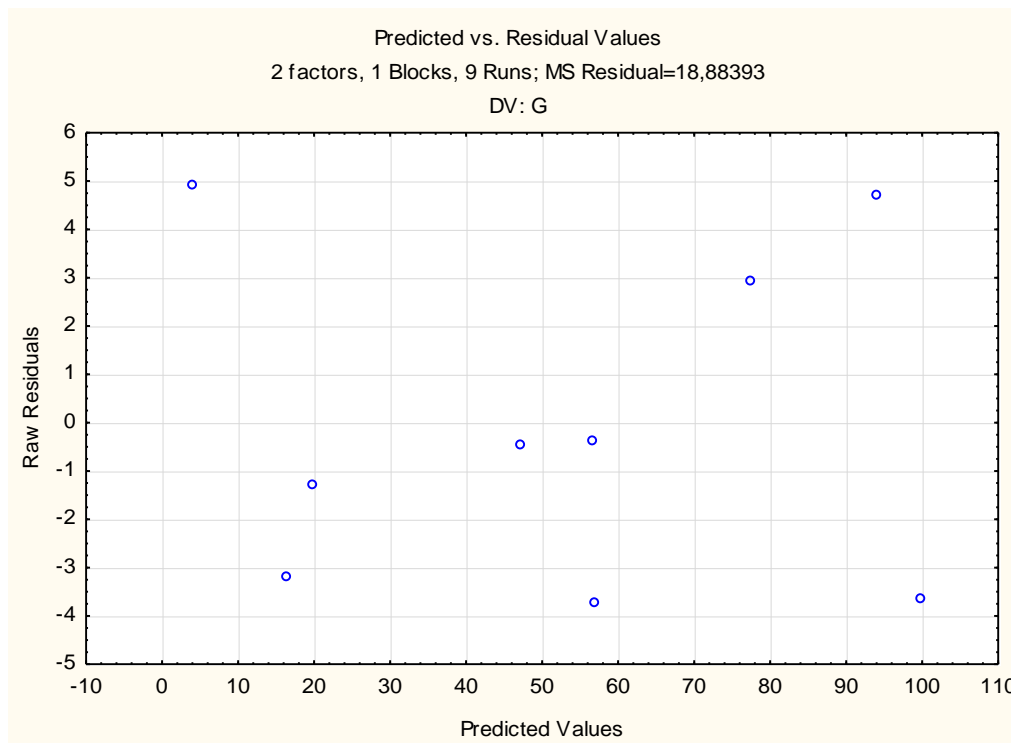
Tabela 15 - ANOVA do modelo para G.

ANOVA	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	Valor p
Regressão	9354,372592	3	3118,124197	165,1204855	2,02623E-05
Resíduo	94,420	5	18,88393308	-	-
falta de ajuste	94,420	5	18,88393308	-	-
SQ total	9448,792	8	-	-	-

Na Figura 30 (a), a proximidade dos pontos à reta de probabilidade normal indica o caráter de normalidade dos erros associados ao modelo de predição gerado. Já na figura 30 (b), observa-se uma distribuição dos resíduos plotados em função dos valores preditos pela proposta de regressão com aspecto aleatório, não apontando tendência alguma. Frente à aferição da normalidade e aleatoriedade dos resíduos da regressão construída, completa-se a avaliação da confiabilidade de ordem estatística. Os coeficientes do modelo final estão sumarizados na Tabela 16 a seguir, e os efeitos dos termos aos quais correspondem junto à significância dada por seus p-valores, na Figura 31 contendo o diagrama de Pareto.



(a)



(b)

Figura 30 - Indicativos de confiabilidade. (a) Teste de normalidade. (b) Resíduos contra valores preditos.

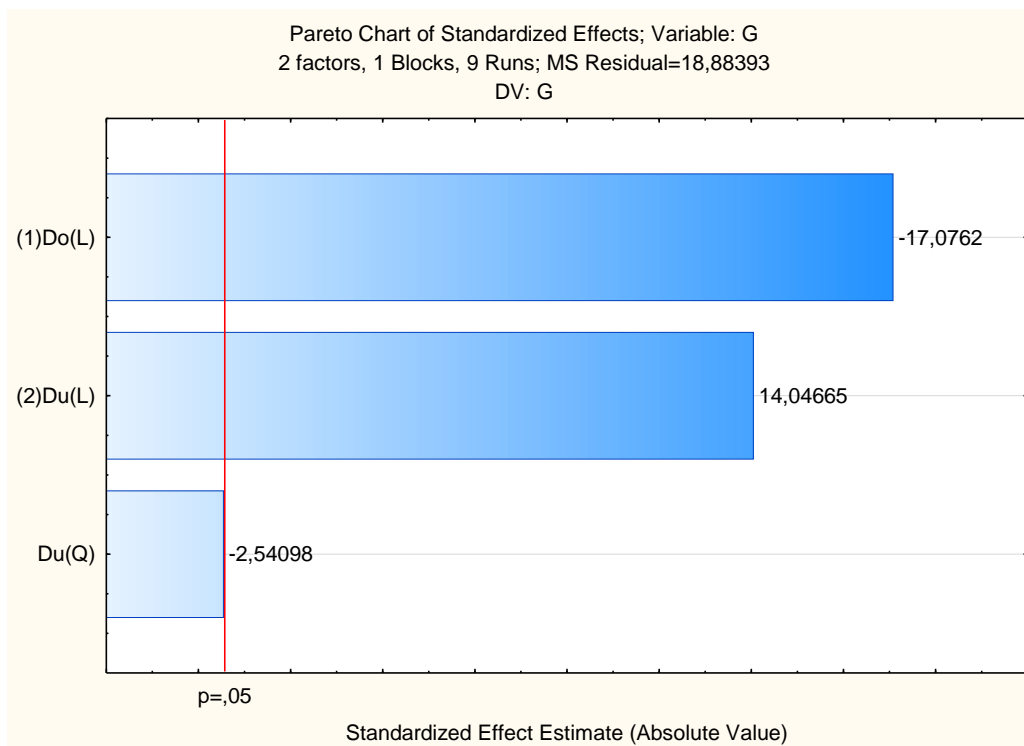
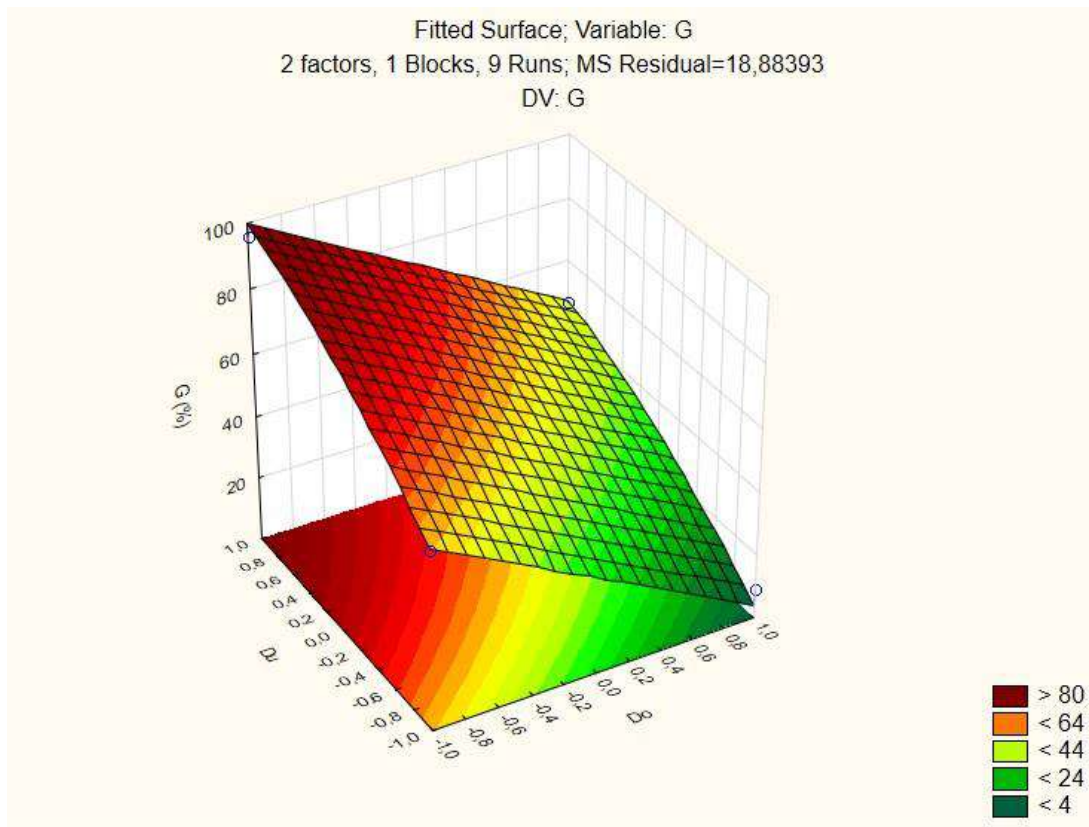


Figura 31 - Diagrama de Pareto para eficiência granulométrica.

Tabela 16 - Coeficientes do modelo de regressão para G.

Fator	Coefficiente
Média	56,87
D <sub>o</sub> linear	-26,28
D <sub>u</sub> linear	21,61
D <sub>o</sub> quadrático	-5,02

A partir dos coeficientes encontrados para os termos que constituem a regressão produzida, verifica-se que, qualitativamente, variações em D<sub>o</sub> e em D<sub>u</sub> impactam positiva e negativamente a eficiência granulométrica G para os intervalos considerados no projeto, respectivamente. A ocorrência de um valor negativo para o coeficiente atrelado ao único termo quadrático do modelo indica uma superfície que dispõe de uma região de máximo. Estas ponderações podem ser visualizadas na superfície de resposta traçada na Figura 32 colocada abaixo.



Resultam as seguintes equações dos modelos de regressão para as variáveis codificadas e reais:

$$G = 56,87 - 5,02D_o^2 - 26,28D_o + 21,61D_u \quad (4.1)$$

$$G = 45,28 - 7,844D_o^2 - 9,319D_o + 43,22D_u \quad (4.2)$$

#### IV.2.2 – Razão de Fluido

O emprego da análise de efeitos para averiguação acerca da manutenção dos fatores no modelo de regressão para a resposta razão de fluido (Figura 33) seguiu uma trajetória distinta daquela apresentada para G. Neste caso, a formulação abarcando a totalidade dos parâmetros para um DCCR possui os coeficientes de explicação e de ajuste especificados em 99,1% e 97,6%, respectivamente, e contém 3 fatores dispendo de valores de p superiores ao nível de significância da análise  $\alpha = 5\%$ . O termo quadrático relativo ao diâmetro de *overflow* e a interação linear entre as variáveis independentes em questão podem ser enquadrados na categoria de marginalmente significativos ao passo

que o termo quadrático associado ao diâmetro de *underflow* se apresenta não significativo, contando com um valor p calculado em 97% aproximadamente. Neste sentido, negligenciando o último parâmetro da análise, acarreta-se a transformação dos dois primeiros termos supracitados em significativos, não incorrendo no ônus de contração do percentual de explicação vinculado à regressão, ou, em havendo, se o faz em extensão desprezível, pois R<sup>2</sup> permanece com seu valor inicial, e ainda aprimorando o grau de ajuste, elevando R para 98,199%.

Effect Estimates; Var.:Rf, R-sqr=.991; Adj.:.976 (Spreadsheet14)										
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=28,83237										
DV: Rf										
Factor	Effect	Std.Err.	t(3)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
<b>Mean/Interc.</b>	<b>29,2827</b>	<b>5,369387</b>	<b>5,4536</b>	<b>0,012111</b>	<b>12,1949</b>	<b>46,3705</b>	<b>29,2827</b>	<b>5,369387</b>	<b>12,1949</b>	<b>46,3705</b>
(1)Do (L)	-55,8084	3,802525	-14,6767	0,000686	-67,9097	-43,7071	-27,9042	1,901263	-33,9549	-21,8535
Do (Q)	16,9543	6,318410	2,6833	0,074837	-3,1537	37,0623	8,4772	3,159205	-1,5768	18,5312
(2)Du (L)	37,0096	3,802525	9,7329	0,002304	24,9083	49,1110	18,5048	1,901263	12,4542	24,5555
Du (Q)	-0,2560	6,318410	-0,0405	0,970229	-20,3640	19,8520	-0,1280	3,159205	-10,1820	9,9260
1L by 2L	-15,1260	5,369578	-2,8170	0,066905	-32,2144	1,9624	-7,5630	2,684789	-16,1072	0,9812
Effect Estimates; Var.:Rf, R-sqr=.991; Adj.:.98199 (Spreadsheet14)										
2 factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=21,63611										
DV: Rf										
Factor	Effect	Std.Err.	t(4)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
<b>Mean/Interc.</b>	<b>29,0973</b>	<b>2,432660</b>	<b>11,9611</b>	<b>0,000280</b>	<b>22,3431</b>	<b>35,8514</b>	<b>29,0973</b>	<b>2,432660</b>	<b>22,3431</b>	<b>35,8514</b>
(1)Do (L)	-55,8084	3,293984	-16,9425	0,000071	-64,9540	-46,6628	-27,9042	1,646992	-32,4770	-23,3314
Do (Q)	17,1168	4,230255	4,0463	0,015523	5,3717	28,8618	8,5584	2,115127	2,6858	14,4309
(2)Du (L)	37,0096	3,293984	11,2355	0,000357	27,8641	46,1552	18,5048	1,646992	13,9320	23,0776
1L by 2L	-15,1260	4,651463	-3,2519	0,031320	-28,0405	-2,2114	-7,5630	2,325731	-14,0202	-1,1057

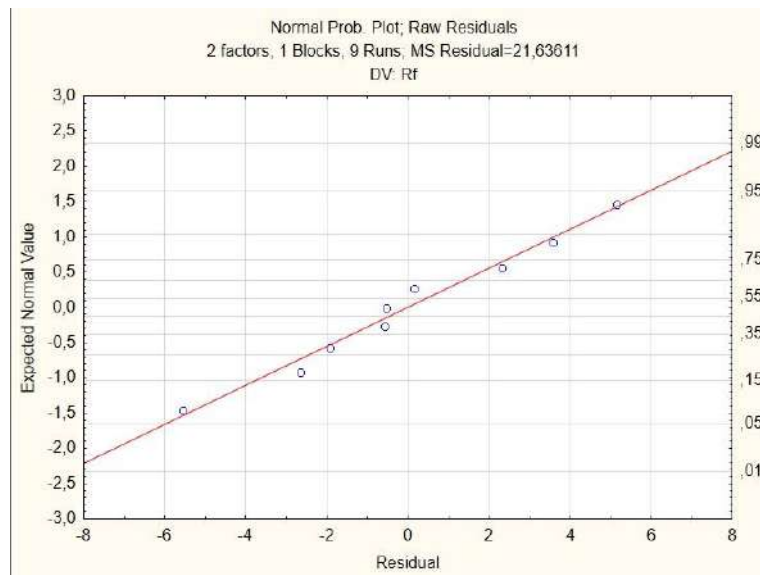
Figura 33 - Análise de efeitos para razão de fluido.

Tal qual se sucedeu para o modelo de eficiência granulométrica anteriormente, obteve-se, para a regressão elaborada para a razão de fluido, como resultado da aplicação da ANOVA (Tabela 17), um p-valor inferior ao nível de significância adotado, o que leva à rejeição da hipótese nula de descrição da distribuição de observações pela sua média, concluindo-se, assim, pela validade estatística da proposta de modelagem.

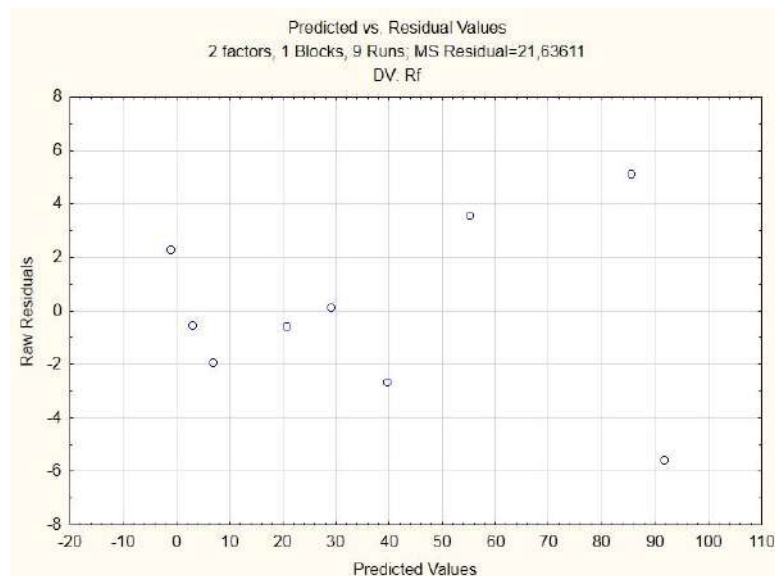
Tabela 17 - ANOVA para o modelo de R<sub>f</sub>.

ANOVA	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	p-valor
Regressão	9524,92619	4	2381,23155	110,058231	0,00024177
Resíduo	86,544	4	21,636106	-	-
falta de ajuste	86,544	4	21,636106	-	-
SQ total	9611,471	8	-	-	-

Assim como observado para o caso do modelo formulado para eficiência granulométrica, têm-se, para a proposta de regressão para a resposta  $R_f$ , um arranjo de pontos descrito em larga extensão pela reta de probabilidade normal e os resíduos distribuídos segundo um padrão aleatório como observado na Figura 34. Atestam-se, desta forma, os caracteres de normalidade e aleatoriedade das grandezas envolvidas, o que confere confiabilidade à proposição estatística em questão. Seguem as sumarizações dos coeficientes do modelo obtido na Tabela 18 abaixo e dos efeitos associados aos fatores que o constituem dispostos em conjunto aos respectivos valores de  $p$  no diagrama de Pareto apresentado na Figura 35.



(a)



(b)

Figura 34 – Indicativos de confiabilidade. (a) Teste de normalidade. (b) Resíduos contra valores preditos.



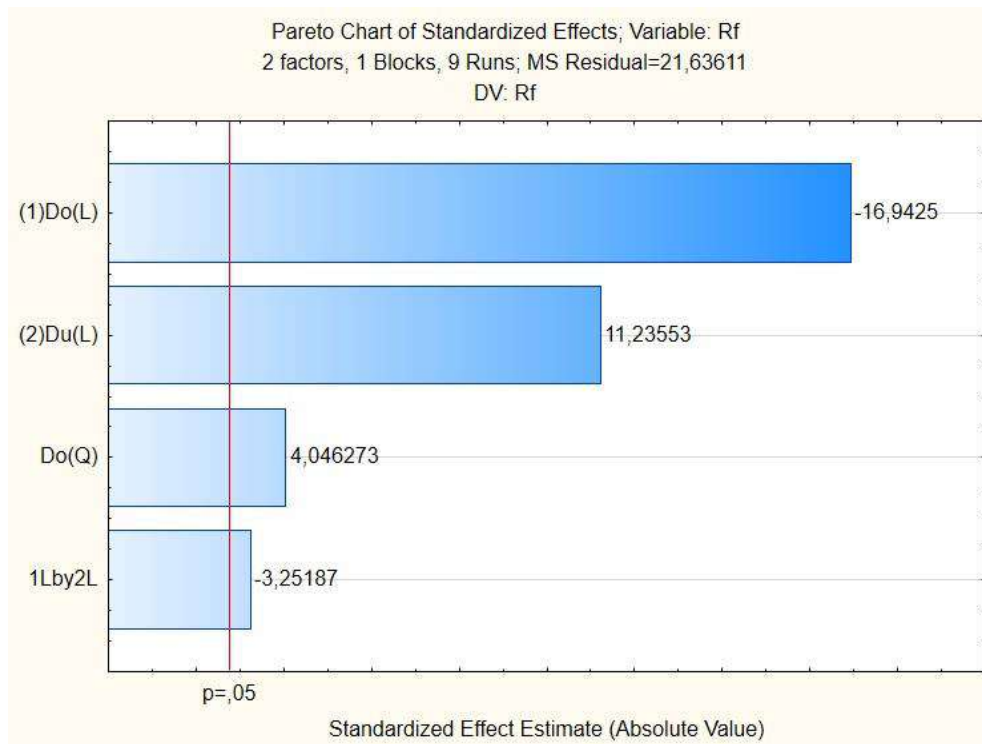


Figura 35 - Diagrama de Pareto para  $R_f$ .

Com base nos valores determinados para os coeficientes da regressão formulada para razão de fluido (Tabela 18), constata-se que, para a região de investigação delimitada pelos intervalos fixados para os diâmetros de *overflow* e *underflow*, como plausivelmente se espera, os fatores  $D_o$  e  $D_u$  exercem influências de naturezas negativa e positiva, respectivamente, sobre a resposta em consideração, ou seja, alargando-se a saída de topo e restringindo-se a abertura do orifício *underflow*, obtém-se menores valores de  $R_f$ . Particularmente, observa-se um maior impacto decorrente das variações em  $D_o$ , dada a maior magnitude possuída por seu coeficiente linear. Ainda, em sendo negativo o coeficiente atribuído à interação linear entre os fatores, segue que variações concomitantemente aplicadas aos dois diâmetros afetam a resposta no sentido de sua diminuição. Por fim, identifica-se que, em razão de o coeficiente do único termo quadrático, que se atrela a  $D_o$ , ser positivo, há uma zona de mínimo compreendida no interior da região submetida à análise pelo planejamento. Graficamente, visualizam-se tais assertivas através da Figura 36 que apresenta a superfície de resposta traçada para a razão de fluido.

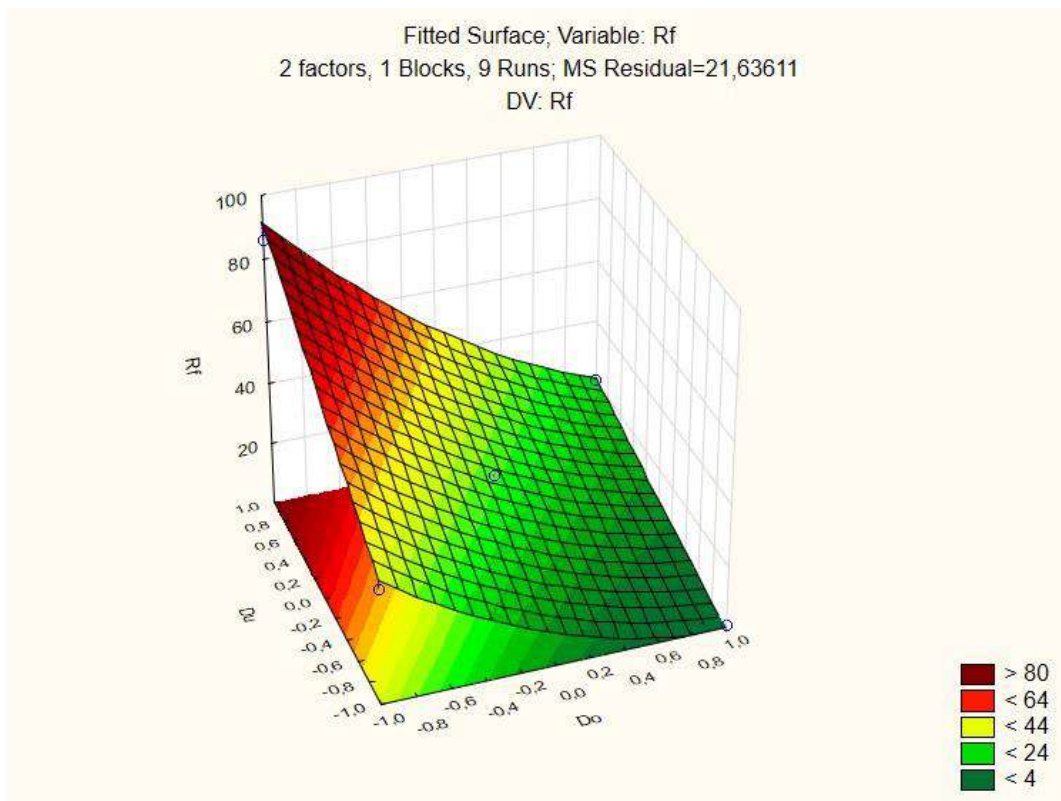


Figura 36 - Superfície de resposta para razão de fluido.

Tabela 18 - Coeficientes do modelo de regressão para  $R_f$ .

Fator	Coeficiente
Média	29,10
$D_o$ linear	-27,90
$D_o$ quadrático	8,558
$D_u$ linear	18,50
$D_o \cdot D_u$	-7,563

Resultam as seguintes equações dos modelos de regressão para as variáveis codificadas e reais:

$$R_f = 29,10 + 8,558D_o^2 - 27,90D_o + 18,50D_u - 7,563D_oD_u \quad (4.1)$$

$$R_f = 46,15 + 13,37D_o^2 - 56,08D_o + 65,35D_u - 18,91D_oD_u \quad (4.2)$$

#### IV.2.3 – Otimização Simultânea

Em havendo duas respostas sujeitas à otimização em concomitância, em que se almeja maximizar a eficiência de separação e minimizar a razão de fluido de maneira a se conseguir a segregação das fases aquosa e oleosa na maior extensão possível, empregou-se a metodologia disponível para tal desígnio no software que se utilizou para o processamento dos dados coletados no planejamento. Esta abordagem consiste no uso da função *desirability*. Sua mecânica de funcionamento envolve a atribuição de índices de “desejabilidade” a níveis mínimo, intermediário e máximo para cada uma das variáveis de resposta consideradas, que variam entre 0 e 1. Mediante tal definição, procede-se com a construção de perfis para as variáveis dependentes representativos da varredura dos fatores entre seus limites inferior e superior, buscando-se seus níveis ótimos, identificados como aqueles nos quais a avaliação das respostas mais se aproxime dos valores alvo, especificados com as maiores “desejabilidades”. O desempenho do processo de otimização é avaliado por um indicador global de “desejabilidade”, que, quanto menor sua discrepância em relação à unidade, mais próximas de seus alvos de forma simultânea as respostas se encontram. Vale notar que modelos completos devem ser utilizados para aplicação desta metodologia.

Nas Tabelas 19 e 20 abaixo, relacionam-se os limites para as respostas G e R<sub>f</sub> aos valores de índices de “desejabilidade” associados:

Tabela 19 - Índices de "desejabilidade" para eficiência granulométrica.

G	Nível mínimo (%)	Nível	
		intermediário (%)	Nível máximo (%)
Especificação	8,91	53,78	98,66
“Desejabilidade”	0,00	0,00	1,00

Tabela 20 - Índices de desejabilidade para razão de fluido.

R <sub>f</sub>	Nível mínimo (%)	Nível	
		intermediário (%)	Nível máximo (%)
Especificação	1,13	45,86	90,60
“Desejabilidade”	1,00	0,00	0,00

Em consonância à avaliação dos modelos de regressão completos para as respostas em questão, atribuíram-se fatores de “desejabilidade” iguais à unidade para os valores máximo e mínimo para  $G$  e  $R_f$  em seus tratamentos individuais e nulos para os demais níveis a serem especificados no emprego da metodologia pelo Statistica®. Tomando-se 100 pontos de cálculo nas varreduras e mantendo-se os outros parâmetros em suas configurações padrão, produziu-se o resultado do procedimento em consideração, expresso na Figura 37.

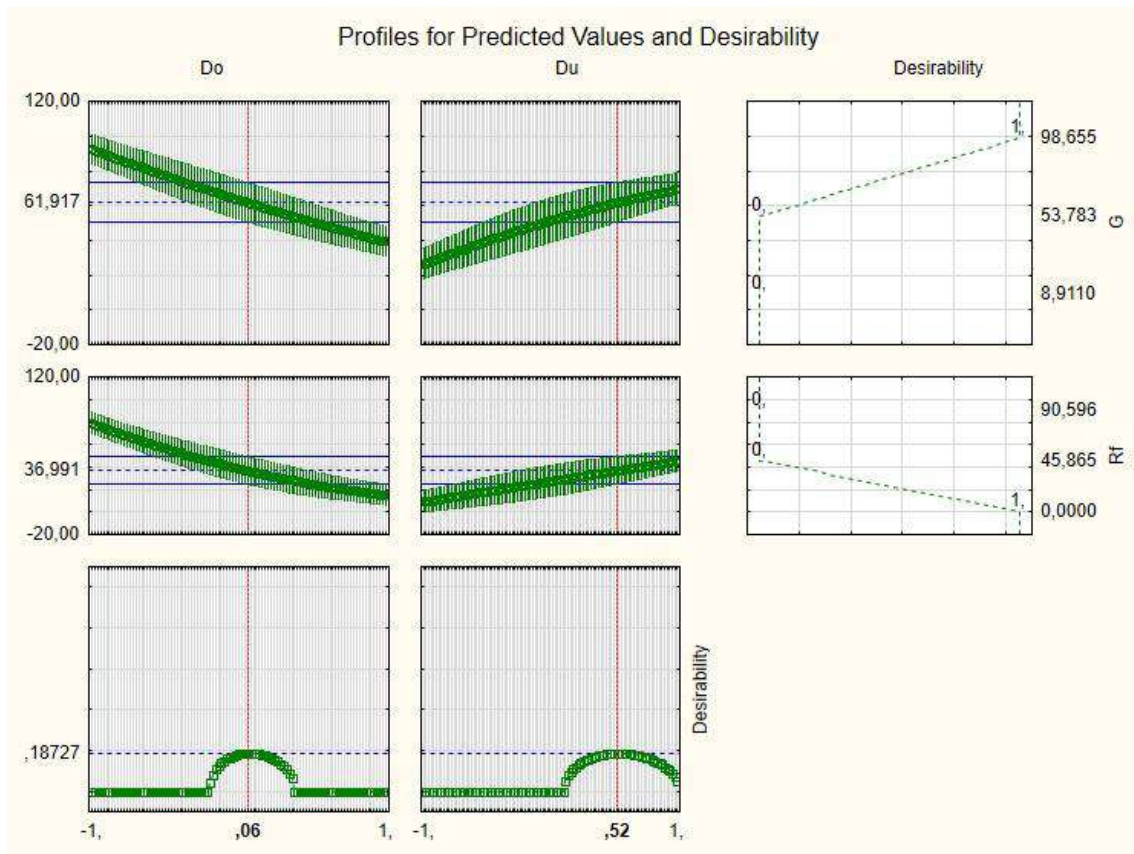


Figura 37 - Aplicação da função *desirability*.

É válido destacar que o procedimento de otimização acarretou um índice de “desejabilidade” global relativamente pequeno, de cerca de 19%, o que se traduz em um alcance limitado dos valores para as variáveis dependentes do planejamento determinadas como alvo. Tal quadro, no entanto, não invalida a metodologia aplicada no sentido de não se ter atingido valores ótimos para as variáveis de decisão,  $D_o$  e  $D_u$ , mas sim evidencia o intenso acoplamento apresentado pela eficiência de separação e razão de fluido, processando-se comportamentos antagônicos a variações impostas aos fatores. Para a

região de análise fixada, então, obtêm-se os níveis ótimos para as variáveis independentes tomadas dispostos na Tabela 21 a seguir nas formas codificada e real:

Tabela 21 - Níveis ótimos.

Fator	Nível codificado	Nível real (cm)
$D_o$	0,06	1,55
$D_u$	0,52	1,26

Na Figura 38 que segue, estão ilustrados o modelo geométrico e a malha computacional elaborados para o hidrociclone otimizado, com as quais sucederam-se as demais simulações do projeto, referentes à determinação da performance separativa do equipamento.

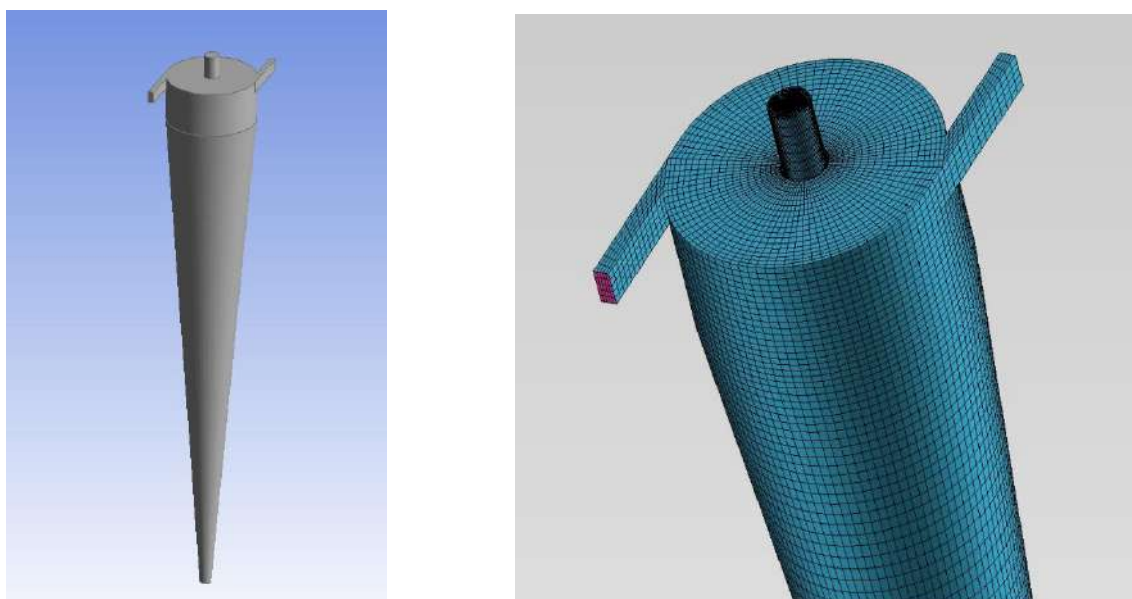


Figura 38 - Geometria e malha do hidrociclone otimizado.

### IV.3 – Performance do Hidrociclone Ótimo

A fim de se avaliar a performance do equipamento com design então otimizado para o conjunto de condições estabelecido, necessita-se construir a curva de eficiência granulométrica, representativa da característica intrínseca referente à capacidade separativa do dispositivo em desenvolvimento, independentemente da dispersão a ser processada. As 12 simulações executadas após o procedimento de otimização se

encontram em consonância com tal propósito. A Tabela 22 a seguir reúne os resultados obtidos, relacionando os diferentes diâmetros de gota tomados com os valores correspondentes de eficiência de separação, razão de fluido e eficiência reduzida.

Tabela 22 - Distribuição de eficiência de granulométrica para o hidrociclone otimizado.

Diâmetro de gota ( $\mu m$ )	G (%)	R <sub>f</sub> (%)	G' (%)
10	42,72	41,82	1,53
20	45,03	41,42	6,16
30	49,03	40,76	13,96
40	54,91	39,90	24,98
50	62,98	39,09	39,23
60	72,01	38,33	54,62
70	81,09	37,56	69,71
80	87,90	36,44	80,96
90	94,43	35,83	91,32
100	97,69	35,35	96,43
110	98,80	35,28	98,15
120	99,24	35,30	98,83

Plotando-se os dados levantados com as referidas simulações de eficiência de separação por tamanho reduzida (G') em função do diâmetro de gota da fase dispersa, é gerada a curva de eficiência granulométrica fornecida na Figura 39. Em posse de tal gráfico, mensura-se o fundamental parâmetro de desempenho do hidrociclone projetado diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ).

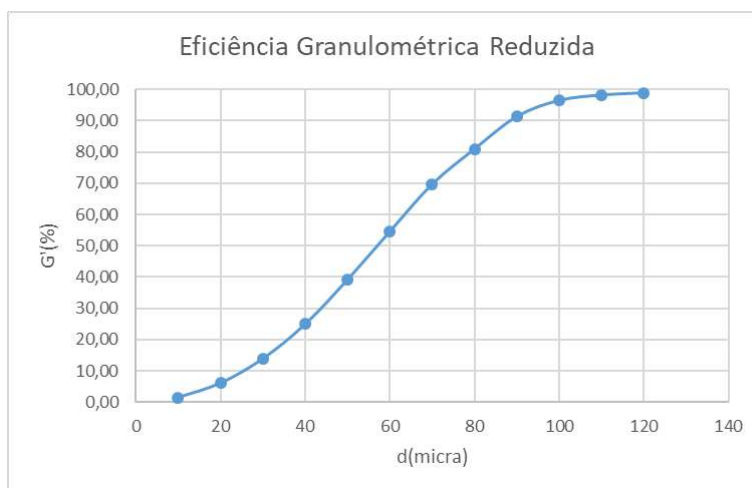


Figura 39 - Curva de eficiência granulométrica reduzida.

A partir do gráfico traçado, obteve-se o diâmetro  $d'_{50}$  se igualando a  $57 \mu\text{m}$ . Desta determinação, procedeu-se com a utilização da correlação de Plitt (equação 2.15), por meio da qual se exprime a eficiência reduzida como uma função do diâmetro de gota adimensionalizado em relação a  $d'_{50}$ . Para tanto, inicialmente, encontrou-se a forma linearizada da equação 2.15, dada por:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-G'}\right)\right) = \ln[0,693] + n \ln\left(\frac{d}{d'_{50}}\right) \quad (4.3)$$

Valendo-se dos dados da curva de eficiência granulométrica gerada, realiza-se a regressão linear com fins de especificação do coeficiente linear,  $n$ , da equação 4.1 acima. Para tal, o gráfico contido na Figura 40 foi traçado:

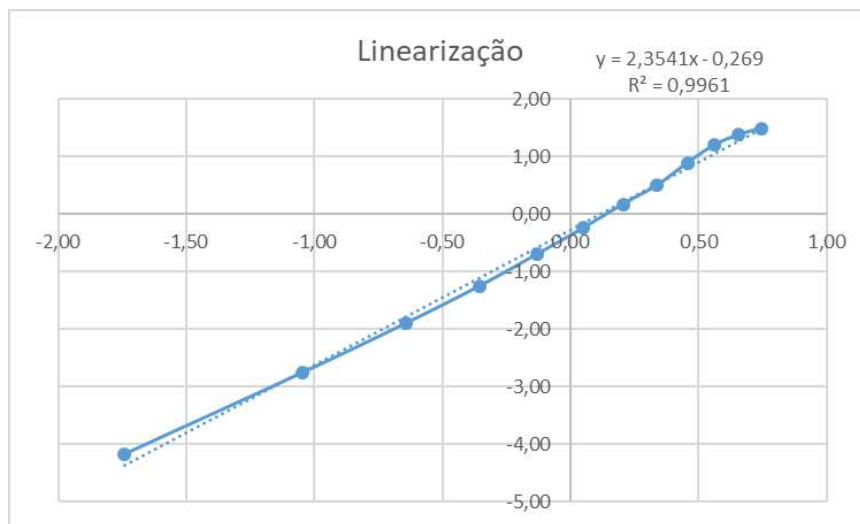


Figura 40 - Regressão linear para obtenção do parâmetro  $n$ .

Portanto, tem-se  $n$  avaliado em 2,35 segundo a regressão com coeficiente de determinação de 99,61%. Definido um modelo para  $G'\left(\frac{d}{d'_{50}}\right)$ , viabiliza-se a previsão de performance do hidrociclone considerado para quaisquer distribuições de tamanhos de gota submetidas ao tratamento, bastando que, em domínio de uma expressão em termos do diâmetro de gota para o percentual cumulativo de partículas de tamanhos inferiores,  $y$ , se efetue a integração apresentada na equação 2.16, o que fornece a estimativa para a eficiência total reduzida ( $E'_T$ ). Objetivando-se elucidar o desempenho exibido pelo hidrociclone que se projetou para um amplo espectro distribuições granulométricas para as dispersões de água em óleo representadas pelo modelo RRB, procedeu-se com

aplicações da metodologia de determinação de  $E'_T$  sequenciais para varreduras promovidas nos parâmetros  $k$  e  $m$  da correlação de Rosin-Rammeler, gerando-se as curvas  $E'_T \times k$  apresentadas na Figura 41 a seguir:

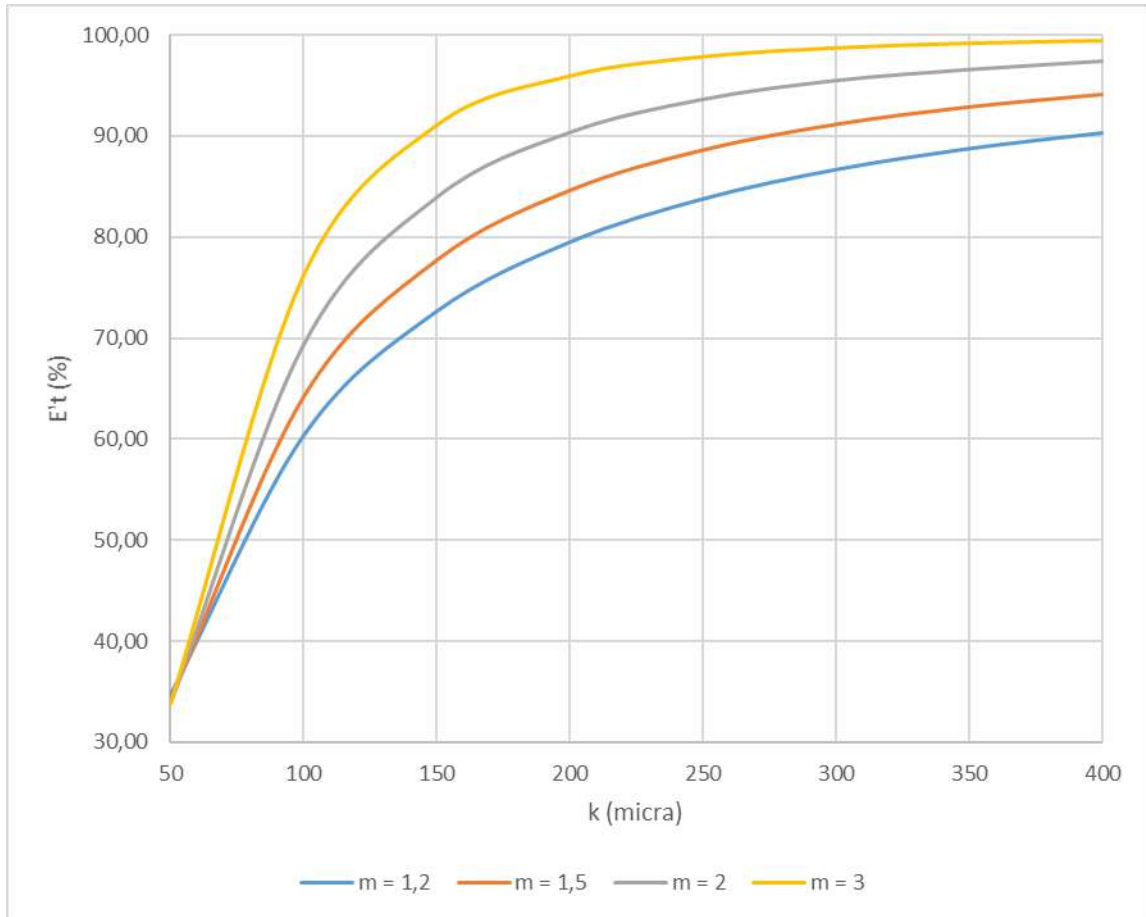


Figura 41 - Distribuição de eficiência total reduzida em função da distribuição granulométrica da alimentação.

Para o cálculo de cada valor de  $E'_T$ , uma vez definida a distribuição de tamanhos da corrente de admissão com especificações para  $k$  e  $m$ , deve-se, de início, exprimir o diâmetro de gota em função da distribuição cumulativa a partir da equação do modelo RRB (2.3) pelo isolamento de  $d$  e, subsequentemente, substituir a expressão resultante  $d(y)$  naquela dada pela correlação de Plitt para  $G'$ , prosseguindo-se com a integração propriamente dita. Representam-se tais passos como se segue:

$$d = k \left[ \ln \left( \frac{1}{1-y} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.4)$$



$$E'_T = \int_0^1 \left\{ 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{1}{d'_{50}} k \left[ \ln \left( \frac{1}{1-y} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \right)^n \right] \right\} dy \quad (4.5)$$

#### IV.4 – Análise da Convergência

As simulações executadas no delineamento experimental e na avaliação da performance do dispositivo projetado se pautaram no critério de convergência que se definiu como o fechamento dos balanços de massa macroscópicos das fases oleosa e aquosa. Os resíduos das equações de conservação numericamente solucionadas se mantiveram em níveis relativamente baixos ( $5e^{-05}$  para continuidade, fração volumétrica e quantidade de movimento e  $1e^{-03}$  para tensores de Reynolds e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta), porém não necessariamente indicando plena convergência da metodologia. Com o intento de se aferir a magnitude do impacto da redução dos resíduos sobre os resultados das simulações, realizou-se uma simulação com o modelo geométrico otimizado para diâmetro de gota de  $50 \mu m$  intensificando o grau de sub-relaxação pela especificação do parâmetro *pseudo transient factor* com uma ordem de grandeza a menos, isto é, em 0,1, o que implica na multiplicação da escala de tempo considerada pelo programa por  $10^{-1}$ .

Sendo necessárias 50.000 iterações e 1 semana de simulação, obtiveram-se os perfis de velocidade tangencial nas três linhas tomadas e apresentados nas figuras 42, 43 e 44 que seguem com os resíduos para todas as equações inferiores a  $5e^{-07}$ .

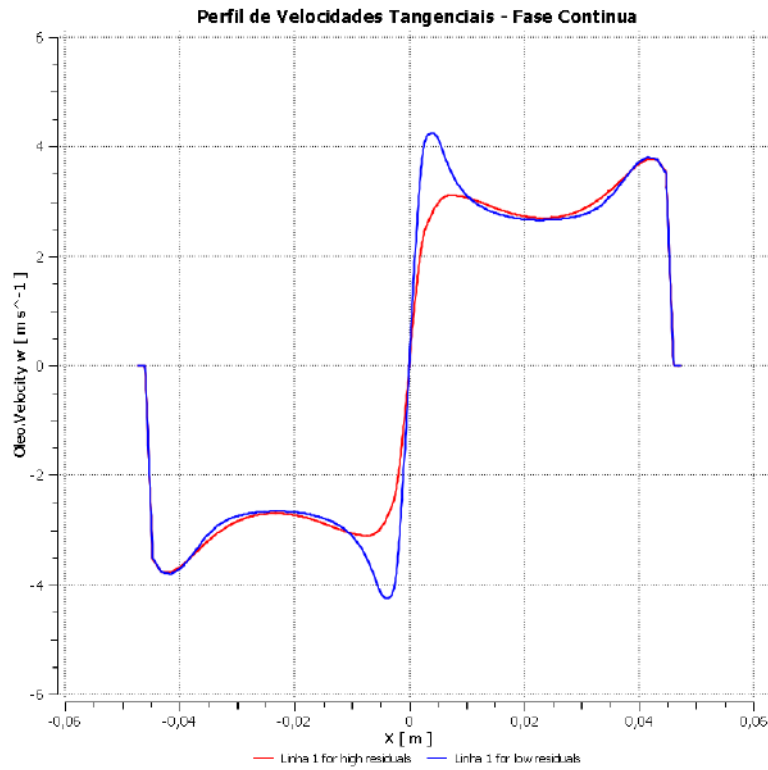


Figura 42 - Perfis de velocidade tangencial para as simulações com altos e baixos resíduos na linha 1.

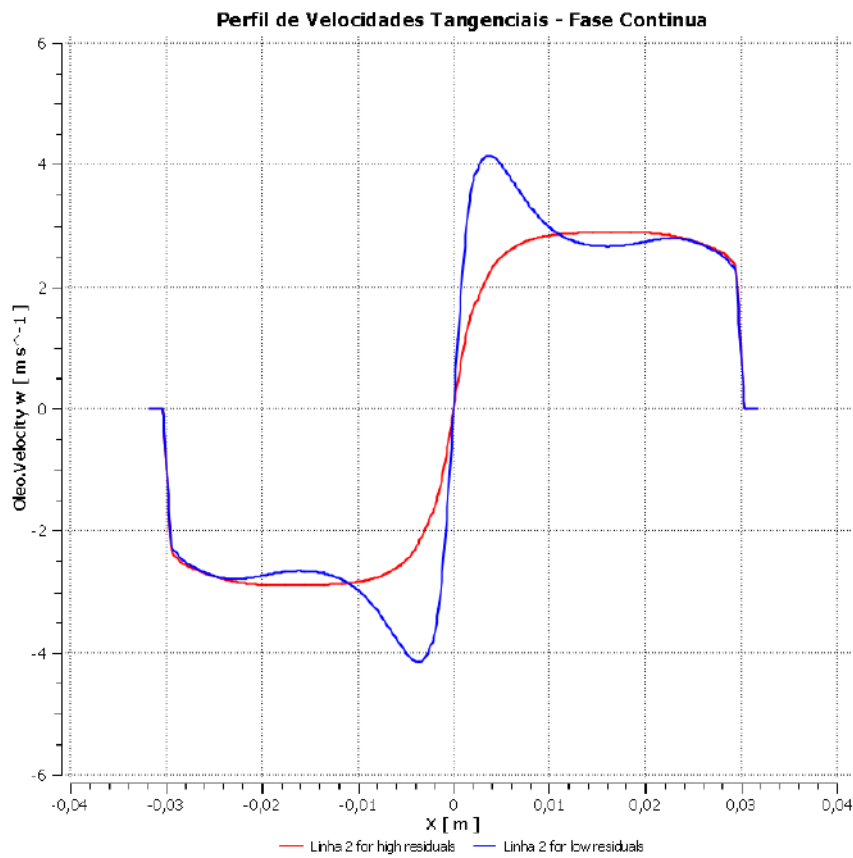


Figura 43 - Perfis de velocidade tangencial para as simulações com altos e baixos resíduos na linha 2.

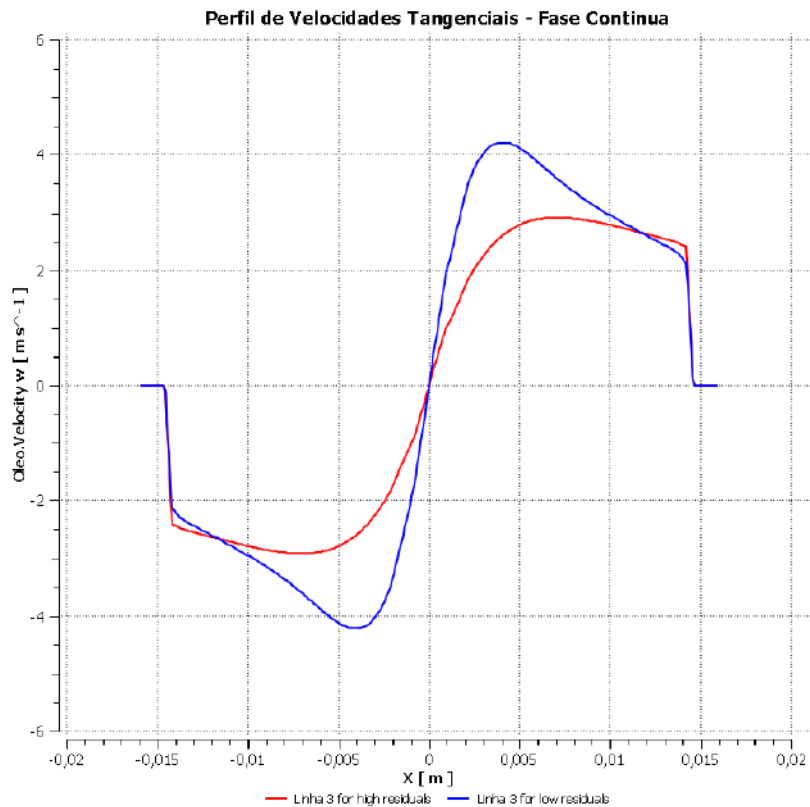


Figura 44 - Perfis de velocidade tangencial para as simulações com altos e baixos resíduos na linha 3.

A partir dos resultados acima dispostos, constata-se uma expressiva discrepância entre as predições de perfis para a componente tangencial da velocidade da fase contínua fornecidas pelas simulações com níveis de resíduos mais alto ( $1e^{-03}$ ) e mais baixo ( $5e^{-07}$ ). Infere-se, assim, pela ocorrência de um afastamento significativo do estado convergido no que se refere à caracterização fluidodinâmica do escoamento em análise. Ainda, tem-se uma subestimativa para a capacidade separativa do dispositivo com as simulações conduzidas com resíduos de  $5e^{-07}$ . No entanto, não se verificam desvios tão grosseiros em relação aos parâmetros de performance (Tabela 24), com distinções de aproximadamente 2% e 1% para eficiência granulométrica e razão de fluido, respectivamente. A opção por se seguir a via mais rigorosa que preconiza o alcance de resíduos mais diminutos, apesar de indispensável para uma determinação acurada dos campos de propriedades estabelecidos no equipamento, se apresentaria impraticável para a condução das mais de 20 simulações, incluindo teste de malha, planejamento de experimentos e análise de desempenho, em face à disponibilidade de tempo e de recursos computacionais para o desenvolvimento do projeto.

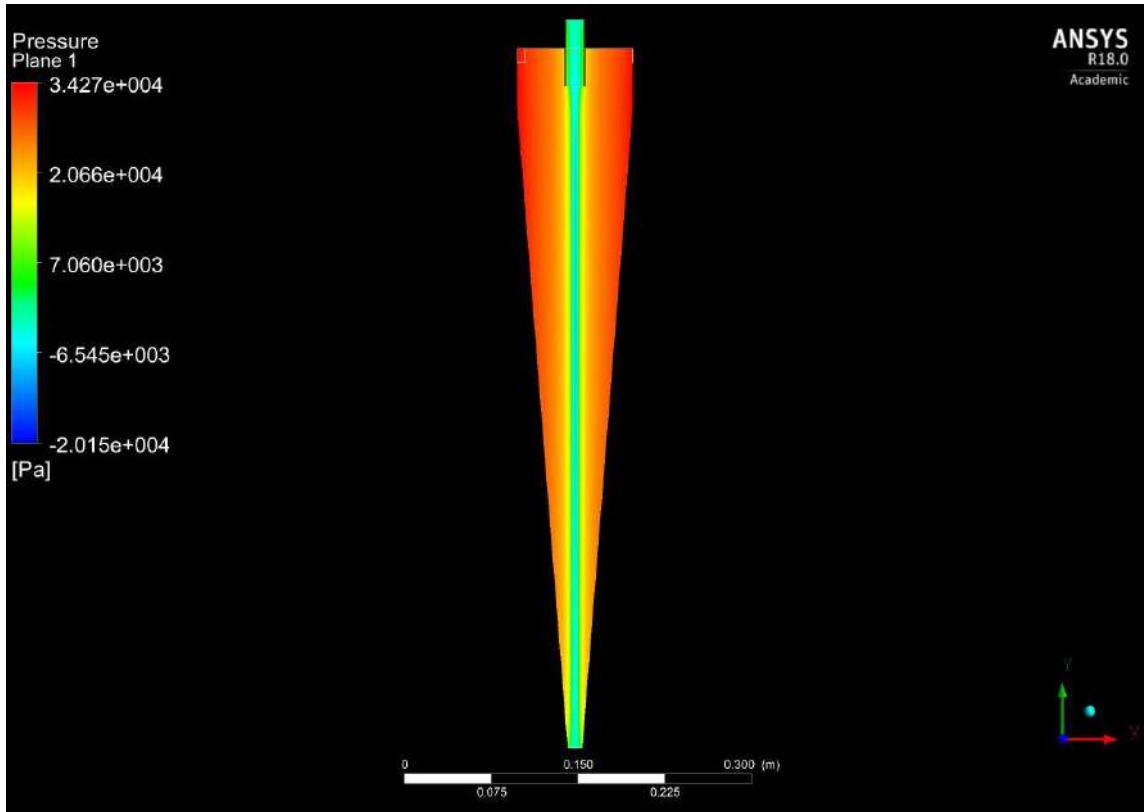
Tabela 23 - Valores de eficiência granulométrica e razão de fluido para as simulações comparadas.

Simulação	G (%)	R <sub>f</sub> (%)
Alto resíduo	62,98	39,09
Baixo resíduo	65,21	37,95

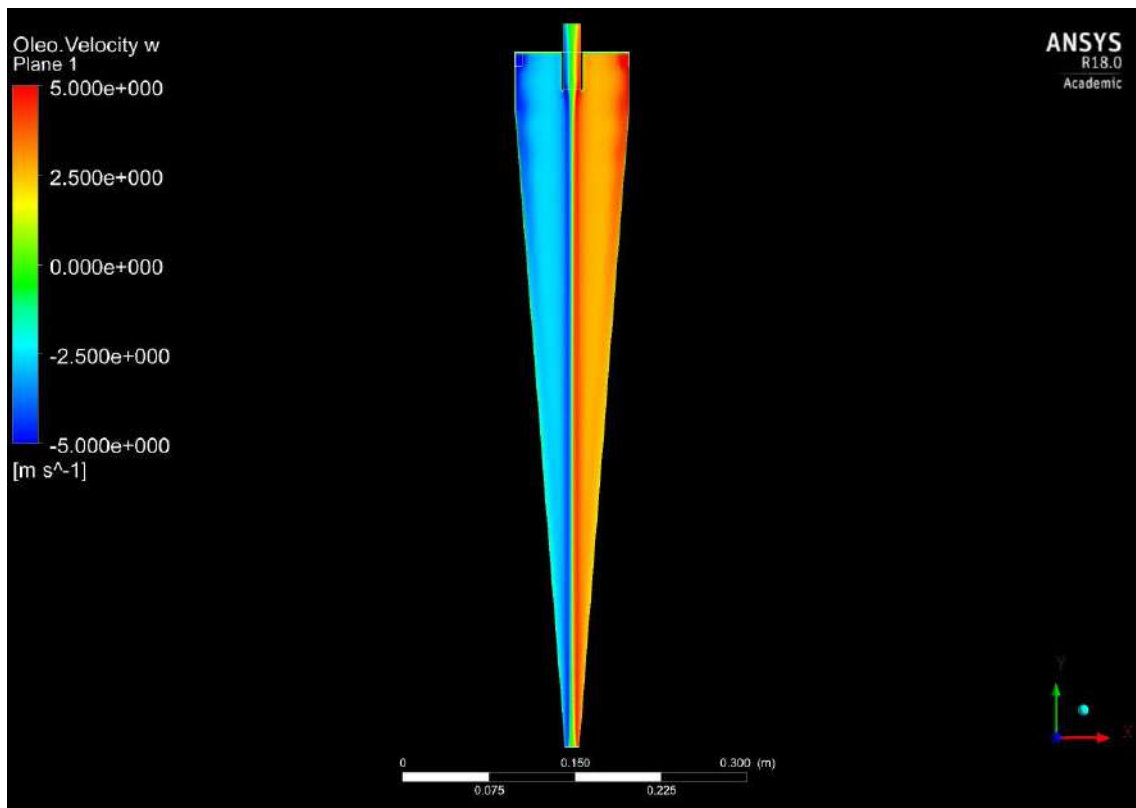
#### IV.5 – Avaliação Fluidodinâmica

Além do cumprimento do principal objetivo de desenvolvimento de um hidrociclone com geometria ótima para o conjunto de condições consideradas pela aplicação de planejamento de experimentos, tem-se a averiguação das características do escoamento estabelecido no interior do equipamento em análise constituindo uma tarefa de ampla relevância. Dentre a gama de aspectos associados ao comportamento fluidodinâmico que se processa no hidrociclone, destacaram-se, na etapa de pós-processamento por intermédio do programa CFD-Post®, os perfis de pressão, velocidade tangencial da fase contínua e fração volumétrica de disperso na seção transversal central do hidrociclone, bem como as linhas de corrente elucidando o trajeto e a forma do fluxo no equipamento. Os resultados são apresentados para o hidrociclone otimizado, porém são qualitativamente similares ao demais hidrociclones do planejamento experimental.

Distribuições factíveis da componente tangencial e do campo de pressão ocorrem nos hidrociclones simulados, como pode-se ver da Figura 45 para o modelo otimizado. Tal componente se amplia radialmente para dentro partindo da parede, alcançando um máximo nos arredores do eixo central e, então, decaindo vertiginosamente com a progressão da redução do raio. Já para a pressão, observa-se que seu aumento se dá no sentido contrário, isto é, radialmente para fora, em que até mesmo valores manométricos negativos ocorrem em certas porções da linha central.



(a)



(b)

Figura 45 - Perfis de velocidade tangencial (a) e de pressão (b) plotados no plano central do hidrociclone ótimo.

Na Figura 46, visualiza-se uma caracterização geral do escoamento que se desenvolve no hidrociclone projetado. Consegue-se identificar os vórtices principal e secundário, dispostos nos sentidos descendente em direção ao orifício de *underflow* e ascendente a caminho do tubo de *overflow*.

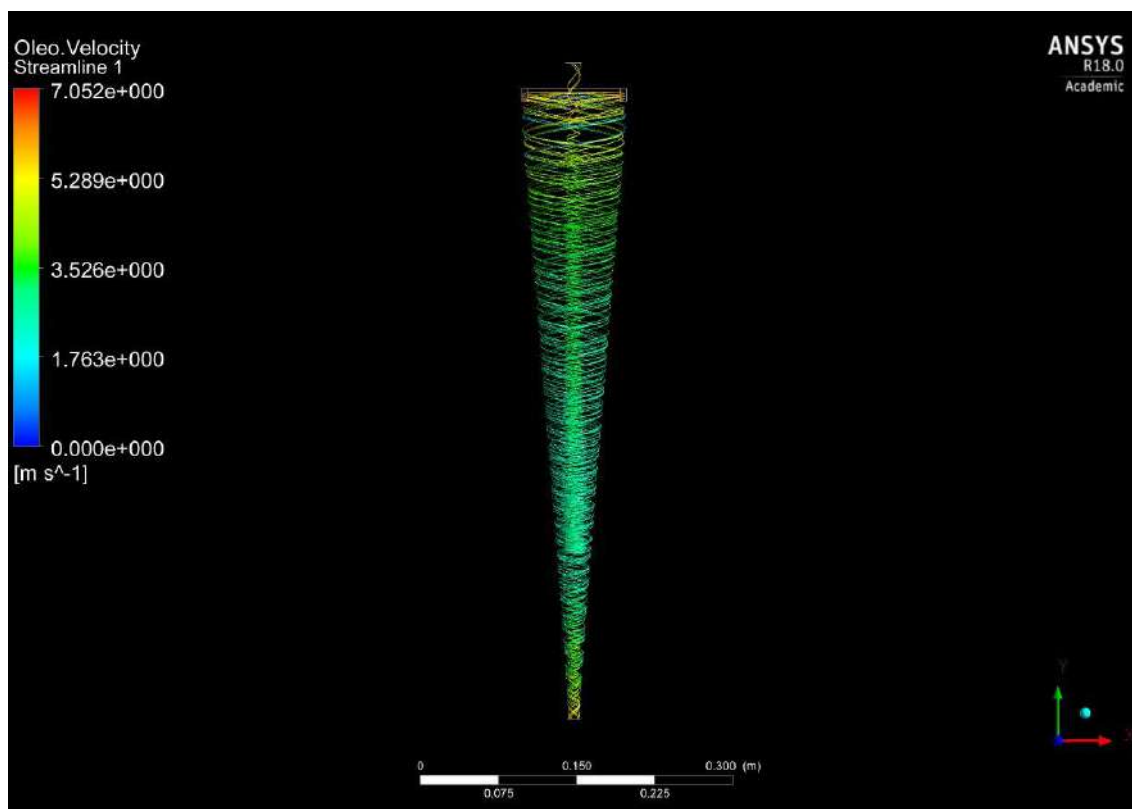
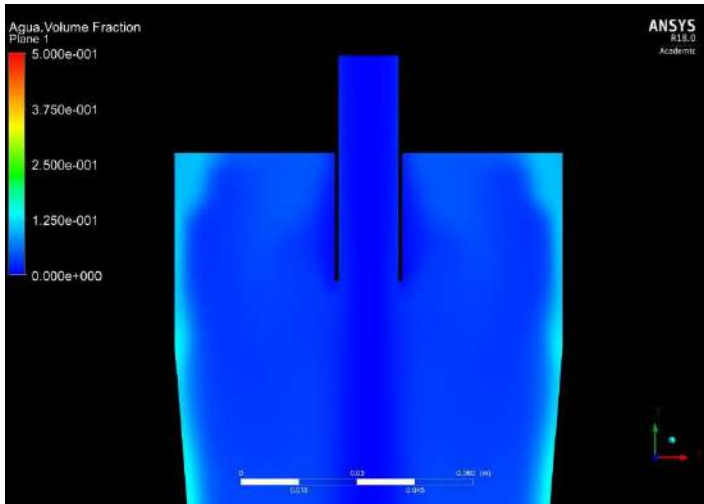
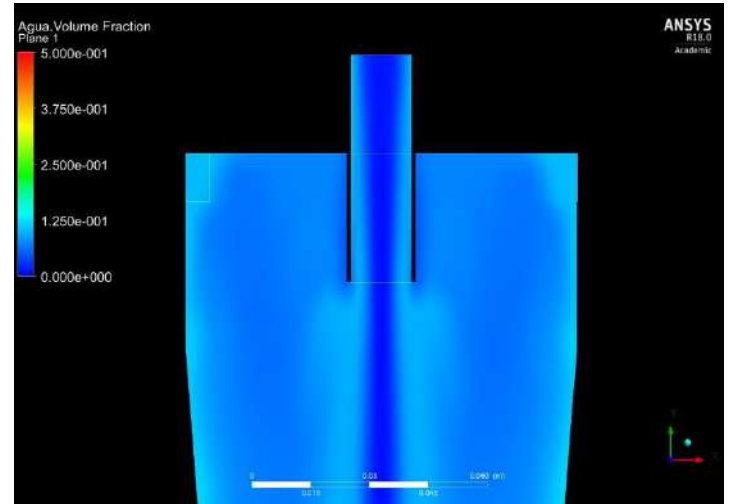


Figura 46 - Linhas de corrente relativas à fase primária (óleo) partindo das seções de entrada.

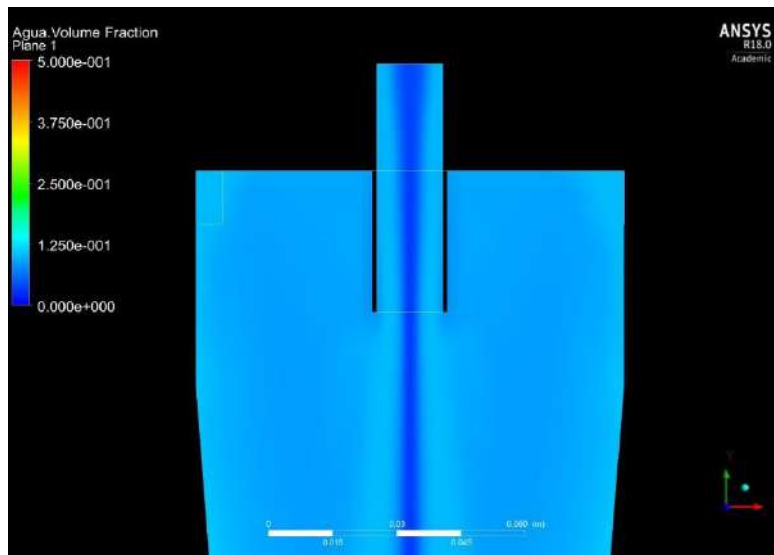
Um comportamento coerente se sucede em relação às simulações no que tange à ampliação no diâmetro de gota da fase dispersa (Figura 47). Nota-se que gotículas gradualmente maiores sendo consideradas nos ensaios implicam em frações volumétricas progressivamente menores nos arredores da saída de topo do equipamento. Reflete-se, desta maneira, ao menos do ponto de vista qualitativo, a expectativa pautada na lei de Stokes, pois, sobre partículas mais massivas, atuam forças de campo de maiores magnitudes, o que contribui para que se desvencilhem do fluxo que as arrastam majoritariamente no sentido da saída de topo. Vale notar que, diferentemente dos perfis já fornecidos, os espectros de fração volumétrica de água que seguem se referem às simulações da etapa de avaliação de performance com distintos tamanhos de gota realizadas com níveis de resíduos mais altos ( $1e^{-03}$ ), o que, no entanto, não descaracterizou os aspectos esperado para estas distribuições.



(a)



(b)



(c)

Figura 47 - Distribuições de fração volumétrica da fase dispersa na porção superior do hidrociclone para diâmetros de gota de: (a) 90 (b) 50 e (c) 30 micrômetros.

## Capítulo V – Conclusões

O conjunto de procedimentos empregados no desenvolvimento do projeto elaborado visou à consecução dos objetivos inicialmente definidos, que englobam a concepção de um hidrociclone para a separação de dispersões de água em óleo e a avaliação de seus aspectos fluidodinâmicos e de performance separativa. Em face aos resultados encontrados, ilustrou-se a aplicação de ferramentas de Fluidodinâmica Computacional como um poderoso recurso para a resolução das equações de conservação com vistas a se determinar campos de escoamento bastante complexos, levantando-se características micro e macroscópicas de interesse, tais quais perfis de propriedades e parâmetros de rendimento ou eficiência, respectivamente. Ainda, conseguiu-se, com sucesso, estudar o comportamento das variáveis relevantes do processo com o uso da metodologia do planejamento de experimentos, conduzindo a análises estatisticamente respaldadas.

Especificamente em relação às etapas desempenhadas no trabalho desenvolvido, cumpre ressaltar: a definição de uma malha hexaédrica com cerca de 560 mil pontos nodais por meio do teste de independência de malha realizado para condução das simulações necessárias; o emprego da técnica de delineamento composto central rotacional para geração da matriz de ensaios, contendo 9 corridas, visando à otimização do design do hidrociclone, que parte de um modelo baseado na família Bradley; tendo-se como fatores os diâmetros das saídas de *overflow* e *underflow* e como respostas a eficiência granulométrica e a razão de fluido, os valores que resultam da procedimento de otimização buscando maximizar  $G$  e minimizar  $R_f$  são dados por 1,55 cm para  $D_o$  e 1,26 cm para  $D_u$ ; a determinação do diâmetro de corte reduzido  $d'_{50}$  em 57 micrômetros para a geometria ótima pela construção da curva de eficiência de separação por tamanhos reduzida; e a avaliação da performance do equipamento projetado em termos da eficiência total de separação pelas curvas traçadas para uma gama de distribuições de tamanhos para a alimentação.

No que tange ao escoamento estabelecido no interior do dispositivo, tem-se a identificação de um perfil para a componente tangencial do campo de velocidades sendo tal que, partindo-se da parede, é alcançado um valor máximo nos arredores do eixo central, bem como se observam frações volumétricas da fase dispersa gradualmente menores nas proximidades da saída de topo, conforme se amplia o diâmetro de gota. Ainda, mostrou-se ser imperativo que as simulações sejam executadas de modo a se



atingir níveis suficientemente reduzidos de resíduos do procedimento numérico para captação apropriada das nuances dos campos de propriedades.

Os próximos estágios do presente projeto envolvem a construção de um modelo físico em acrílico referente à geometria otimizada para fins de validação empírica dos resultados, mediante a comparação de parâmetros de performance e perfis simulados e obtidos por testes laboratoriais. Pretende-se, também, averiguar o impacto relativo a aprimoramentos da modelagem da qual se lança mão, especialmente no que diz respeito à consideração dos fenômenos de quebra e coalescência das gotículas de água.

## Referências Bibliográficas

- ANJOS, R. P.; OLIVEIRA, R. S.; MEDRONHO, R. A. **Numerical Simulation of a Bradley Mini-Hydrocyclone**. 7th International Conference on Advances in Applied Science and Environmental Technology - ASET. Bangkok: IRED Headquarters. 2017. p. 20-23.
- ARAÚJO, C. A. O. D. **Hidrociclones para a Separação de Misturas de Alto Teor de Óleo Disperso em Água**. Tese de doutorado (Tese em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 119. 2015.
- BAI, Z.; WANG, H. Numerical Simulation of the Separating Performance of Hydrocyclones. **Chem. Eng. Technol**, p. 1161-1166, 2006.
- BELAIDI, A.; THEW, M. T.; MUNAWEERA, S. J. Hydrocyclone Performance with Complex Oil-Water Emulsions in the Feed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 81, p. 1159 -1170, Dezembro 2003.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery**. 2ª. ed. Nova Jérsei: John Wiley & Sons, 2005.
- BRAGA, E. R. **Desenvolvimento de um Hidrociclone para Separação do Óleo Presente em Águas Oleosas de Refinarias de Petróleo**. Tese de Doutorado (Tese em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 163. 2015.
- BRASIL, N. Í. D. *et al.* **Processamento de Petróleo e Gás: Petróleo e Seus Derivados, Processamento Primário, Processos de Refino, Petroquímica, Meio Ambiente**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 266 p.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. **Planejamento de Experimentos usando o Statística**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2003.
- FERZIGER, J. H.; PERIC', M. **Computarional Methods for Fluid Dynamics**. 3ª. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.
- HAMMES, J. M. *et al.* **Efeito do Avanço e Profundidade de Corte no Acabamento Superficial de um Torneamento Cilíndrico Externo**. XVIII Encontro Nacional de Modelagem Compitacional. Salvador: [s.n.]. 2015.
- HAUKE, G. **An Introduction to Fluid Mechanics and Transport Phenomena**. Netherlands: Springer, v. 86, 2008.
- KUNERT, R. *et al.* **Processamento Primário de Petróleo**. Universidade da Petrobrás. Rio de Janeiro, p. 53. 2007.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 453 p.

- MARJOHAN, R. B. A General Overview of Developments in Subsea Processing in Oil and Gas Production. **Jurutera**, Petaling Jaya, v. 2012, p. 4, Junho 2012.
- MME. Boletim Anual de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural - 2016, p. 20, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 20 Novembro 2017.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9<sup>a</sup>. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2017.
- ØKLAND, O. *et al.* **Steps to the Subsea Factory**. Offshore Technology Conference. Rio de Janeiro: OTC 24307-MS. 2013. p. 10.
- PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. 1<sup>a</sup>. ed. Nova Iorque: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, v. I, 1980. 205 p.
- PETROBRÁS. Pré-Sal, 2017. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 15 Dezembro 2017.
- PINHEIRO, J. *et al.* **Probabilidade e estatística: quantificando a incerteza**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2013.
- PORTAL LABORATÓRIO VIRTUAL DE PROCESSOS QUÍMICOS. Operações com Partículas Sólidas. Disponível em: <[http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?Itemid=157&id=40&option=com\\_content&task=view](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?Itemid=157&id=40&option=com_content&task=view)>. Acesso em: 15 Dezembro 2017.
- SILVA, F. R. D. **Estudo de um Novo Sistema de Separação Primária de Gás-Óleo-Água para**. Trabalho de Diplomação (Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 33. 2013.
- SILVA, R. P. L. D. **Sistemas de Separação Submarina como Estratégia para Mitigar Problemas de Garantia de Escoamento**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 118. 2015.
- SMYTH, C. **Cyclonic Dewatering of Oil**. Tese (Tese em Engenharia Mecânica) - University of Southampton. Londres, p. 197. 1988.
- SVAROVSKY, L. *et al.* **Solid-Liquid Separation**. 4<sup>a</sup>. ed. Londres: Butterworths, 2000. 554 p. ISBN ISBN 0-408-70795-X.
- THOMAS, J. E. *et al.* **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. I, 2001.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2<sup>a</sup>. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.
- WONG, S. F. *et al.* Rheology Study of Water-in-Crude Oil Emulsions Siew. **Chemical Engineering Transactions**, v. 45, 2015.

