Escola de Química/UFRJ

Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

DESENVOLVIMENTO DE UM HIDROCICLONE PARA A SEPARAÇÃO DO ÓLEO PRESENTE EM ÁGUAS OLEOSAS DE REFINARIAS DE PETRÓLEO

Eduardo Rangel Braga

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências

Orientadores:

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Profa. Cláudia Míriam Scheid, D.Sc.

Rio de Janeiro

Dezembro de 2015

DESENVOLVIMENTO DE UM HIDROCICLONE PARA A SEPARAÇÃO DO ÓLEO PRESENTE EM ÁGUAS OLEOSAS DE REFINARIAS DE PETRÓLEO

Eduardo Rangel Braga

Tese submetida ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências.

Orientado por:

_____

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

_____

Profa. Cláudia Míriam Scheid, D.Sc., UFRRJ

Aprovada por:

_____

Prof. Fernando Cunha Peixoto, D.Sc., UFF

_____

Profa. Heloísa Lajas Sanches, D.Sc., UFRJ

_____

Prof. Luiz Augusto da Cruz Meleiro, D.Sc., UFRRJ

_____

Prof. Marcos Antônio de Souza Barrozo, D.Sc., UFU

_____

Profa. Tânia Suaiden Klein, Ph.D., UFRJ

Rio de Janeiro

Dezembro de 2015

Braga, Eduardo Rangel Braga

Desenvolvimento de um hidrociclone para a separação do óleo presente em águas oleosas de refinarias de petróleo / Eduardo Rangel Braga – Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2015.

XXXX, XXXXf.: il; 29,7 cm

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho, Cláudia Míriam Scheid.

Tese (doutorado) – UFRJ/Escola de Química/Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2015.

Referências Bibliográficas: f. XXX-XXXX

1. Hidrociclones. 2. Separação água-óleo. 3. Fluidodinâmica Computacional (CFD). 4. Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV). 5. Escoamento multifásico. I. Medronho, Ricardo de Andrade; Scheid, Cláudia Míriam. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. III. Título.

Dedico esta tese a minha família, que sempre me deu todo suporte para atingir toda e qualquer meta em minha vida. Dedico em memória ao grande amigo Frederico Belfort que sempre me apoiou e precocemente nos deixou.

AGRADECIMENTOS

A minha família que sempre me apoiou e deu suporte em todos os momentos, que me deu enorme incentivo para seguir com os estudos e possibilitou chegar a este momento.

Aos meus professores orientadores Ricardo de Andrade Medronho e Cláudia Míriam Scheid pela oportunidade concedida para desenvolver este estudo.

Ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD-UFRJ), ao Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica de Fluidos (NIDF-UFRJ), ao Laboratório de Tratamento de Águas e Reuso de efluentes (LABTARE-UFRJ), Laboratório de Escoamento de Fluidos da Universidade do Porto.

Ao Professor João Moreira Sales por todo o suporte dado para desenvolver parte da pesquisa na Universidade do Porto em Portugal. Possibilitando a utilização da técnica LDV.

Aos meus grandes amigos (irmãos) da engenharia química Fred (*In Memoriam*), Agustinho, Rômulo, Adriana, Cristiane, Cristiano, Rodrigo, João Victor, Petrone, Terra, Rafael, Hermes e Andrea por todo apoio ao longo desta jornada.

Aos meus amigos Pedro, Zé Carlos, Erlan, Isac, Roberta, Bruna, pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis.

A todos os que ajudaram diretamente e indiretamente para a realização deste trabalho e sonho.

Muito obrigado!

Eduardo Rangel Braga

"Quando eu encontrar Deus, vou fazer-lhe duas perguntas: por que a relatividade é tão estranha? E como explicar a turbulência?
Acredito que ele terá uma resposta para a primeira"

Werner Heisenberg

Resumo da Tese de Doutorado apresentada ao Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química/UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciências.

DESENVOLVIMENTO DE UM HIDROCICLONE PARA A SEPARAÇÃO DO ÓLEO PRESENTE EM ÁGUAS OLEOSAS DE REFINARIAS DE PETRÓLEO

Eduardo Rangel Braga

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD
Profa. Claudia Miriam Scheid, Dsc

Hidrociclones utilizam campo centrífugo para promover a separação de uma fase dispersa em uma fase contínua. Esta separação ocorre, principalmente, com base na diferença de densidades entre as fases, na intensidade do campo centrífugo e no tamanho da partícula ou gota. Os hidrociclones apresentam vantagens em relação a outros equipamentos de separação devido ao baixo custo de fabricação, instalação e manutenção, seu tamanho reduzido e simplicidade de operação. Neste trabalho, foram feitas simulações em fluidodinâmica computacional a fim de projetar hidrociclone para a separação de gotas de óleo dispersas em água com concentração de 1% em volume provinda de uma unidade de refino de petróleo. Foi feito um planejamento de experimentos composto central rotacional com superfície de resposta a fim de determinar valores para os diâmetros de *overflow* e *underflow* de modo a obter alta eficiência de separação e baixa razão de fluido. As simulações numéricas foram feitas com o pacote computacional da *Ansys*©. Para a solução numérica foi utilizado o *Ansys Fluent* que simulou o escoamento multifásico com abordagem euleriana e modelo de turbulência de tensores de Reynolds. Foram feitos experimentos utilizando técnica de velocimetria por imagem de partículas de modo a obter a validação dos dados simulados. Isto resultou em um hidrociclone com diâmetro de *overflow* de 10 mm e diâmetro de *underflow* de 15 mm, que tem eficiência total de separação medida experimentalmente de 94,6%, razão de fluido de 13,5%. As simulações estimaram uma eficiência total de separação de 99,0% e razão de fluido de 13,1%. As correntes de saída do *overflow* e *underflow* possuíam respectivamente concentração de 50 e 0,5 g de óleo/L de dispersão, evidenciando que o hidrociclone projetado possui um bom potencial para ser utilizado na separação de baixa concentração de óleo/água.

Abstract of a Thesis presented to Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science

DEVELOPMENT OF A HYDROCYCLONE FOR SEPARATION OF OIL IN OILY REFINERY WATERS

Eduardo Rangel Braga

Supervisors: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD
Prof. Claudia Miriam Scheid, Dsc

Hydrocyclones use centrifugal fields to promote the separation of a disperse phase in a continuous phase. The separation is mainly based on the density difference between the phases, the centrifugal field intensity and the particle or droplet size. Hydrocyclones have advantages in comparison with others separation devices due to their low manufacturing, installation, and maintenance costs, their reduced size and simple operation. In this work, computational fluid dynamics simulations was employed to design a hydrocyclone for the separation of oil droplets dispersed in water with a concentration of 1% in volume from an oil refining unit. A central composite experimental design with response surface has been applied to determine values for the overflow and underflow diameters in order to achieve high separation efficiency and low flow ratio. The numerical simulations were performed using the Ansys © computational package. The geometry was built with the software Design Modeler, the hexahedral mesh was obtained with Icem CFD software and Ansys Fluent was used for the numerical solution, which simulated the multiphase flow with an Eulerian approach and a Reynolds stress turbulence model. Experiments were performed using particle image velocimetry technique to obtain the validation of the simulated data. The resulting hydrocyclone presented on overflow diameter of 10 mm and underflow diameter of 15 mm, with an experimentally measured total efficiency separation of 94.6% and a flow ratio of 13.5%. The simulations predicted total separation efficiency of 99.0% and a flow ratio of 13.1%. The overflow and underflow streams have presented 50 and 0,5 g of oil/ L of dispersion respectively, indicating that the designed hydrocyclone has a good potential for use in the separation of low oil / water concentration.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Justificativa 3

1.2. Objetivos 4

1.2.1. Objetivo Geral 4

1.2.2. Objetivo Específicos deste Trabalho 4

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

2.1. Hidrociclone 6

2.2. Avaliação de Desempenho de Hidrociclones 10

2.2.1. Distribuição de Tamanhos de Partículas 11

2.2.2. Razão de fluido 11

2.2.3. Eficiência Granulométrica (G) 12

2.2.4. Eficiência Granulométrica Reduzida (G') 12

2.2.5. Eficiência Total ou Global (ET) 14

2.2.6. Eficiência Total Reduzida (E'_T) 14

2.3. Planejamento de Experimentos 15

2.3.1. Planejamento Fatorial 16

2.3.2. Planejamento Fatorial Fracionário 17

2.3.3. Planejamento Composto Central 18

2.4. Fluidodinâmica Computacional 19

2.5. Turbulência 24

2.5.1. Modelo k-ε 27

2.5.2. Modelos de Tensores de Reynolds 28

2.5.2.1. Modelo de Gibson e Launder 30

2.5.2.2. Modelo de Speziale, Sarkar e Gatski 31

2.6. Escoamentos Multifásicos 33

2.7. Velocimetria por Imagem de Partículas e Velocimetria por Laser Doppler 34

3. MATERIAIS E MÉTODOS 36

3.1. Simulações Numéricas 36

3.1.1. Geração da Geometria 36

3.1.2. Geração da Malha 38

3.1.3. Definição da Simulação 42

3.1.4. Solução Numérica das Equações Definidas Para a Simulação, Análise dos Resultados em um Programa de Pós-Processamento e Hardware Utilizado 45

3.2. Unidade Experimental 45

3.2.1. Experimentos utilizando Velocimetria por Laser Doppler (*LDV*) 48

3.2.2. Experimentos utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV*) 51

3.2.3. Experimentos com óleo para medir eficiência de separação 60

4. RESULTADOS 66

4.1. Resultados das Simulações 66

4.1.1. Resultados do planejamento de experimentos 73

4.1.2. Análise das eficiências de separação 82

4.2. Resultados Experimentais 85

5. CONCLUSÕES 100

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 101

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

ANEXO I 107

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema de um processo de separação óleo/água utilizando um hidrociclone. 3
Figura 2 – Princípio de funcionamento do hidrociclone. 8
Figura 3 – Desenho esquemático do Hidrociclone evidenciando o *Vortex finder* 9
Figura 4 – Exemplo de curva de eficiência granulométrica com R_f = 0,35. 12
Figura 5 – Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida, com um diâmetro de corte reduzido de 24 μm. 13
Figura 6 – Métodos de solução de um problema de fenômenos de transporte (Maliska 2004). 20
Figura 7 – Esquema de uma solução de um problema físico utilizando métodos numéricos (Maliska 2004). 20
Figura 8 – Discretização no domínio (Maliska 2004). 21
Figura 9 – Elementos triangulares (esquerda) e Elementos quadriláteros (direita). 22
Figura 10 – Malha estruturada. 23
Figura 11 – Malha não estruturada. 24
Figura 12 – Exemplos de escoamentos turbulentos. 25
Figura 13 – Exemplos de medição utilizando PIV (adaptado do guia do usuário (FlowManager Software 2000)). 35
Figura 14 – Desenho esquemático das dimensões do hidrociclone modificado. 36
Figura 15 – Vista lateral do hidrociclone base. 37
Figura 16 – Vista superior do hidrociclone base. 37
Figura 17 – Vista lateral da malha do hidrociclone base. 39
Figura 18 – Vista superior da malha do hidrociclone base. 39
Figura 19 – Vista interna da malha do hidrociclone base. 40
Figura 20 – Linha para medir o perfil de velocidades tangenciais do hidrociclone base. 41
Figura 21 – Perfis de velocidades tangenciais para as diferentes malhas do hidrociclone base. 42
Figura 22 – acompanhamento das variáveis: a) vazão mássica de óleo no overflow, b) vazão mássica de água no overflow , c) pressões nas entradas e d) velocidade média no overflow. . 44
Figura 23 – Hidrociclone testado nos ensaios experimentais. 46
Figura 24 – Desenho construtivo da parte cilíndrica. 46
Figura 25 – Foto da seção cilíndrica do hidrociclone com os dois medidores de vazão conectados nas entradas do equipamento. 47
Figura 26 – Foto da seção cônica. 47
Figura 27 – Desenho construtivo em *CAD* da seção cônica. 48
Figura 28 – Esquema da unidade experimental. 49
Figura 29 – Emissor de laser. 50
Figura 30 – Posicionamento do laser no protótipo de acrílico para medição de velocidade empregando a técnica de LDA. 50
Figura 31 – Fluxograma da unidade experimental para análise com PIV. 51
Figura 32 – Hidrociclone montado em estrutura metálica 52
Figura 33 – Câmeras e lentes utilizadas. 53
Figura 34 – Posicionamento das câmeras. 54
Figura 35 – Alvos de calibração para as medições axiais (esquerda) e tangenciais (direita) posicionados dentro do equipamento. 54
Figura 36 – Imagem obtida pela câmera do sistema PIV do alvo de calibração para as medições axiais posicionado dentro do hidrociclone. 55

Figura 37 – Fotos do alvo de calibração para medições de velocidades tangenciais dentro do hidrociclone sem água (esquerda) e com água (direita). 55
Figura 38 – Seção do hidrociclone de acrílico cheia de água. 56
Figura 39 – Imagem original obtida pela câmera do sistema PIV. 56
Figura 40 – Imagem corrigida pela função dewarp pelo software do sistema PIV. 57
Figura 41 – Solução de partículas de Rodamina B e filtro para eliminar comprimento de ondas inferior a 570 nm. 57
Figura 42 – Par de imagens obtidas em sequência para medir o perfil de velocidades axiais. 58
Figura 43 – Mapa de correlação para uma janela de 32 x 32 pixels. 60
Figura 44 – Amostra do óleo lubrax ob-10 utilizado nos experimentos. 61
Figura 45 – Fluxograma da unidade experimental para a determinação da eficiência de separação. 62
Figura 46 – Foto do misturador estático. 62
Figura 47 – Absorbância versus comprimento de onda para diferentes concentrações de óleo em n-hexano. 63
Figura 48 – Curva de Absorbância contra concentração de óleo em n-hexano para calibração. 64
Figura 49 – Linhas de corrente do hidrociclone em simulação realizada com o modelo de turbulência k-ε no programa Ansys CFX. 66
Figura 50 – Fração volumétrica de óleo no hidrociclone em simulação realizada com o modelo de turbulência k-ε no programa Ansys CFX. 67
Figura 51 – Velocidade tangencial em função do raio em simulação realizada com o CFX e o modelo k-ε de turbulência. 68
Figura 52 – Linhas de corrente em simulação realizada com o Fluent. 69
Figura 53 – Velocidade tangencial em simulação realizada com o Fluent. 69
Figura 54 – Vetores de velocidade no *overflow* em simulação realizada com o Fluent. 70
Figura 55 – Vetores de velocidade no *underflow* em simulação realizada com o Fluent. 70
Figura 56 – Vetores de velocidade em um plano na seção cônica em simulação realizada com o Fluent. 71
Figura 57 – Vetores de velocidade axial em um plano vertical no centro do hidrociclone em simulação realizada com o Fluent. 72
Figura 58 – Perfil de pressão em um plano na região central do hidrociclone da simulação 9 (ponto central do planejamento de experimentos). 72
Figura 59 – Distribuição normal para a resposta G. 75
Figura 60 – Distribuição normal para a resposta R_f. 76
Figura 61 – Comportamento padrão para os gráficos de resíduos para a resposta G. 77
Figura 62 – Comportamento padrão para os gráficos de resíduos para a resposta R_f. 77
Figura 63 – Diagrama de Pareto para G. 78
Figura 64 – Diagrama de Pareto para R_f. 78
Figura 65 – Superfície de respostas para G. 80
Figura 66 – Superfície de respostas para R_f. 80
Figura 67 – Função de desejabilidade para G e R_f. 81
Figura 68 – Fração volumétrica de óleo no *overflow* para os diâmetros de gotas de 5, 10, 20 e 100 μm. 82
Figura 69 – Curva de eficiência granulométrica por diâmetro de gotas. 83
Figura 70 – Curva de eficiência granulométrica reduzida por diâmetro de gotas. 84
Figura 71 – Fotografias do escoamento da água no hidrociclone. 85
Figura 72 – ΔP contra vazão total de entrada no hidrociclone obtidos nos ensaios experimentais. 86

Figura 73 – Perfil de velocidades tangenciais: comparação dos resultados simulados com os dados experimentais. 86
Figura 74 – Par de imagens obtidas em sequência para medir o perfil de velocidades tangenciais. 87
Figura 75 – Posições das medições experimentais e simuladas em três sessões..... 88
Figura 76 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade tangenciais utilizando a técnica PIV na seção 1..... 88
Figura 77 – Vetores de velocidade instantânea para quatro pares de imagens obtidas em sequencia utilizando a técnica PIV na seção 1. 89
Figura 78 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 1)..... 90
Figura 79 – Perfis de velocidades tangenciais simulado e experimental medidos na linha 1. . 90
Figura 80 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade tangenciais utilizando a técnica PIV na seção 2..... 91
Figura 81 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 2)..... 92
Figura 82 – Perfis de velocidades tangenciais simulado e experimental medidos na linha 2. . 92
Figura 83 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidades axiais utilizando a técnica PIV na seção 2..... 93
Figura 84 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 2)..... 93
Figura 85 – Plano de velocidade média axial na seção 2 utilizando a técnica PIV..... 94
Figura 86 – Perfis de velocidade axial simulado e experimental na linha 2. 94
Figura 87 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade tangenciais utilizando a técnica PIV na seção 3..... 95
Figura 88 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 3)..... 96
Figura 89 – Perfis de velocidades tangenciais simulado e experimental medidos na linha 3. . 96
Figura 90 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade axiais utilizando a técnica PIV na seção 3. 97
Figura 91 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 3)..... 97
Figura 92 – Plano de velocidade média axial na seção 3 utilizando a técnica PIV..... 98
Figura 93 – Perfis de velocidade axial simulado e experimental na linha 3. 98

Índice de Tabelas

Tabela 1: Constantes do modelo de Turbulência k-ε. 28
Tabela 2: Vantagens e desvantagens do modelo de turbulência k-ε (Aguirre e Damian 2008). 29
Tabela 3: Vantagens e desvantagens do modelo de turbulência das tensões de Reynolds (Aguirre e Damian 2008)..... 30
Tabela 4: Constantes do modelo de Turbulência de Gibson e Launder. 31
Tabela 5: Constantes do modelo de Turbulência SSG (Speziale, Sarkar e Gatski 1991). 32
Tabela 6: Dimensões do hidrociclone estudado. 37
Tabela 7: Diâmetros do *overflow* (Do) e do *underflow* (Du) a serem utilizadas nas simulações. 38
Tabela 8: Dimensões das malhas utilizadas no teste de independência da malha..... 42
Tabela 9: Condições de contorno e demais parâmetros empregados nas simulações. 43
Tabela 10 – Resultados do planejamento composto central rotacional. 73
Tabela 11 – Análise ANOVA para a variável dependente G com R^2=0,9381 74
Tabela 12 – Análise ANOVA para a variável dependente R_f com R^2=0,9837 74
Tabela 13 – Coeficientes de regressão para a resposta G. 79
Tabela 14 – Coeficientes de regressão para a resposta R_f. 79
Tabela 15 – Eficiência granulométrica (G), razão de fluido (R_f) e eficiência granulométrica reduzida (G') para os diâmetros de gota de óleo simulados. 83
Tabela 16 – Eficiência total de separação 99

LISTA DE SÍMBOLOS

Nas dimensões dadas abaixo M é massa, L é comprimento, T é tempo e θ é temperatura

d	Diâmetro de partícula ou gota de óleo (L)
d_{50}	Diâmetro de corte (L)
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido (L)
Dc	Diâmetro do hidrociclone (L)
Di	Diâmetro do duto de alimentação (L)
Do	Diâmetro do "*overflow*" (L)
Du	Diâmetro do "*underflow*" (L)
ET	Eficiência total de separação
E'T	Eficiência total de separação reduzida
Fi	Forças de inércia por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
Fd	Força de arrasto ($M\ L\ T^{-2}$)
Fo	Outras forças (sustentação, browniana, etc.) ($M\ L\ T^{-2}$)
Fp	Forças de pressão por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
Fv	Forças viscosas por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
Fg	Forças de campo por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
Fx	Força de aceleração adicional ($M\ L\ T^{-2}$)
G	Aceleração da gravidade ($M\ T^{-2}$)
G	Eficiência granulométrica da gota de óleo de dado diâmetro
G'	Eficiência granulométrica reduzida
k	Parâmetro do modelo de Rosin-Rammler-Bennet (L)
K	Energia cinética turbulenta por unidade de massa ($L^2\ T^{-2}$)
m	Parâmetro do modelo de Rosin-Rammler-Bennet
mp	Massa da partícula (M)
M	Variável instantânea qualquer
$\overline{M}$	Média temporal de M
M'	Flutuação turbulenta de M
n	Parâmetro do modelo de eficiência granulométrica reduzida
P_e	Pressão na entrada ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)
P_o	Pressão no *overflow* (saída superior) ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)

P_u Pressão no *underflow* (saída inferior) ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)

Q_o Vazão volumétrica de óleo no overflow ($L^3\ T^{-1}$)

Q_u Vazão volumétrica de óleo no underflow ($L^3\ T^{-1}$)

Q_e Vazão volumétrica de óleo na entrada ($L^3\ T^{-1}$)

Q_{ao} Vazão volumétrica de água no overflow ($L^3\ T^{-1}$)

Q_{au} Vazão volumétrica de água no underflow ($L^3\ T^{-1}$)

Q_{ae} Vazão volumétrica de água na entrada ($L^3\ T^{-1}$)

Re_p Número de Reynolds da partícula

R_f Razão de fluido

t Tempo (T)

T Temperatura (θ)

u Velocidade instantânea ($L\ T^{-1}$)

u' Flutuação da velocidade ($L\ T^{-1}$)

U Velocidade média ($L\ T^{-1}$)

v Vetor Velocidade ($L\ T^{-1}$)

ν_t Viscosidade cinética turbulenta ($M^2\ T^{-1}$)

v_x Velocidade na direção x ($L\ T^{-1}$)

v_y Velocidade na direção y ($L\ T^{-1}$)

v_z Velocidade na direção z ($L\ T^{-1}$)

V Volume (L^3)

W_o Vazão mássica de óleo no *overflow* ($M\ T^{-1}$)

W_e Vazão mássica de óleo na entrada ($M\ T^{-1}$)

$W_o|d$ Vazão mássica da gota de óleo de dado diâmetro no *overflow* ($M\ T^{-1}$)

$W_e|d$ Vazão mássica da gota de óleo de dado diâmetro na entrada ($M\ T^{-1}$)

W_{ao} Vazão mássica de água no *overflow* ($M\ T^{-1}$)

W_{ae} Vazão mássica de água na entrada ($M\ T^{-1}$)

y Distribuição cumulativa menor que dado d na alimentação, em fração ponderal

y Fração cumulativa menor que dado d no *underflow*, em fração ponderal

y Fração cumulativa menor que dado d na entrada, em fração ponderal

Δ Indica a diferença (absoluta ou relativa) entre duas quantidades

ΔP Queda de pressão ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)

ε Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa ($L^2\ T^{-3}$)

θ Ângulo do cone do hidrociclone

μ Viscosidade absoluta do líquido ($M\ L^{-1}\ T^{-1}$)

ρ Densidade do líquido ($M\ L^{-3}$)

τ Tensor tensão ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)

ϕ Esfericidade da partícula

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da poluição das águas é uma preocupação mundial, visto que este é um recurso cada vez mais escasso e indispensável. Deste contexto resulta o estudo de novas tecnologias para o tratamento de resíduos que possam vir a ser descartados e/ou para o reaproveitamento da água.

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

Assim, vêm sendo investidos cada vez mais recursos para o desenvolvimento de processos que permitam o reaproveitamento da água que seria descartada. Atualmente, é comum o uso do termo minimização de águas, que seria o máximo reaproveitamento possível de toda a água utilizada em um processo. Porém, mesmo esta técnica apresenta limites e a água residual ainda deve ser tratada.

A indústria do petróleo tem grande interesse na reutilização de águas, pois seu tratamento é de essencial importância em toda a cadeia produtiva, desde a extração do petróleo do poço até o refino. Nas plataformas, o óleo retirado dos poços contém uma quantidade significativa de água e somente com o tratamento primário realizado nas plataformas não é possível remover toda a água presente na corrente de óleo. Assim, se faz necessária uma separação secundária, que é realizada nas refinarias.

Uma das técnicas utilizadas para promover a separação água-óleo nas refinarias é a decantação, na qual a separação se dá pela diferença de densidade entre os fluidos envolvidos. Por se tratar de um processo simples e puramente físico, é o mais utilizado. Este processo, porém, apresenta desvantagens, como a necessidade de grandes equipamentos para uma separação eficiente, visto que é necessário um elevado tempo de residência. Em alguns casos, após esses extensos períodos, não há a separação completa das fases, pois a força da gravidade não é suficiente para separar o óleo da água no intervalo de tempo permitido pelo processo (Hashmi, Hamza e Wilson 2004). Além disso, muitas vezes há a necessidade de aquecer o sistema para melhorar a separação, consumindo maior quantidade de energia e promovendo a geração de CO_2.

De tempos em tempos, a água acumulada no tanque é drenada pelo fundo do equipamento, sendo que esta água contém gotículas de óleo suspensas, pois a separação não é perfeita. Essa água oleosa é, então, enviada às Unidades de Tratamento de Dejetos Industriais - UTDI - para

posterior reuso ou descarte no meio ambiente. O custo do tratamento desta água produzida vai depender, dentre outros fatores, de suas características e da forma de associação ao óleo.

Com o objetivo de amenizar este cenário, as indústrias vêm adotando uma política de prevenção e redução, seguida de reciclagem e reuso e, finalmente, o tratamento dessas águas. Reciclar a água, mais do que uma atitude ecologicamente correta, é sinônimo de economia, já que a Lei N° 9.433, de 08 de Janeiro de 1997 estabelece um pagamento para a captação e a devolução de águas.

No Brasil, uma refinaria de grande porte consome 1400 m^3/h de água e a produção é de 0,4 e 1,60 m^3 efluente/m^3 de óleo refinado na planta (Mariano 2001). A maioria das operações de refino utiliza grande quantidade de água de processo, vapor ou água de resfriamento. A principal função da água em refinarias é a de resfriamento e, após retirar calor das correntes de óleo e de derivados, é resfriada nas torres de resfriamento, formando um circuito fechado. O uso de circuitos fechados pode reduzir a quantidade de água captada em mais de 90%, reduzindo a quantidade de efluentes produzidos.

Porém, nessas torres de resfriamento ocorre uma enorme perda de água, em função da sua evaporação causada pela baixa umidade do ar. Dessa forma, uma quantidade significativa de água é necessária para a reposição desta perda. Além disso, há um grande consumo de água na dessalgadora, na qual a mesma é injetada para retirada do sal presente no óleo proveniente dos campos de petróleo. Outro importante uso da água em refinarias é para geração de vapor, que é utilizado para geração de energia elétrica e mecânica para grandes equipamentos e no processo para retificação de produtos.

Em relação ao descarte da água residual, agências internacionais de controle de poluição de águas preveem limites de concentração para descarte desta no mar. A título de exemplo, pode-se destacar o Departamento de Energia do Reino Unido que permite concentrações mensais máximas de óleo na água de descarte de 40 mg/L. No Brasil, o descarte de água produzida deve obedecer à concentração média mensal limite de 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L (Conama - Conselho Nacional do Meio Ambiente 2007).

Devido a isso, torna-se evidente que é de grande interesse da indústria do petróleo o estudo de novas técnicas e/ou equipamentos que possam promover a separação água-óleo de maneira mais eficiente, para que a água possa ser reaproveitada. Um equipamento que pode ser empregado neste tipo de separação é o hidrociclone. A Figura 1 esquematiza este processo de separação em refinarias e mostra um exemplo de onde o hidrociclone poderia ser inserido.

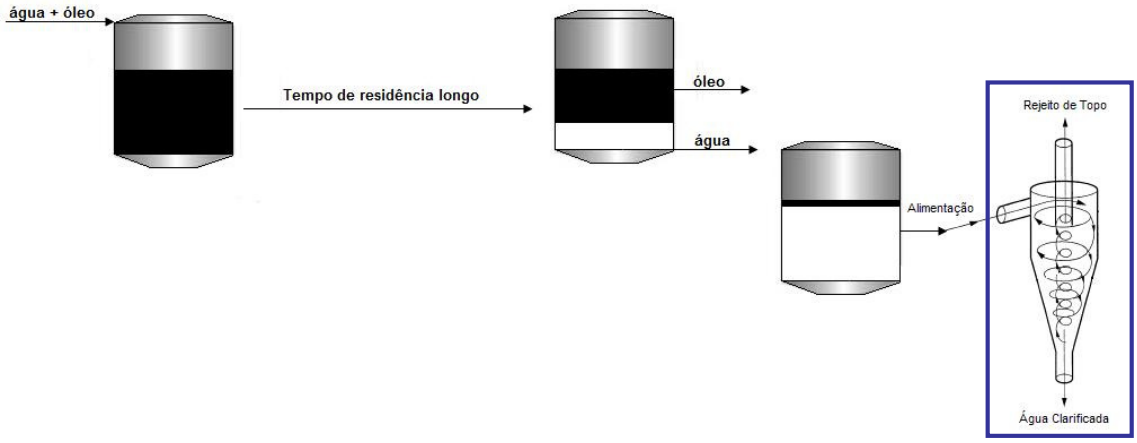


Figura 1 – Esquema de um processo de separação óleo/água utilizando um hidrociclone.

Hidrociclones são equipamentos que usam campo centrífugo para promover a separação. Esses equipamentos podem produzir eficiências elevadas com pequenos tempos de residência e ocupam uma pequena área, podendo, ainda, ser utilizada uma bateria de hidrociclones para aumentar a capacidade de processamento.

De uma forma geral, o hidrociclone separa a fase dispersa da fase contínua com base na diferença de densidades entre as fases, sendo esta separação muito influenciada pelo tamanho da partícula entre outros fatores.

Os hidrociclones apresentam grandes vantagens em relação a outros equipamentos de separação. Dentre elas, pode-se destacar a grande versatilidade em aplicações, o baixo custo de fabricação, a facilidade de sua instalação, a pouca manutenção requerida, a total ausência de partes móveis, seu tamanho reduzido em relação a outros separadores, as elevadas capacidades e a simplicidade de operação (Svarovsky, Solid-liquid Separation 2000).

1.1. Justificativa

O reaproveitamento da água nas refinarias de petróleo é importante, devido à diminuição do impacto ambiental, ao menor consumo de água e maior produtividade gerada. Para este reaproveitamento, é utilizado nas refinarias o processo de decantação, que requer um elevado tempo de residência, o que implica em sedimentadores com grandes volumes. A fim de aumentar o reaproveitamento, pode-se utilizar o hidrociclone que apresenta boa eficiência de separação, baixo custo de operação, elevada capacidade e área ocupada (*floor space*) muito inferior ao sedimentador.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é desenvolver um hidrociclone para a separação de baixa concentração de óleo presente em águas oleosas de correntes típicas de produção de petróleo utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional e as técnicas de velocimetria por imagem de partículas e laser doppler com a finalidade de validar as simulações.

1.2.2. Objetivo Específicos deste Trabalho

Com o presente projeto, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Otimizar as proporções geométricas de um hidrociclone, através de fluidodinâmica computacional (CFD), utilizando a técnica de planejamento de experimentos;
- Estudar, por meio do uso da fluidodinâmica computacional, os perfis de velocidade, queda de pressão, eficiência de separação e razão de fluido de hidrociclone;
- Validar os resultados da simulação com resultados experimentais dos perfis de velocidades obtidos através de Velocimetria por Imagem de Partículas (abreviado comumente como PIV que provêm do inglês *Particle Image Velocimetry*) e técnica de Velocimetria por Laser *Doppler* (LDV);
- Validar o hidrociclone com geometria otimizada obtido por simulação CFD através de sua construção e da condução de testes experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item apresenta um embasamento teórico para o trabalho realizado e uma revisão de artigos relacionados com o tema do trabalho.

Chu *et al.* (2004) desenvolveram um modelo matemático para estudar o escoamento de uma suspensão com partículas de carvão em um ciclone. No modelo, o movimento das partículas de carvão é obtido através do Método dos Elementos Discretos (DEM) utilizando o conceito de pacote de partículas. Utilizando a técnica de fluidodinâmica computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*), os autores utilizaram o modelo de turbulência dos tensores de Reynolds. O escoamento simulado permitiu a estimação de queda de pressão, das trajetórias das partículas e das curvas de distribuição de tamanhos de partículas de carvão. Estas estimativas foram comparadas favoravelmente com medições em escala industrial de um ciclone de 1000 mm operando em condições semelhantes.

Schütz *et al.* (2009) modelaram um hidrociclone utilizando CFD para retirar água de uma corrente de combustível diesel. Este processo de separação é influenciado por efeitos de interação gota-gota como a quebra e coalescência de gotas resultando numa alteração da distribuição de tamanho de gotícula.

Um modelo de simulação foi desenvolvido acoplando a solução numérica do campo de escoamento no hidrociclone com base em balanços populacionais. O tamanho das gotas da distribuição foi discretizado e cada tamanho de gotícula foi assumido como sendo uma fase individual dentro de um modelo de mistura multifásico. A dissolução de gotículas e as taxas de coalescência foram definidas como as taxas de transferência de massa entre as fases discretas com a ajuda de funções definidas pelo usuário.

Todas as equações do modelo foram resolvidas utilizando o pacote computacional *Fluent* da *Ansys*©. As investigações mostraram o impacto da geometria do hidrociclone no balanço populacional e dinâmica de separação. O hidrociclone com uma geometria otimizada apresentou menores gradientes de velocidade aumentando as taxas de coalescência e aumentou a eficiência de separação. As distribuições de tamanho de gotícula calculadas nas saídas do equipamento mostraram boa concordância com os dados experimentais. A abordagem desta modelagem pode ser estendida e adaptada a outros sistemas de escoamento de dispersão multifásicos (Schütz, Gorbach e Piesche 2009).

Bai (2009) fez um estudo experimental do escoamento de um hidrociclone para separar óleo de água. Usando a técnica de velocimetria de dois componentes de laser *Doppler* foram medidas as velocidades axial, velocidades tangenciais e flutuações de velocidade em um

hidrociclone com 35 mm de diâmetro. No hidrociclone ocorreu um núcleo de ar quando a vazão de entrada foi maior do que 2 m^3/h. As flutuações de velocidade com núcleo de ar foram maiores do que sem núcleo de ar. As magnitudes das velocidades foram dependentes da vazão de entrada e as características do escoamento não mudaram com alterações na vazão de entrada no hidrociclone. As flutuações de velocidade foram maiores perto do núcleo e perto da parede. Estes estudos foram úteis para compreender o mecanismo de separação da remoção de óleo em um hidrociclone.

Delgadillo e Rajamani (2007) fizeram um estudo visando implementar modificações nas geometrias clássicas de hidrociclone para obter maior eficiência de separação. A exploração de novos projetos é demorado e caro de conduzir apenas com experimentação, por isso os autores utilizaram CFD para explorar geometrias alternativas de forma a atingir a separação desejada. O pacote computacional *Fluent* versão 6.0 foi utilizado para resolver as equações da simulação. Como modelo de turbulência, foi utilizado o modelo de simulação de grandes escalas (LES) e empregaram a abordagem lagrangeana para descrever o movimento das partículas. Foram exploradas seis novas geometrias e comparadas com a geometria padrão. Os resultados mostraram que as modificações da geometria em 2 modelos tiveram um desempenho superior que a geometria convencional, sendo bons candidatos para validação experimental.

2.1. Hidrociclone

A primeira patente de hidrociclones data de 1891 (Svarovsky 1984). Após a Segunda Guerra Mundial, seu uso foi intensificado no processamento de minérios, e mais tarde teve aplicação em vários outros setores de indústrias química, petroquímica, de geração de energia, têxtil, metalúrgica e etc. Os hidrociclones estão bem consolidados no meio industrial sendo que cada vez mais suas aplicações aumentam.

Carvalho e Medronho (2004) estudaram a aplicação de hidrociclones na separação parcial da barita presente em fluidos de perfuração, durante a perfuração de um poço, de modo a gerar dois fluidos com densidades médias diferentes: o primeiro, com maior teor de barita e, portanto, mais denso, para injeção na coluna de perfuração e o segundo, menos denso, para injeção na base do *riser*. Neste trabalho, foram apresentados os primeiros resultados desta técnica alternativa e, possivelmente, mais simples de se obter um duplo gradiente de perfuração.

De acordo com Oliveira e Medronho (2004), um navio petroleiro, à medida que descarrega sua carga, bombeia água do mar para seus tanques de lastro, a fim de controlar seu calado e aumentar sua estabilidade estrutural durante a navegação sem carga. Assim, organismos

presentes na água são transferidos de seu habitat natural para outro, podendo causar graves desequilíbrios ecológicos. Estes autores estudaram a aplicação de hidrociclones para separar os organismos e demais sólidos suspensos na água de lastro.

Ainda na separação de pequenos organismos, um hidrociclone foi patenteado para a separação de células animais (Deckwer, et al. 2005) e pode ser empregado, por exemplo, na retenção de células CHO no biorreator, com objetivo de maximizar a produção de importantes biofármacos (Pinto, Medronho e Castilho 2008).

Os hidrociclones são equipamentos versáteis e de simples operação, os mesmos podem ser utilizados como separadores para suspensões diluídas ou concentradas, sendo que as partículas dispersas podem ser sólidas, líquidas ou bolhas de gás. São utilizados também como clarificadores, concentradores e equipamento de lavagem, podendo ainda funcionar como degaseificadores e classificadores (Heiskanen 1993).

Hidrociclones para águas oleosas tiveram início com os trabalhos realizados na Universidade de Southampton, na Inglaterra, pela equipe liderada pelo professor Martin Thew, no final da década de 70. Devido a um acidente com um petroleiro que resultou no vazamento de um grande volume de óleo nas costas da Cornuália, o governo britânico precisava desenvolver um equipamento pequeno e fácil de manusear, para possibilitar a montagem em embarcações, e que tivesse uma alta eficiência na separação do óleo da água, permitindo rápida limpeza. Colman e Thew (1980) foram os pioneiros no desenvolvimento de um hidrociclone para a separação de águas oleosas.

A partir do trabalho de Thew e colaboradores, o hidrociclone para a separação líquido-líquido vem sendo cada vez mais utilizado. Nas plataformas de petróleo *offshore*, o espaço físico precisa ser muito bem planejado e por isso torna-se muito atrativo ter um sistema compacto de hidrociclones, devido às suas menores dimensões, apresentando vantagens em comparação com separadores gravitacionais.

Desde o final da década de 90, o conceito de remoção de água do óleo no poço ou DOWS (*Downhole Oil Water Separation*) tem se tornado popular. O hidrociclone é um candidato ideal para essa aplicação (Delfos, et al. 2004).

A separação da fase dispersa nos separadores ciclônicos é realizada pela ação do campo centrífugo que se estabelece no interior do dispositivo devido às condições impostas à corrente de fluido que escoa em seu interior (Svarovsky, Solid-liquid Separation 2000).

Os hidrociclones não possuem partes móveis, sendo assim, seu funcionamento é mais simples que as centrífugas e demandam menores custos de investimento, operação e manutenção, embora operem com campos centrífugos de menor intensidade.

Os hidrociclones são equipamentos constituídos normalmente de uma parte cilíndrica e uma ou mais partes cônicas justapostas, nas quais a dispersão é alimentada por um ou dois tubos de entrada (que podem ser circulares ou retangulares). A alimentação dever ser normal ao eixo do equipamento, e posicionadas tangencialmente à parede lateral do cilindro (Figura 2).

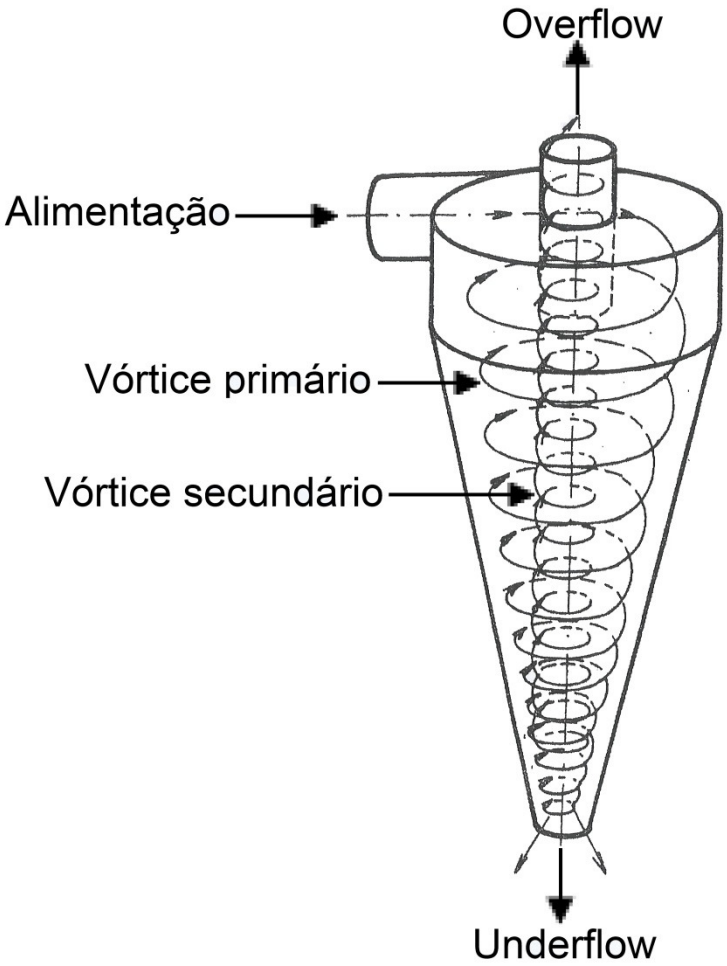


Figura 2 – Princípio de funcionamento do hidrociclone.

O equipamento possui duas saídas, uma delas situada no topo próximo à seção de alimentação, chamada *overflow*, e a outra situada na parte inferior do equipamento numa seção afastada da seção de alimentação, na parte final do corpo cônico do hidrociclone, chamada *underflow*.

A ação de separação ocorre devido ao campo centrífugo gerado dentro do corpo do hidrociclone. O fluido entra tangencialmente na seção cilíndrica do equipamento e começa a girar onde encontra um anteparo formado por um tubo comumente chamado de *vortex finder*.

Este tubo é uma extensão do *overflow* para dentro do hidrociclone (Figura 3) e tem o objetivo de diminuir o curto-circuito no equipamento (suspensão da entrada que sai diretamente para o *overflow*).

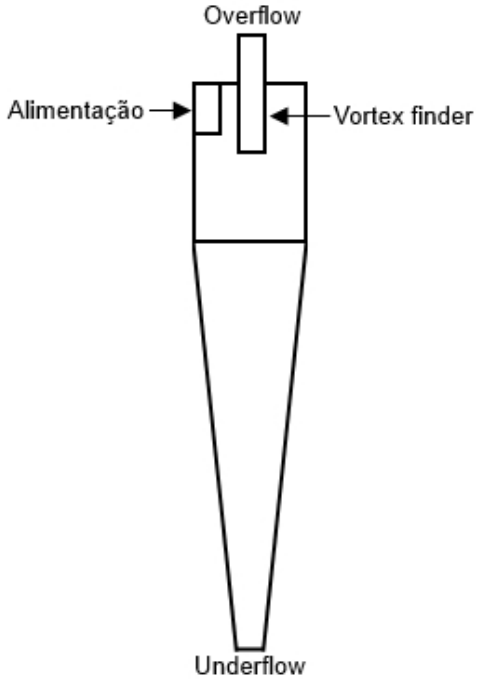


Figura 3 – Desenho esquemático do Hidrociclone evidenciando o *Vortex finder*

A gravidade não afeta significativamente a separação, já que o campo centrífugo é muito maior que o campo gravitacional (exceto nos casos de hidrociclones muito grandes usados em separação de grandes partículas). Com isso o equipamento não precisa ser operado na vertical podendo operar inclinado ou até mesmo invertido se necessário (Svarovsky 1984).

A suspensão escoa no interior do equipamento, gerando com isso um escoamento tridimensional turbulento em que é acelerado quando atravessa a região cônica. A força do campo centrífugo é aumentada e consequentemente a substância que possui maior densidade tende a se mover em direção à parede do equipamento. A substância menos densa tende a se concentrar no entorno do eixo central do equipamento onde o gradiente de pressão reverso provoca a saída deste fluido através do *overflow* (Grady, et al. 2003).

No caso de separação sólido-líquido, a substância de maior densidade normalmente é o sólido (fase dispersa) que se movimenta em direção à parede do equipamento e sai concentrado no *underflow*. O líquido (fase contínua), substância menos densa, tende a se concentrar no centro do equipamento e sai pelo *overflow*, na forma de uma suspensão diluída.

Numa separação líquido-líquido, acontece a separação de acordo com o mesmo princípio da separação sólido-líquido, onde o líquido mais denso se concentra na parede do equipamento saindo, preferencialmente, pelo *underflow* e o menos denso se concentra no centro do equipamento saindo, preferencialmente, pelo *overflow*.

Vale ressaltar a diferença que na separação óleo-água, o óleo (fase dispersa) é a substância menos densa, logo, a fase dispersa sai concentrada no *overflow*, ao contrário do sólido-líquido onde a fase dispersa sai concentrada no *underflow*, caso o sólido seja, como usualmente acontece, mais denso que o líquido. Desta forma, geometrias ótimas para estes diferentes casos podem diferir substancialmente.

As principais vantagens na utilização do hidrociclone para separação são: (Svarovsky 1984)

- Gera baixos tempos de residência para efetuar a separação;
- Requer uma área de terreno muito menor do que a requerida por separadores gravitacionais;
- Necessita de pouca manutenção por não possuir partes móveis.

As principais desvantagens na utilização do hidrociclone para separação líquido-líquido são:

- Não é possível obter-se uma separação completa das fases;
- A existência de cisalhamento causa um problema adicional na separação líquido/líquido. Enquanto partículas sólidas individuais não são afetadas por tensão cisalhante, gotas começarão a se quebrar a partir de certo valor da taxa de cisalhamento. Há, portanto, uma vazão ótima para eficiência de separação máxima.
- A eficiência de separação é altamente dependente da diferença de densidades e esta é, em geral, consideravelmente menor para misturas líquidas que para sistemas sólido/líquido.

2.2. Avaliação de Desempenho de Hidrociclones

Alguns fatores são importantes para analisar o desempenho do hidrociclone, como a distribuição de tamanhos de partículas nas entradas e saídas do equipamento, razão de fluido, eficiência granulométrica, eficiência granulométrica reduzida, eficiência total de separação e eficiência total reduzida.

2.2.1. Distribuição de Tamanhos de Partículas

Para descrever a distribuição de partículas em um hidrociclone é comum utilizar a distribuição cumulativa menor que dado tamanho (Equação 1). E dentre diversos modelos utilizados para descrever a distribuição de diâmetros das partículas em uma amostra, neste trabalho foi adotado o de Rosin-Rammler-Bennett (RRB). Esta formulação foi escolhida por possuir poucos parâmetros, ser de fácil linearização, apresentar ótima concordância com os dados experimentais e por estar inserida nos programas utilizados.

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

Em que,

y = fração cumulativa menor que dado tamanho;

d = diâmetro da partícula;

m e k são parâmetros do modelo.

Os parâmetros da equação acima são obtidos pela linearização da equação 1, conforme mostrado a seguir:

$$\ln(-\ln(1 - \mathrm{y})) = m \ln d - m \ln k \tag{2}$$

2.2.2. Razão de fluido

Em uma operação normal de um hidrociclone, a fase contínua se divide, saindo por ambas as saídas. A razão entre a quantidade de fluido contínuo que sai pelo concentrado (*overflow* no caso de separação líquido-líquido) e a quantidade que entra pelo duto de alimentação tem o nome de razão de fluido (Equação 3).

$$R_f = \frac{W_{ao}}{W_{ae}} \tag{3}$$

Em que,

R_f = Razão de fluido;

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

W_{ae} = Vazão mássica de água na entrada.

2.2.3. Eficiência Granulométrica (G)

A eficiência granulométrica é a fração de partículas de um determinado tamanho que saiu pela saída concentrada, ou seja, é a razão entre as vazões mássicas de partículas de um dado diâmetro na saída concentrada e na entrada.

$$G|_d = \frac{W_o|d}{W_e|d} \tag{4}$$

Em que,

$G|_d$= Eficiência granulométrica da partícula de óleo de dado diâmetro d;

$W_o|_d$ = Vazão mássica da partícula óleo de dado diâmetro d no *overflow*;

$W_e|_d$ = Vazão mássica da partícula óleo de dado diâmetro d na entrada.

Quando se calcula a eficiência granulométrica para diversos tamanhos de gotículas ou partículas pode-se montar a curva de eficiência granulométrica conforme exemplificado na Figura 4.

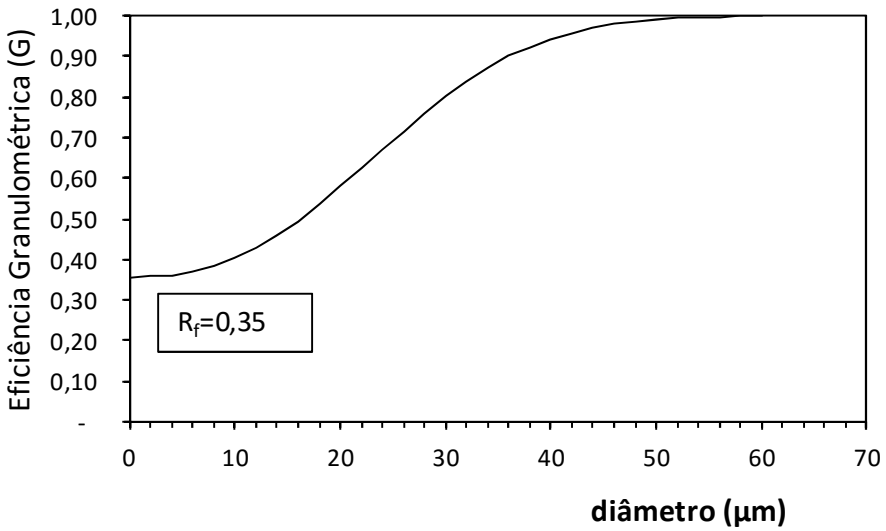


Figura 4 – Exemplo de curva de eficiência granulométrica com R_f = 0,35.

2.2.4. Eficiência Granulométrica Reduzida (G')

A eficiência granulométrica reduzida (Equação 5) considera apenas a quantidade de óleo que sai do equipamento pelo efeito da separação centrífuga. Descontando, com isso, a quantidade retirada apenas pelo efeito de divisão de correntes. Ou seja, mesmo que o hidrociclone não esteja separando haverá sempre uma eficiência G igual à R_f.

$$G' = \frac{G - R_f}{1 - R_f} \tag{5}$$

A Figura 5 mostra a curva de G', que inicia sempre na origem, e o diâmetro da partícula cuja eficiência granulométrica reduzida é igual a 0,5 (50%), comumente chamado de diâmetro de corte reduzido. Plitt (1971) propôs a equação 6 para descrever o comportamento de G' em função do diâmetro.

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

Em que,

G'= Eficiência granulométrica reduzida;

d'_{50}= diâmetro de corte reduzido;

n= parâmetro do modelo.

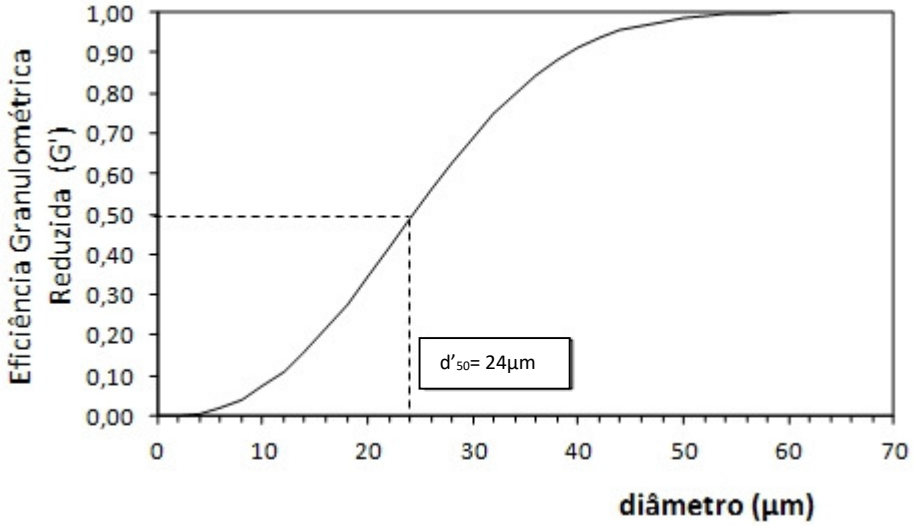


Figura 5 – Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida, com um diâmetro de corte reduzido de 24 µm.

O valor do d'50 é obtido através da curva de eficiência granulométrica reduzida, conforme a Figura 5. Já o parâmetro n é obtido através da linearização da equação 6.

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

2.2.5. Eficiência Total ou Global (ET)

A eficiência total é obtida pela razão entre as vazões mássicas da fase dispersa no concentrado e na alimentação. Esta eficiência leva em consideração todos os diâmetros contidos na distribuição de tamanhos da alimentação**.**

$$E_T = \frac{W_o}{W_e} \tag{8}$$

Em que,

E_T = Eficiência total;

W_o= Vazão mássica de óleo no *overflow*;

W_e = Vazão mássica de óleo na entrada.

2.2.6. Eficiência Total Reduzida (E'T)

Pode-se calcular a eficiência total reduzida de duas formas diferentes. A primeira é semelhante ao cálculo de G', ou seja, desconta-se o valor da R_f.

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \tag{9}$$

Já a segunda forma é obtida através da integração da curva de eficiência granulométrica reduzida. Desta forma, através da equação 11 temos uma expressão possível de ser integrada utilizando um método de integração numérica.

$$E'_T = \int_0^1 G'\,dy \tag{10}$$

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

2.3. Planejamento de Experimentos

Para realizar qualquer trabalho experimental, é necessário saber quais são as variáveis que influenciam nos experimentos, quantos experimentos são necessários para fazer o estudo e como obter um ponto ótimo (valor de máximo ou mínimo) de um resultado ou combinação de resultados experimentais.

Caso haja um número pequeno de variáveis e os experimentos forem rápidos e de baixo custo, é possível fazer todas as combinações possíveis de variáveis e analisar as respostas obtidas. Porém, na maioria dos casos, os experimentos apresentam um custo significativo o que torna importante realizar-se um número menor de experimentos, porém que consiga descrever bem o comportamento das variáveis envolvidas, apresentando uma boa previsão dos resultados.

A fim de se obter um número menor de experimentos para analisar diversos fatores que podem ou não influenciar os experimentos, é necessário utilizar a técnica de planejamento de experimentos.

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

Em um primeiro momento deve ser feito um plano estratégico para coordenar as atividades do procedimento dos experimentos que serão realizados, definindo claramente cada passo do processo experimental. (Galdámez 2002) estabelece a sequência das atividades necessárias para o processo de experimentação, nos tópicos a seguir:

- Definição dos objetivos do experimento
- Estudo dos parâmetros do experimento
- Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta

- Seleção da matriz experimental
- Realização do experimento
- Análise de dados
- Interpretação dos resultados
- Elaboração de relatórios.

Os princípios básicos para um bom planejamento são replicação, aleatoriedade e blocagem (Calado e Montgomery 2003). A replicação se refere a obtenção do erro experimental, ou seja, quanto menor for o erro experimental maior será a reprodutibilidade dos experimentos aumentando assim o grau de confiança nos dados obtidos.

A aleatoriedade é importante porque os experimentos devem ser realizados de forma aleatória para garantir a não tendenciosidade nos resultados. A blocagem é importante devido ao aumento da precisão de um experimento, pela eliminação de ruídos. (Calado e Montgomery 2003).

As técnicas mais utilizadas para planejar os experimentos são:

- Planejamento Fatorial;
- Planejamento Fatorial Fracionário;
- Planejamento Composto Central;

2.3.1. Planejamento Fatorial

Uma técnica muito útil para planejar experimentos é a técnica de planejamento fatorial de experimentos, bastante utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes (fatores). Permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis (valores máximos e mínimos definidos para as variáveis independentes), obtendo-se assim uma análise de uma variável sujeita a todas as combinações das demais.

Planejamentos fatoriais são extremamente úteis para medir os efeitos (ou influências) de uma ou mais variáveis na resposta de um processo. O usual é realizar um planejamento com dois níveis ou, no máximo, três, pois mais níveis não agregam valor aos experimentos e aumenta o trabalho. O planejamento fatorial é a única maneira de se prever interação entre os fatores (Calado e Montgomery 2003).

A equação a seguir indica o número de experimentos que necessitam ser realizados por esta técnica.

$$N = a^k \tag{12}$$

Em que,

N = Número de experimentos que precisam ser realizados;

a = Níveis do planejamento;

k = número de factores.

A fim de verificar se um fator é estatisticamente significativo, é necessário calcular o p-valor ou probabilidade de significância do teste, que é a probabilidade de ocorrência de valores da variável (dependente) do teste mais extremos que o obtido através dessa amostra. Assim, a decisão pode ser feita em termos deste valor se rejeita ou não a hipótese nula (do fator não ser significativo), conforme o valor seja menor ou não que o nível de significância (α) estabelecido (Rodrigues e Iemma 2009).

Há disponível no mercado diversos pacotes computacionais para os cálculos de planejamento de experimentos, como o *Statistica*© e o *Minitab*©.

2.3.2. Planejamento Fatorial Fracionário

Um número de fatores muito grande acarreta um número elevado de experimentos, o que pode tornar inviável o planejamento fatorial convencional, com isso é possível utilizar a técnica de planejamento fatorial fracionário que, se bem utilizada, pode gerar importantes informações sobre a influência dos fatores com base em um número reduzido de experimentos.

A equação a seguir mostra como obter o número de experimentos necessário para esse tipo de planejamento:

$$N = a^{k-p} \tag{13}$$

Em que,

p = Número de meias frações.

Ao se estimarem os efeitos principais dos fatores, se está na verdade estimando a soma de cada um deles com os respectivos efeitos de terceira ordem (efeitos de combinação dos fatores). Isto significa que o valor do efeito principal calculado pelo planejamento fracionário, é igual à soma do efeito principal de um fator com o efeito de interação de terceira ordem dos demais fatores, calculados pelo planejamento completo (Calado e Montgomery 2003).

Com isso, pode-se considerar que alguns efeitos de interação são desprezíveis frente aos efeitos principais dos fatores, simplificando assim consideravelmente o planejamento. Porém, em alguns casos, os efeitos de interação dos fatores podem ser estatisticamente significativos gerando assim um planejamento fatorial pouco preciso, o que pode ser verificado quando o erro puro calculado no planejamento fracionado tiver um p-valor menor que o nível de significância (α) estabelecido.

2.3.3. Planejamento Composto Central

A análise da superfície de resposta é bem importante para o planejamento de experimentos. A superfície pode ser obtida por um modelo de primeira (Equação 14) ou segunda ordem (Equação 15). Quando não houver curvatura no sistema, o modelo de primeira ordem descreve bem o sistema.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \tag{14}$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} {x_j}^2 + \varepsilon \tag{15}$$

Em que,

Y = Resposta ou variável independente;

β = Parâmetros da equação;

x = fator;

ε = erro.

Se a curvatura for importante, os valores independentes dos parâmetros dos termos quadráticos devem ser determinados, necessitando-se portanto de mais pontos. A solução para isso é aumentar o planejamento com quatro corridas axiais, resultando em um planejamento chamado de composto central (Calado e Montgomery 2003). Esse tipo de planejamento consiste

de uma parte referente ao planejamento fatorial a^k, com N experimentos acrescido com $2k$ corridas axiais e corridas centrais.

Box e Hunter (1978, apud (Rodrigues e Iemma 2009)) afirmaram que uma superfície de resposta de segunda ordem deve ser rotacionável. Isso significa que a variância do valor previsto para a resposta é a mesma em todos os pontos das variáveis independentes que estejam à mesma distância do centro do planejamento.

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

Como o modelo de segunda ordem apresenta curvatura, podem existir pontos de máximo, mínimo ou pontos de cela na superfície de resposta, permitindo com isso fazer otimização das variáveis envolvidas utilizando o planejamento composto central.

2.4. Fluidodinâmica Computacional

Para descrever um sistema, um equipamento ou processo em engenharia, é necessário utilizar uma modelagem matemática para prever os eventos do sistema de acordo com os fenômenos envolvidos. Na grande maioria dos casos, a solução analítica dessa modelagem é muito complexa ou impossível, sendo necessário obter-se uma solução numérica aproximada.

Com o desenvolvimento dos métodos numéricos de solução de equações e sistemas de equações, tornou-se possível descrever com boa precisão muitos sistemas complexos de engenharia como, por exemplo, escoamentos tridimensional, turbulento e em regime transiente, dentre outros.

Casos de fenômenos de transporte de calor, massa e quantidade de movimento possuem equacionamento complexo que, em geral, não possuem solução analítica, sendo necessário desenvolver técnicas computacionais de soluções numéricas para resolvê-las.

A Figura 6 mostra métodos de solução de um problema de fenômenos de transporte, onde existe um problema físico que pode ser descrito através de testes experimentais ou utilizando modelos matemáticos teóricos. A solução destes modelos pode ser realizada utilizando solução analítica ou aproximada utilizando métodos numéricos, sendo que, não importando qual seja o método utilizado, a resposta deve ser sempre muito próxima uma das outras (Maliska 2004).

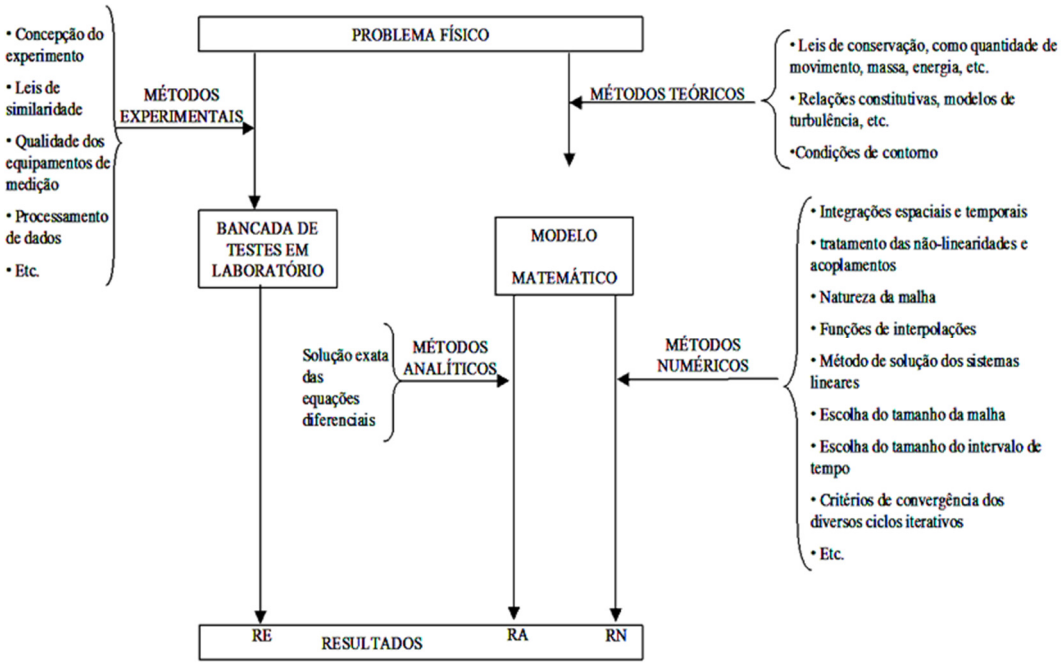


Figura 6 – Métodos de solução de um problema de fenômenos de transporte (Maliska 2004).

Em uma solução numérica, a abordagem acontece de acordo com a Figura 7. Aborda-se o problema físico utilizando uma modelagem matemática, gerando as equações governantes; discretizam-se estas equações transformando-as em um sistema de equações algébricas e, finalmente, se resolve estas equações em alguns pontos do domínio. Com isso, obtém-se uma solução aproximada que deve ser analisada e interpretada e, se necessário, ajusta-se a modelagem.

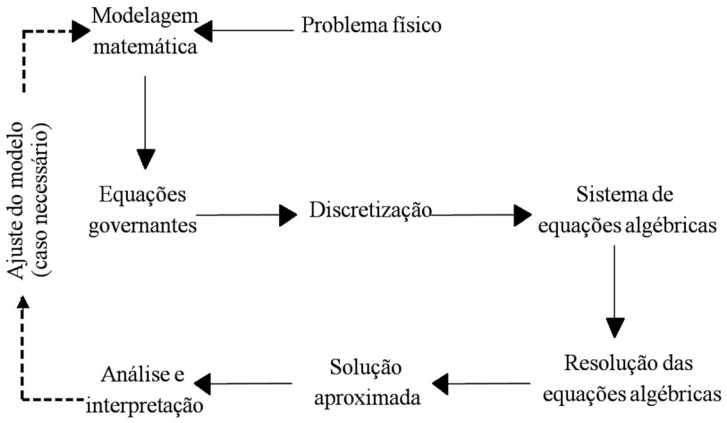


Figura 7 – Esquema de uma solução de um problema físico utilizando métodos numéricos (Maliska 2004).

Em uma solução analítica, a solução é obtida para todo o domínio da modelagem, porém, na solução numérica, a solução é obtida em alguns pontos do domínio (Figura 8). Para se

calcular os outros valores no domínio, geralmente, se faz uma interpolação dos dados obtidos, o que pode ser uma grande fonte de erro.

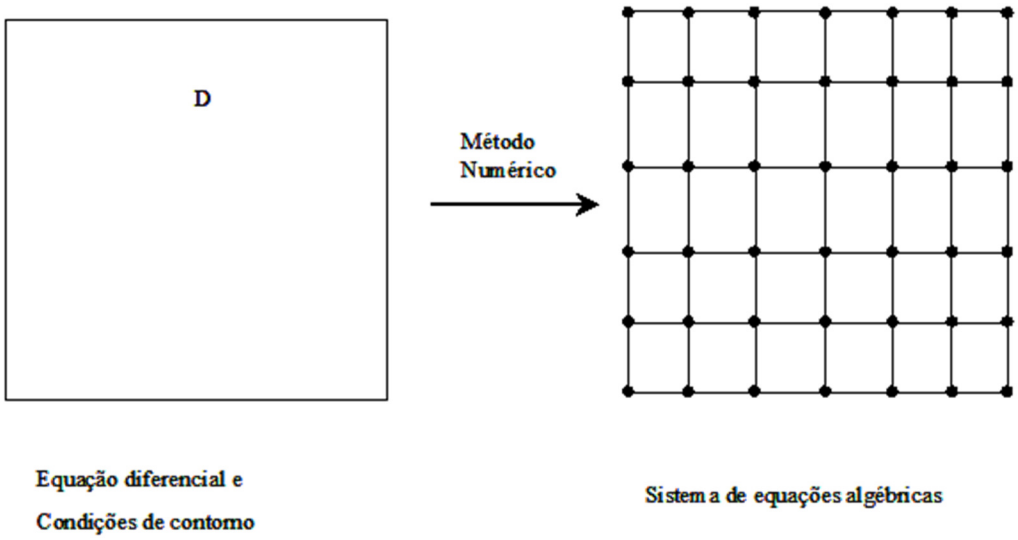


Figura 8 – Discretização no domínio (Maliska 2004).

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

É possível simular escoamentos que não podem ser facilmente medidos ou simulados experimentalmente, tais como:

- Escoamento no interior de ciclones e hidrociclones;
- Vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis em ambientes confinados ou abertos;
- Explosões;
- Combustão;
- Escoamentos em reservatórios de petróleo, em risers, em biorreatores e ao redor de carros, aviões ou foguetes;
- Previsão do tempo.

Com uma maior facilidade em simular situações complexas, o uso desta técnica combinada com dados experimentais que garantem confiabilidade nas simulações, apresenta vantagens,

pois provoca **r**edução de custos e de tempo quando comparada com atividades experimentais equivalentes.

Existe no mercado diversos pacotes computacionais de *CFD*, como *Phoenics, OpenFoam, Comsol, star ccm, Ansys CFX e Ansys Fluent.* Cada um possui características próprias com vantagens e desvantagens dependendo do custo e do problema a ser resolvido. Os mais utilizados são *Ansys CFX* e *Ansys Fluent* devido a uma melhor interface gráfica, o que facilita o seu emprego. Estes últimos foram utilizados no presente trabalho.

Independente do pacote computacional utilizado, as simulações precisam seguir algumas etapas:

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

Na simulação numérica, entende-se por geometria todo o volume de controle onde serão efetuados os cálculos, por exemplo, a fim de simular água escoando em um tubo, deve-se construir a geometria de um cilindro (que é o formado do volume de água no escoamento).

Gerar a malha é dividir o domínio (geometria) em partes menores onde que serão efetuados os cálculos da solução numérica. A geração da malha é uma etapa delicada e crucial na simulação, pois uma malha de baixa qualidade pode gerar resultados pouco precisos e malha refinada demais pode exigir um esforço computacional alto demais.

A malha normalmente é gerada utilizando elementos triangulares ou quadriláteros quando se tem uma geometria bidimensional (Figura 9) ou tetraedros ou hexaedros quando se optou por uma geometria tridimensional.

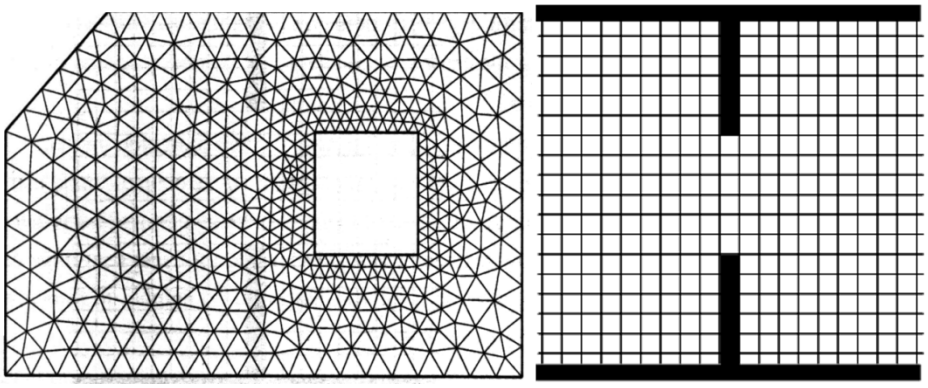


Figura 9 – Elementos triangulares (esquerda) e Elementos quadriláteros (direita).

A malha pode ser definida como estruturada ou não estruturada, para a malha ser estruturada, a numeração dos volumes (ou elementos) deve seguir uma estrutura fixa de forma que o número de cada volume seja consecutivo ao seu vizinho. Um exemplo disso está na figura a seguir. Os números em vermelho representam a numeração dos elementos para indexação da malha.

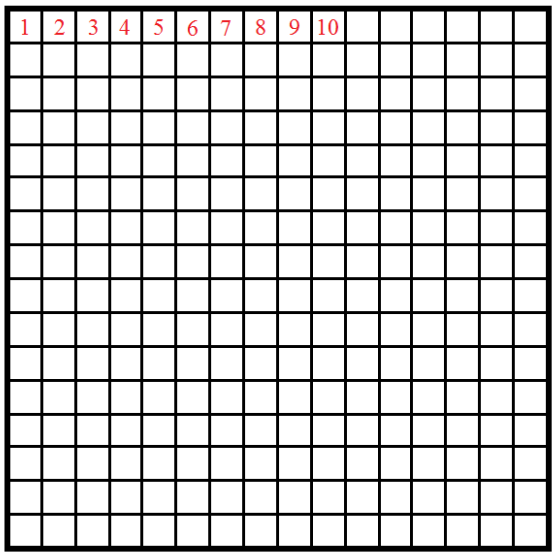


Figura 10 – Malha estruturada.

A primeira camada de volumes está numerada consecutivamente e assim por diante para as camadas (na direção radial) mais internas. Dessa forma todos os vizinhos de cada volume são conhecidos e obtidos de uma forma bem simples (Maliska 2004).

As principais vantagens da malha estruturada são facilitar o cálculo das equações de balanços, diminuir o número de acessos e a quantidade de memória necessária para a simulação (Aguirre e Damian 2008).

A Figura 11 mostra uma malha quadrilátera não estruturada, a diferença das duas é na organização dos elementos, pode-se perceber que dessa forma, não tem como prever qual elemento é o vizinho. Com isso faz-se necessário ter na memória, matrizes (ou vetores) para indicar a posição de cada elemento na malha. Isso é uma desvantagem, já que a memória deve ser acessada várias vezes apenas para saber a posição dos elementos o que torna a programação do simulador mais complexa.

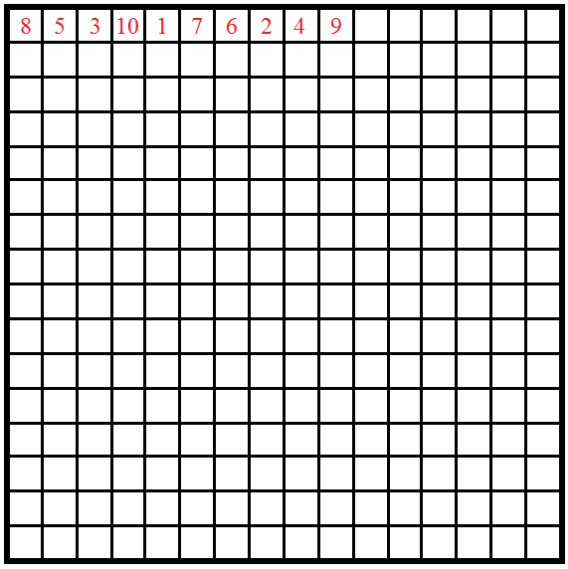


Figura 11 – Malha não estruturada.

Após a construção da malha, é necessária a definição da simulação, das condições iniciais e de contorno, das propriedades físicas e químicas dos materiais envolvidos, definir a modelagem do sistema, escolher modelos de turbulência etc.

As equações 16 e 17 mostram as equações da continuidade e do movimento desenvolvidas a partir do balanço de massa e forças, respectivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0 \tag{16}$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\vec{\nabla} P - \vec{\nabla}.\vec{\vec{\tau}} + \rho \vec{g} \tag{17}$$

A equação do movimento é obtida por um balanço de forças por unidade de volume, sendo $\rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$ a força de inércia por unidade de volume, $\vec{\nabla} P$ o Gradiente de Pressão, $\rho \vec{g}$ as forças de campo envolvidas e $\vec{\nabla}.\vec{\vec{\tau}}$ o divergente do tensor tensão (Bird, Stewart e Lightfoot 2004).

2.5. Turbulência

Em mecânica dos fluidos, designa-se por escoamento turbulento o escoamento de um fluido em que os elementos de fluido se misturam de forma não linear, isto é, de forma caótica

em 3 dimensões formando vórtices, em contraste com o escoamento laminar. O escoamento turbulento é um processo intrinsicamente transiente (Bird, Stewart e Lightfoot 2004). A Figura 12 mostra alguns exemplos de escoamentos turbulentos.

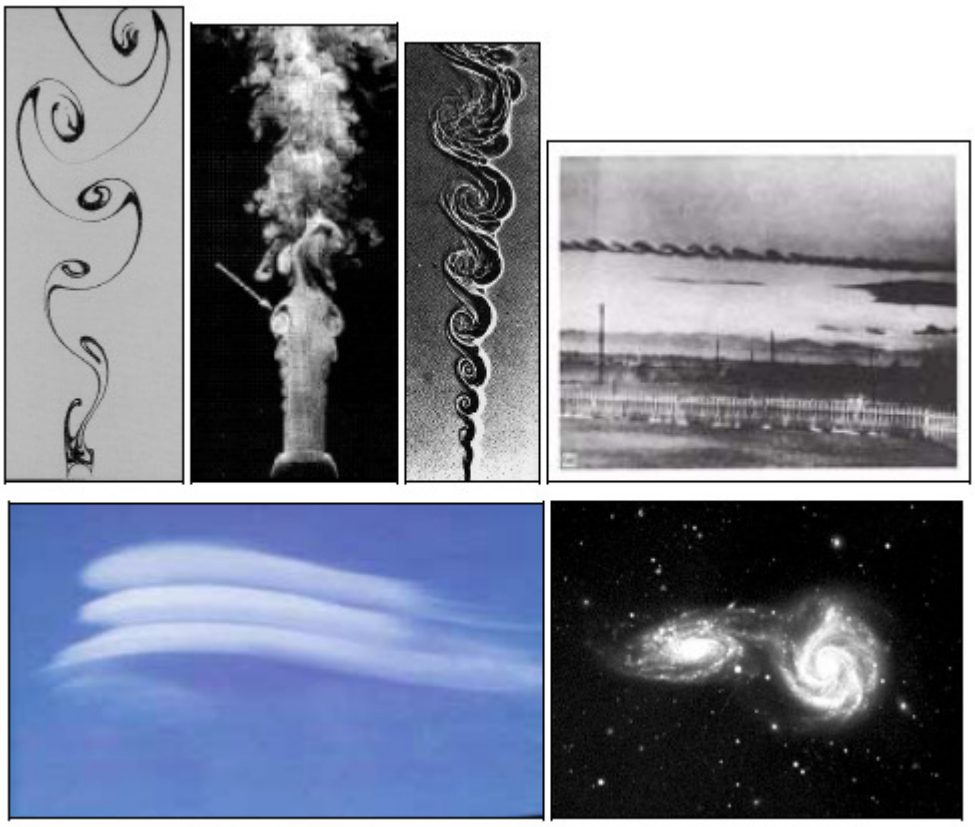


Figura 12 – Exemplos de escoamentos turbulentos.

As equações de conservação podem descrever escoamentos em qualquer regime. Entretanto, em regimes turbulentos, as flutuações de velocidade, pressão e densidade exigem, para a solução numérica de problemas de interesse na engenharia, malhas hiper-refinadas tornando inviável a solução destas equações dada a capacidade computacional disponível nos dias atuais. Para contornar este problema, toma-se a média temporal destas equações, gerando o conhecido problema de fechamento da turbulência (Wilcox 1998), já que a equação da continuidade mais as três equações de Reynolds (equações 18,19,20 e 21) somam 4 equações, existindo, porém, 10 incógnitas ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}\ e\ \tau_{ij}$) tornando o problema indeterminado.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \bar{u}) = 0 \tag{18}$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u})}{\partial t} + div(\rho \bar{u} \bar{u}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + div(\mu\ grad\ \bar{u}) + \left[-\frac{\partial (\rho \overline{u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial (\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \tag{19}$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + div(\rho\bar{v}\bar{v}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + div(\mu\ grad\ \bar{v}) + \left[-\frac{\partial(\rho\overline{v'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\overline{v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\overline{v'w'})}{\partial z}\right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + div(\rho\bar{w}\bar{w}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + div(\mu\ grad\ \bar{w}) + \left[-\frac{\partial(\rho\overline{w'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\overline{w'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\overline{w'^2})}{\partial z}\right] \quad (21)$$

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

O fechamento passa por estabelecer uma relação entre as tensões de Reynolds (ou tensões turbulentas) e o campo médio de velocidades, de forma a tornar o número de equações idêntico ao número de incógnitas. Encontram-se abaixo as equações médias da continuidade, e de Navier Stokes para as três componentes de velocidade nas coordenadas cartesianas.

Boussinesq (1877) propôs fechar o sistema de equações, modelando o tensor de Reynolds com o conceito de viscosidade turbulenta, estabelecendo uma analogia com a lei da viscosidade de Newton para as tensões viscosas no regime laminar de acordo com a equação 22. O seguinte modelo de fechamento para o tensor de Reynolds foi proposto conforme mostrado nas equações 23 e 24:

$$\tau_{ij}^{Lam} = -\mu(grad\ \bar{u}) \quad (22)$$

$$\tau_{ij} = \nu_t\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \quad (23)$$

e

$$k = \frac{1}{2}\left(\overline{u_i'u_j'}\right) = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right) \quad (24)$$

Em que *k* é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, δ_{ij} é o delta de Kronecker, ν_t é a viscosidade cinemática turbulenta.

Ressalta-se que a viscosidade turbulenta é uma propriedade do escoamento e não do fluido. Esta característica implica na dificuldade de avaliação desta propriedade uma vez que ela depende da natureza do próprio escoamento, constituindo-se numa forte não linearidade na solução das equações sendo ainda propriedade que depende do espaço e do tempo (Wilcox 1998).

Para resolver então o problema de turbulência, são necessárias equações adicionais de transporte. Quando se utiliza apenas uma equação diferencial parcial de transporte adicional,

diz-se que se está utilizando modelo de turbulência de uma equação, quando se usam duas, diz-se que se está utilizando um modelo de duas equações, como o modelo k-ε.

2.5.1. Modelo k-ε

Este modelo visa utilizar equações de transporte que possam inferir velocidade turbulenta e escalas de comprimento de turbilhão para serem aplicadas no conceito de viscosidade turbulenta, constituindo um nível fisicamente aceitável de fechamento da equação de continuidade.

Modelos de turbulência a duas equações foram utilizados como base para muitas pesquisas durante as últimas duas décadas. Estes modelos são usados não apenas para prever os valores de *k,* mas também para o comprimento da escala turbulência. Os modelos de duas equações são ditos completos, pois podem prever as propriedades de um escoamento turbulento sem necessitar de conhecimento prévio da estrutura da turbulência. Estes modelos são, de fato, os modelos completos mais simples que modelam a turbulência (Wilcox 1998).

Para definir o modelo k-ε, é preciso definir a viscosidade turbulenta de acordo com a equação 25. A taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε) precisa ser definida, sendo necessário adicionar uma equação, a equação 26, que é uma correlação para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε).

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{25}$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \tag{26}$$

A partir da definição da energia cinética turbulenta (equação 24), pode-se obter uma equação de transporte para a mesma conforme mostrado na equação 27 a seguir:

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{27}$$

Em que o termo P_ké definido como produção turbulenta:

$$P_k = -\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{28}$$

Para a taxa de dissipação de energia cinética, Launder e Sharma (1974) propuseram a equação de transporte mostrada a seguir:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = c_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_k - c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{29}$$

Pode-se reparar que nas equações de energia cinética turbulenta e na taxa de dissipação de energia cinética, há a presença de 5 constantes que precisam ser determinadas (σ_ε, C_μ, $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$ e σ_k). Launder e Sharma (1974) determinaram os valores em um escoamento próximo de um disco giratório que são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 1: Constantes do modelo de Turbulência k-ε.

Constante	**Valor**
$c_{\varepsilon 1}$	1,44
$c_{\varepsilon 2}$	1,92
C_μ	0,09
σ_ε	1,3
σ_k	1

Embora os modelos de turbulência baseados no conceito de viscosidade turbulenta tenham alcançado sucesso na solução de diversas categorias de escoamentos, algumas deficiências são ainda encontradas, geralmente associadas a situações onde a hipótese de Boussinesq falha, como, por exemplo, no caso de escoamentos com linhas de corrente curvas. (Wilcox 1998).

Para resolver o problema da turbulência sem utilizar o conceito de viscosidade turbulenta, pode-se deduzir equações de transporte diretamente para cada componente das tensões de Reynolds.

2.5.2. Modelos de Tensores de Reynolds

Utilizando-se de um procedimento similar àquele utilizado para obter as equações da energia cinética turbulenta e para sua dissipação viscosa, pode-se obter um conjunto de seis equações para as componentes do tensor de Reynolds. Em notação tensorial, elas são escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_l}\left(\bar{u}_l \tau_{ij}\right) = P_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + D_{ij} \tag{30}$$

Esta equação é composta de todos os termos clássicos de uma equação de transporte, onde o segundo membro representa: termos de produção P_{ij}, de difusão ϕ_{ij}, de dissipação ε_{ij} e termo de redistribuição de energia D_{ij} da variável conservada (τ_{ij}).

Este tipo de modelo é muito mais geral que o precedente, com boa confiabilidade, porém é necessário calcular sete equações de transporte adicionais (seis para os componentes do tensor tensão turbulento e outra para a energia cinética turbulenta), ao invés de duas no modelo k-ε, o que gera um esforço computacional bem maior para resolver uma simulação.

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram as principais vantagens e desvantagens para a utilização dos modelos k-ε e das Tensões de Reynolds.

O pacote computacional da *Ansys*©, possui dois *softwares* de fluidodinâmica computacional, conforme é mais bem abordado no capítulo 4, que são o *Fluent* e o *CFX*. Os dois programas utilizam diferentes modelos de turbulência de tensores de Reynolds, o modelo de Gibson e Launder (1978) (Ansys Fluent 15.0 2013) e o modelo SSG (Ansys CFX 15.0 2013).

Tabela 2: Vantagens e desvantagens do modelo de turbulência k-ε (Aguirre e Damian 2008).

Vantagens	**Desvantagens**
Um modelo simples de turbulência para o qual as condições iniciais e de contorno devem ser fornecidas para a solução.	Baixa performance em escoamentos com altos valores de tensão extra (camada limite com curvas).
Excelente desempenho em muitos escoamentos industriais relevantes.	Baixa performance em escoamentos não confinados.
Boa estabilidade. O modelo de turbulência mais extensamente validado.	Baixa performance em escoamentos rotacionais.
	Baixa performance em escoamentos plenamente desenvolvidos em dutos não-circulares.

Tabela 3: Vantagens e desvantagens do modelo de turbulência das tensões de Reynolds (Aguirre e Damian 2008).

Vantagens	Desvantagens
O modelo de turbulência mais geral de todos os modelos clássicos.	Alto custo computacional.
Possui um cálculo muito acurado para as propriedades médias do escoamento e para todos os componentes do Tensor de Reynolds. Assim, apresenta boas soluções para escoamentos simples e complexos.	Apresenta uma performance tão pouco eficiente quanto o modelo k-ε para alguns escoamentos, como jatos assimétricos ou escoamentos não-confinados com recirculação.
É capaz de descrever escoamentos com alto grau de vorticidade (Wang e Yu 2006).	

2.5.2.1. Modelo de Gibson e Launder

Gibson e Launder (1978) propuseram um modelo de tensores de Reynols (equação 31) para a turbulência. Em que P_{ij} é a taxa de produção dos tensores de Reynolds, conforme expressado na equação 32. O segundo termo representa a dissipação para escoamentos em altos números de Reynolds onde é assumido que a isotropia local não é constante (Launder e Sharma 1974).

$$\frac{\partial \rho \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_l}\left(\rho \bar{u}_l \tau_{ij}\right) = \rho P_{ij} - \rho \frac{2}{3}\varepsilon \delta_{ij} + \rho \Phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\left(\mu + \rho c_s \frac{k}{\varepsilon}\overline{u_k u_l}\right)\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial xl}\right] \quad (31)$$

$$P_{ij} = -\left(\overline{u_i' u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right) \quad (32)$$

O termo de redistribuição Φ_{ij} representa uma correlação entre as flutuações de pressão e velocidade. Esse termo não contribui para o nível global da energia turbulenta, servindo apenas como um agente de redistribuição da energia entre os componentes normais da tensão de Reynolds (Freire, Ilha e Colaço 2006). O termo Φ_{ij} é expressado como a soma de quatro termos: uma interação entre os componentes de flutuação da velocidade ($\emptyset_{ij,1}$), umas interação entre os componentes de flutuação da velocidade e o escoamento principal através de uma relação linear com os gradientes de velocidade médias ($\emptyset_{ij,2}$) e dois termos de reflexão da parede ($\emptyset_{ij,w1}$ e $\emptyset_{ij,w2}$).

$$\Phi_{ij} = \emptyset_{ij,1} + \emptyset_{ij,2} + \emptyset_{ij,w1} + \emptyset_{ij,w2} \tag{33}$$

Em que:

$$\emptyset_{ij,1} = -\, c_1 \frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3}\delta_{ijk}\right) \tag{34}$$

$$\emptyset_{ij,2} = -\, c_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij} P_k\right) \tag{35}$$

$$\emptyset_{ij,w1} = -\, C_1' \frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_k' u_m'} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2}\overline{u_k' u_i'} n_k n_j - \frac{3}{2}\overline{u_k' u_j'} n_k n_i\right) F \tag{36}$$

$$\emptyset_{ij,w2} = -\, C_2' \left(\emptyset_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2}\emptyset_{ik,2} n_k n_i - \frac{3}{2}\emptyset_{jk,2} n_k n_i\right) F \tag{37}$$

$$F = \frac{k^{3/2}}{2{,}5 y \varepsilon} \tag{38}$$

Em que n_m é componente do vetor unitário normal à parede na direção m e y. F é a distância normal à parede.

O modelo de Gibson e Launder (1978) requer a utilização da equação para a taxa de dissipação de energia cinética conforme mostra a equação 39.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\left(\mu + \rho c_\varepsilon \frac{k}{\varepsilon}\overline{u_k u_l}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right] - c_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_k - c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{39}$$

A Tabela 4 mostra os valores das constantes do modelo de Gibson e Launder (1978):

Tabela 4: Constantes do modelo de Turbulência de Gibson e Launder.

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

2.5.2.2. Modelo de Speziale, Sarkar e Gatski

O modelo de Speziale, Sarkar e Gatski (SSG) é um modelo de tensores de Reynolds em que a forma geral da equação de transporte dos componentes dos tensores e da taxa de

dissipação de energia cinética é igual a do modelo de Gibson e Launder (equação 31 e 39). A diferença é na expressão do termo Φ_{ij}, em que resulta em uma formulação não-linear conforme as equações a seguir: (Speziale, Sarkar e Gatski 1991).

$$\Phi_{ij} = -\left(C_1 + C_1^* \frac{\mathcal{P}}{\varepsilon}\right) b_{ij} + C_2 \varepsilon \left(b_{ik} b_{kj} - \frac{1}{3} b_{mn} b_{mn} \delta_{ij}\right) + \left(C_3 - C_3^* \sqrt{A}\right) k s_{ij}$$
$$C_4 k \left(b_{ik} s_{jk} + b_{jk} s_{ik} - \tfrac{2}{3} b_{mn} s_{mn} \delta_{ij}\right) + C_5 k \left(b_{ik} w_{jk} + b_{jk} w_{ik}\right) \quad (40)$$

Em que $A = b_{ij} b_{ij}$ representa invariante do tensor da anisotropia, s_{ij} representa o tensor de tensões médios e w_{ij} é o tensor de rotação absoluta.

$$s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (41)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (42)$$

A Tabela 5 mostra os valores das consntantes do modelo SSG:

Tabela 5: Constantes do modelo de Turbulência SSG (Speziale, Sarkar e Gatski 1991).

Constante	**Valor**
$c_{\varepsilon 1}$	1,44
$c_{\varepsilon 2}$	1,83
C_ε	0,18
C_s	0,22
C_1	3,4
C_2	4,2
C_3	0,8
C_4	1,25
C_5	0,4
C_1^*	1,8
C_3^*	1,3

2.6. Escoamentos Multifásicos

As equações da continuidade e movimento mostradas previamente são utilizadas para o escoamento monofásico de qualquer tipo de fluido. Porém, neste trabalho e em muitos casos de processos industriais ocorre o escoamento de mais de uma fase. Neste caso, nas equações da continuidade e movimento (equações 43 e 44 respectivamente) são introduzidas a fração volumétrica de cada fase (α_q) e o índice q nas variáveis de escoamento para indicar as propriedades de cada fase, a fim de caracterizar o escoamento multifásico (Liu, et al. 2012).

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q\right) + \vec{\nabla}\cdot\left(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{u_q}\right) = 0 \tag{43}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{u_q}\right) + \vec{\nabla}\cdot\left(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{u_q}\overrightarrow{u_q}\right) = -\alpha_q \vec{\nabla} p + \vec{\nabla}\cdot\overrightarrow{\overrightarrow{\tau_q}} + \alpha_q \rho_q g + \sum_{p=1}^{n} K_{pq}\left(\overrightarrow{u_p} - \overrightarrow{u_q}\right) + \alpha_q \rho_q \left(F_q + F_{lift,q} + F_{Vm,q}\right) \tag{44}$$

Pode-se observar que na equação do movimento são introduzidos termos de interações entre as fases de modo a descrever melhor o escoamento em ambas as fases.

Na fluidodinâmica computacional, é muito utilizada a abordagem Euleriana no escoamento multifásico. A mesma consiste no estabelecimento de equações que determinam a velocidade e as grandezas características correspondentes às partículas de fluido em cada ponto do escoamento, tendo como parâmetro, o tempo.

Na abordagem Euleriana, a dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial parcial para a conservação da massa da substância considerada, sendo resolvida em uma malha fixa no espaço. Ela fornece valores médios de concentração, para as partículas consideradas, em um ponto no espaço. A partir das equações de conservação, é possível obter um modelo matemático da dispersão de uma fonte, dadas as apropriadas condições iniciais e de contorno (Ramirez 2009).

Em escoamentos multifásicos utilizando a abordagem Euleriana, todas as fases são resolvidas como contínuas, sendo as equações médias de conservação de massa, momento e energia, resolvidas para todas as fases (Schütz, Gorbach e Piesche 2009).

A abordagem Euleriana-Euleriana pôde ser encontrada nos trabalhos de Liu et al. (2012), Swain & Mohanty (2012) e Slack et al. (2004). Sendo amplamente utilizada em simulações de escoamentos multifásicos.

2.7. Velocimetria por Imagem de Partículas e Velocimetria por Laser Doppler

A fim de medir experimentalmente o perfil de velocidades, é comum utilizar técnicas de Velocimetria, como Velocimetria por Imagem de partículas (PIV, abreviação do inglês de "*Particle Image Velocimetry*") e velocimetria, ou anemometria, por Laser Doppler (LDV, abreviação do inglês de Laser Doppler *Velocimetry*). Os trabalhos de Husveg *et al.* (2007), Liu *et al.* (2012) e Marins (2007) podem ser citados como exemplos de trabalhos que utilizaram a velocimetria para medir perfis de velocidade em hidrociclones.

Para medir velocidade de escoamento de um fluido utilizando a técnica *LDV*, é necessário ter um protótipo transparente, normalmente feito de acrílico, um emissor de um feixe de laser, um equipamento composto de um prisma e espelhos chamado de BSA que divide o feixe em dois feixes concorrentes e um receptor do laser (BSA Flow Software Version 4 2005).

O funcionamento é relativamente simples. É necessário que os dois feixes do laser se encontrem dentro do equipamento na posição em que se deseja medir a velocidade. No momento em que uma partícula passa por esse ponto de encontro dos feixes, gera uma interferência que é medida pelo receptor do laser e interpretada no computador. Conhecendo-se o tempo em que essa interferência ocorre, pode-se calcular a velocidade naquele ponto.

Com isso pode-se variar a posição de encontro dos raios e medir a velocidade em outra posição distinta, formando assim um perfil de velocidades pontuais. Esta técnica é muito interessante, pois permite calcular a flutuação da velocidade e alguns parâmetros importantes para o estudo da turbulência.

É importante observar que no hidrociclone esta técnica possui uma dificuldade para efetuar a medição, pois o equipamento possui uma região cônica, o que dificulta a utilização de LDV, já que a refração causada pelo acrílico do hidrociclone dificulta saber a posição exata onde está sendo efetuada a medição.

A técnica *PIV* é muito semelhante à *LDV*. Ela consiste em medir-se a velocidade de partículas marcadas através da quantificação do deslocamento dessas partículas, dentro do equipamento, no intervalo de tempo entre dois pulsos de laser. Enquanto o *LDV* emite dois feixes de lasers concorrentes, no *PIV*, é gerado um plano de luz por onde as partículas atravessam e são captadas por câmeras (Figura 13).

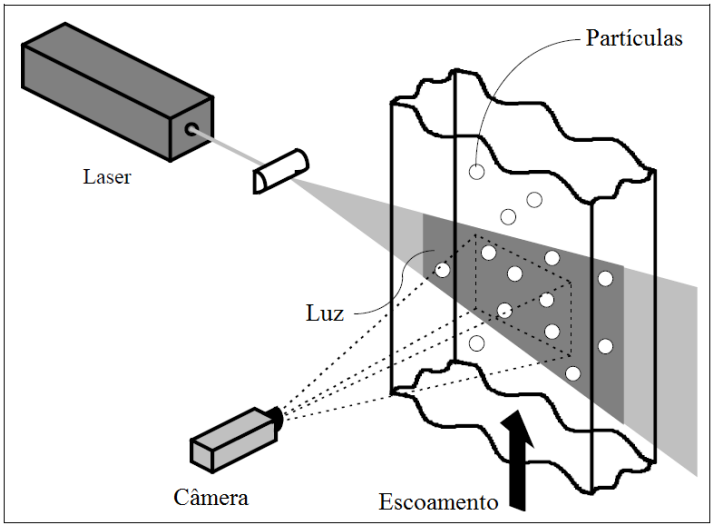


Figura 13 – Exemplos de medição utilizando PIV (adaptado do guia do usuário (FlowManager Software 2000)).

Com as câmeras são tiradas 2 fotos consecutivas em sincronia com os pulsos dos feixes de luz emitidos. As imagens são então processadas através de um programa de computador específico, que calcula os deslocamentos das partículas nas duas imagens.

Atualmente, existem aparatos onde é possível medir o campo de velocidades de fases líquida e gasosa. Quando esta técnica é aplicada ao estudo de escoamento de bolhas, essa é também conhecida como *bubble image velocimetry* (BIV). A mesma também pode ser adaptada para medir, além de distribuições de velocidade, distribuições de fração volumétrica de gás.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi dividido em duas partes, a primeira parte refere-se às simulações numéricas e a outra parte refere-se ao trabalho experimental. De forma a organizar melhor o presente texto, estas duas partes são apresentadas separadamente neste item.

3.1. Simulações Numéricas

As simulações numéricas são feitas a partir das etapas de geração da geometria, geração da malha, definição da simulação, solução das equações definidas no problema e análise dos resultados.

3.1.1. Geração da Geometria

A geometria base do hidrociclone estudado é uma modificação do hidrociclone típico de Colman e Thew (1980). No equipamento típico, haviam duas sessões cônicas com diferentes ângulos, todavia neste estudo foi utilizada apenas uma seção cônica mantendo o ângulo constante. Foi modificada também a relação entre os diâmetros de *overflow*, *underflow* e seção cilíndrica. A Figura 14 mostra um desenho esquemático mostrando as dimensões e a Tabela 6 mostra os valores das dimensões deste equipamento. A fim de diminuir a tensão de cisalhamento na entrada do hidrociclone, foram utilizadas duas entradas retangulares.

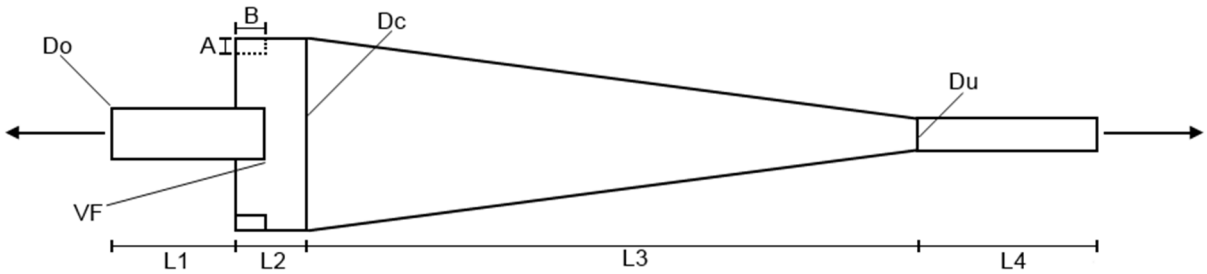


Figura 14 – Desenho esquemático das dimensões do hidrociclone modificado.

Tabela 6: Dimensões do hidrociclone estudado.

Geometria	**Dimensões (mm)**
Diâmetro do cilindro (Dc)	40
Comprimento da entrada (A)	5
Altura da entrada (B)	23
Comprimento do *vortex finder* (VF)	48
Comprimento da seção cilíndrica (L2)	72
Comprimento da parte cônica (L3)	810
Espessura da parede	1
Comprimento do tubo de *overflow* (L1)	50
Comprimento do tubo de *underflow* (L4)	64
Comprimento do tubo de entrada	40
Comprimento total (L1+L2+L3+L4)	996

As geometrias dos hidrociclones simulados definidas pelo planejamento de experimentos foi gerada utilizando o programa de CAD (*Computing Advanced Design*) *design modeller* versão 12.1 do pacote computacional *Ansys© 12.1*.

As figuras a seguir mostram as vistas lateral e superior da geometria base construída com o *design modeller*:

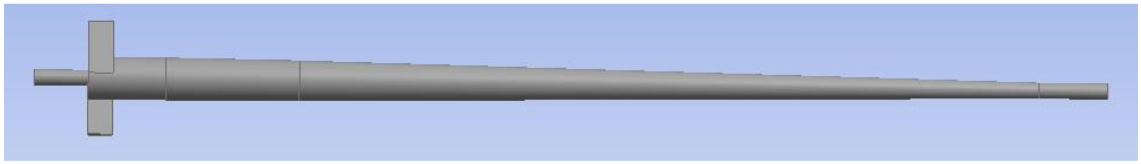


Figura 15 – Vista lateral do hidrociclone base.

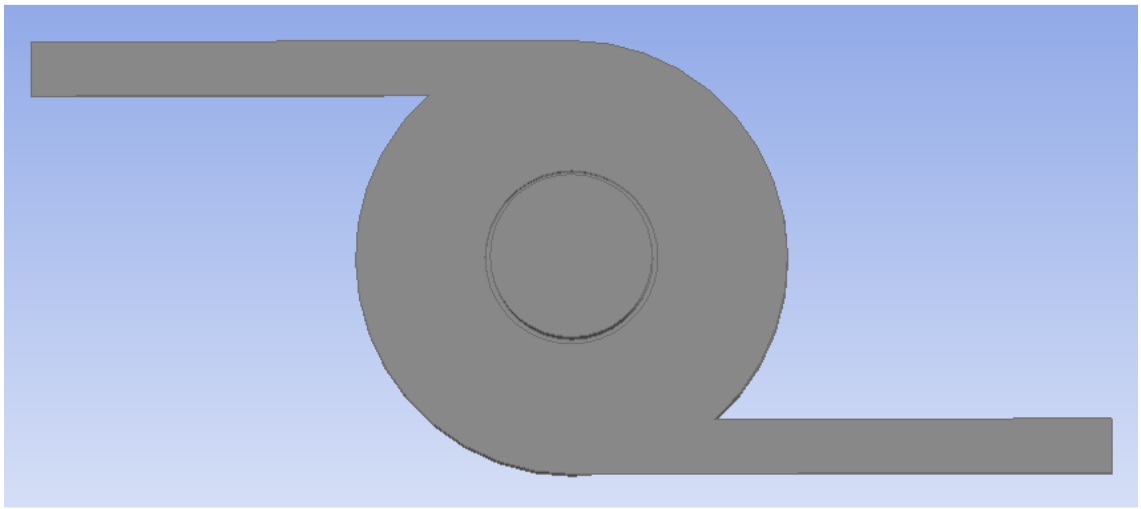


Figura 16 – Vista superior do hidrociclone base.

A fim de obter a geometria ótima para a separação de óleo da água foi realizado um planejamento de experimentos composto central rotacional com superfície de resposta. Foi analisado, em um estudo prévio (Freitas, et al. 2009), que as variáveis estatisticamente significantes na avaliação do desempenho de hidrociclones para a separação de águas oleosas são os diâmetros do *overflow* (Do) e *underflow* (Du). Portanto estes foram os fatores variados nesse planejamento.

A Tabela 7 mostra os valores de Do e Du utilizados nas simulações. As respostas dos fatores utilizados são eficiência de separação (G) e razão de fluido (R_f). Os valores mínimos e máximos de Do utilizados no planejamento foram 5 mm e 15 mm, para a variável Du, os valores mínimos e máximos foram 10 mm e 20 mm. As simulações 5, 6, 7 e 8 são feitas utilizando os pontos axiais do planejamento a fim de obter melhor análise na curvatura da superfície de resposta. A simulação 9 é o ponto central do planejamento de experimentos.

Tabela 7: Diâmetros do *overflow* (Do) e do *underflow* (Du) a serem utilizadas nas simulações.

Simulação	Do (mm)	Du (mm)
1	5	10
2	5	20
3	15	10
4	15	20
5	2,93	15
6	17,07	15
7	10	7,93
8	10	22,07
9	10	15

Para assegurar a ortogonalidade do planejamento de experimentos precisa haver 8 pontos centrais, porém, simulações com mesmos parâmetros sempre resultam nos mesmos valores, com isso a tabela anterior mostra apenas um ponto central (simulação 9).

3.1.2. Geração da Malha

Para gerar a malha com elementos hexaédricos, foi utilizado o programa ICEM CFD versão 12.1 do pacote computacional *Ansys© 12.1*. A fim de obter a melhor malha para ser utilizada nas simulações, foi realizado um teste de malha. Para tal, foram construídas malhas com aproximadamente 400.000, 800.000, 1.200.000 e 1.600.000 nós. A seguir, foram

conduzidas simulações com as mesmas condições de entrada para estas malhas e foram comparados os valores de velocidade tangencial.

As Figura 17, Figura 18 e Figura 19 mostram a malha de aproximadamente 1.200.000 nós em diferentes posições, pode-se observar as regiões de refino próximas às paredes e na região ao longo do eixo central.

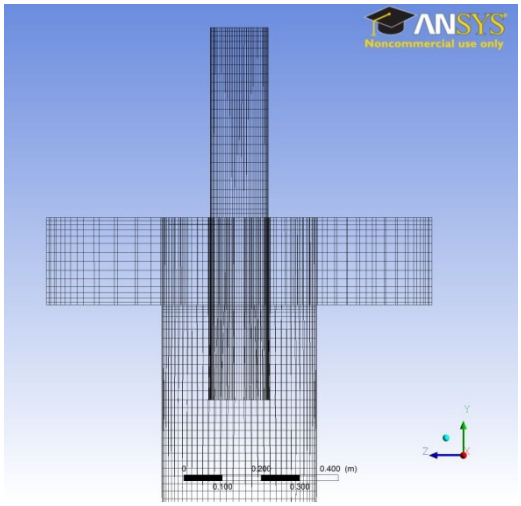


Figura 17 – Vista lateral da malha do hidrociclone base.

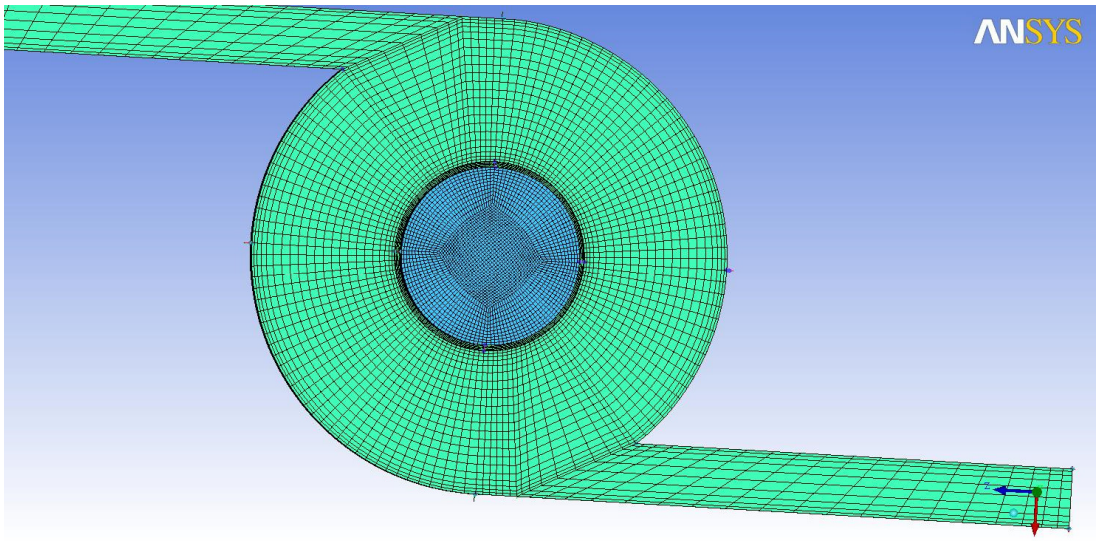


Figura 18 – Vista superior da malha do hidrociclone base.

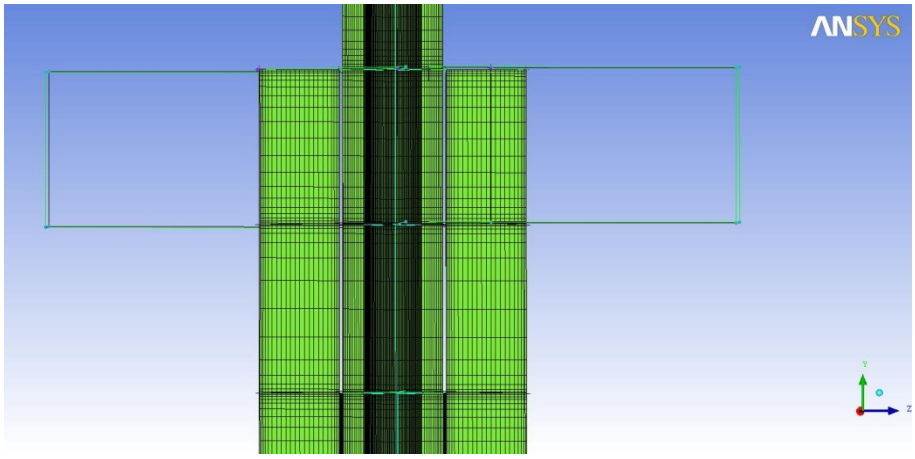


Figura 19 – Vista interna da malha do hidrociclone base.

Para a simulação, existem alguns critérios de qualidade de malha que devem ser respeitados. Devido à complexa geometria do equipamento, não foi possível duplicar a quantidade de elementos em toda a malha (como é feito em um teste de malha convencional). Se isso fosse feito, alguns parâmetros de qualidade ficariam fora do recomendado pelo manual do pacote computacional *Ansys*© 12.1, o que poderia gerar problems de convergência.

As regiões mais importantes de refino são em regiões próximas às paredes e na região do eixo central do hidrociclone, pois é onde ocorrem os maiores gradientes de velocidade. Então, essas foram as regiões onde foram priorizados os aumentos na quantidade de nós no refino da malha.

Os critérios de qualidade recomendados pelo desenvolvedor do *software* para se obter uma malha adequada são (Ansys Icem CFD 15.0 2013):

- Variação de volume (*Volume change*): é calculado para todos os elementos da malha, dividindo-se o volume do maior elemento vizinho pelo volume do próprio elemento. O valor deve ser menor que 5 (Ansys Icem CFD 15.0 2013);
- Razão de aspecto: é um parâmetro que mede o grau de achatamento de cada elemento na malha. O valor deve ser menor que 100 (Ansys Meshing Application Introduction 2013);
- Determinante 2x2x2: é o menor determinante da matriz jacobiana dividido pelo maior determinante da matriz jacobiana. Desse modo, o determinante de cada vértice do hexaedro é encontrado. O valor varia de 0 a 1, sendo que 1 indica um elemento de malha perfeitamente regular. Valores negativos para esse critério de qualidade significam que existem elementos sobrepostos, o que impossibilita a simulação (Ansys Icem CFD 15.0 2013);

- Ângulo mínimo de ortogonalidade: é o menor desvio dos ângulos internos de cada elemento da malha em relação a 90º. O valor deve ser maior que 10º (Ansys Meshing Application Introduction 2013);
- Ângulo de ortogonalidade: é a média ponderada pela área de cada elemento do desvio dos ângulos internos de cada elemento em relação a 90º. O valor deve ser maior que 20º (Ansys Meshing Application Introduction 2013);
- Ângulo mínimo da face: é o menor ângulo entre arestas de cada face que toca um nó. O valor deve ser maior que 10º (Ansys Meshing Application Introduction 2013);
- Ângulo máximo da face: é o maior ângulo entre arestas de cada face que toca um nó. O valor deve ser maior que 170º (Ansys Meshing Application Introduction 2013).

O parâmetro utilizado para seleção da malha foi o perfil de velocidades tangenciais ao longo do raio na parte cônica do hidrociclone. Para tal, foi traçada uma linha radial 10 cm a partir da região cilíndrica, conforme mostra a Figura 20, e comparados os perfis de velocidades tangenciais nesta linha.

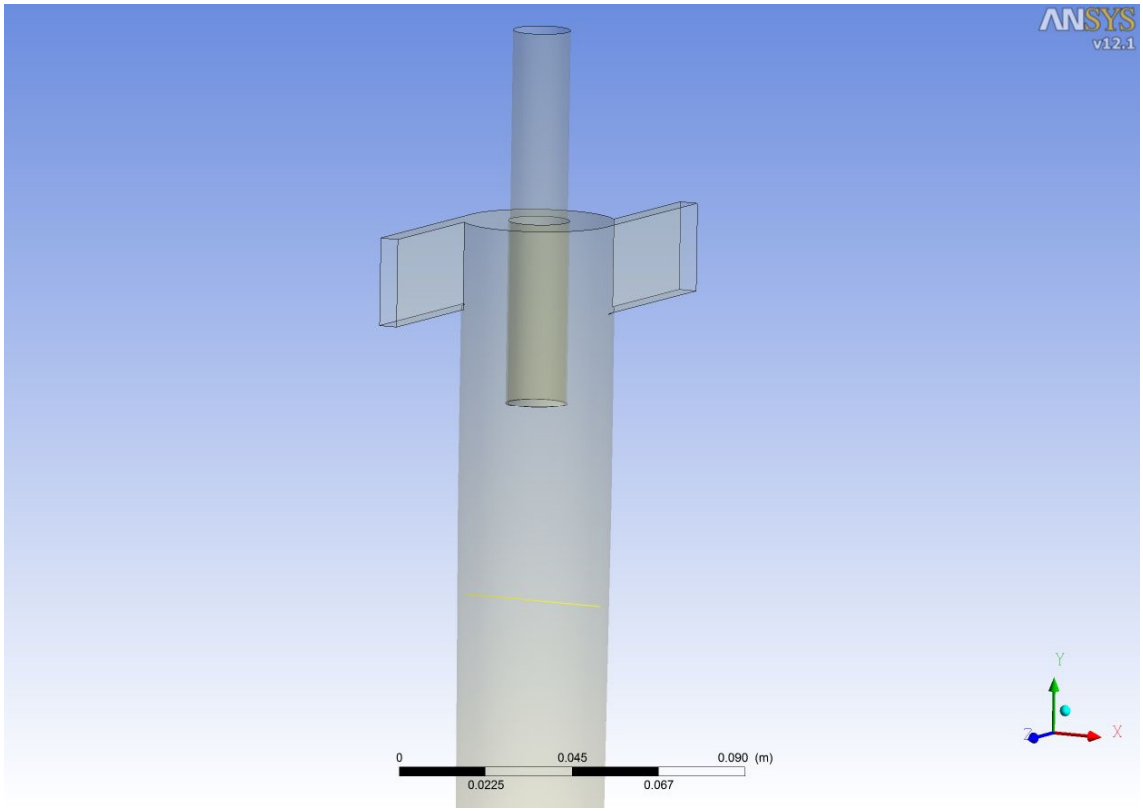


Figura 20 – Linha para medir o perfil de velocidades tangenciais do hidrociclone base.

Para o teste de independência da malha, foram realizadas simulações com apenas água escoando no equipamento em regime estacionário. Foram geradas 4 malhas e a Tabela 8 mostra a quantidade de elementos e nós das malhas testadas.

Tabela 8: Dimensões das malhas utilizadas no teste de independência da malha.

Malha	Quantidade de elementos	Quantidade de nós
1	441.899	460.452
2	846.866	868.468
3	1.249.820	1.277.432
4	1.651.769	1.682.288

A Figura 21 mostra o perfil de velocidades tangenciais ao longo da linha mostrada anteriormente para todas as malhas utilizadas, pode-se observar que a malha de 868.468 (malha 2) nós tem o perfil de velocidades semelhante às malhas de 1.277.432 nós (malha 3) e 1.682.288 (malha 4), por isso a malha 2 foi escolhida para as simulações.

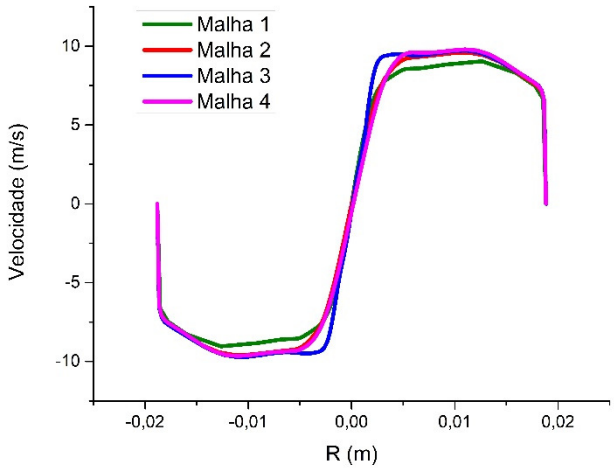


Figura 21 – Perfis de velocidades tangenciais para as diferentes malhas do hidrociclone base.

3.1.3. Definição da Simulação

Em um primeiro momento foram feitas simulações utilizando os programas CFX 12.1 e o *Fluent* 12.1, ambos do pacote computacional *Ansys*© 12.1. Nas simulações utilizando o programa CFX 12.1, para definir a simulação, foi utilizado o programa CFX-PRE versão 12.1.

Nas simulações utilizando o programa *Fluent* 12.1 o próprio programa permite definir as condições das simulações.

As regiões para as condições de contorno foram definidas como entrada1, entrada2, *overflow*, *underflow* e parede. A condição de contorno para a entrada foi *inlet*, as saídas foram selecionadas como *opening* no CFX e *pressure outlet* no *Fluent*, que são opções semelhantes na qual o usuário define a pressão naquela região e o programa calcula em cada nó da malha a direção do escoamento do fluido. Nas paredes foi utilizada a condição de aderência.

Na Tabela 9 são apresentadas as condições de contorno e as propriedades físicas dos fluidos empregados, assim como as demais condições empregadas nas simulações.

Tabela 9: Condições de contorno e demais parâmetros empregados nas simulações.

Parâmetro	**Informação**
Vazão Volumétrica	1806 cm^3/s
Fase Água	Contínua
Fração molar inicial da água	0,99
Densidade da água	997 kg/m^3
Fase Óleo	Dispersa
Diâmetro da gota de óleo	5, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 75, 100, 150 e 250 μm
Densidade do óleo	840 kg/m^3
Viscosidade do óleo	13 cp
Modelo de turbulência	K-ε e RSM
Modelo multifásico	Euler-Euler implícito
Discretização no domínio para quantidade de movimento	High Resolution (CFX) ou 2º Ordem Upwind (Fluent)
Discretização no domínio para fração volumétrica	QUICK
Demais discretizações no domínio	1º Ordem Upwind
Regime de escoamento	Estacionário/Transiente
Passo de tempo do regime transiente	$1*10^{-4}$ s
Tempo total de simulação	1,1362 s

Foram feitas simulações utilizando a abordagem Euler-Euler. O modelo de turbulência utilizado foi o Gibson e Launder (1978) no *Fluent* 12.1 e SSG (Speziale, Sarkar e Gatski 1991) no CFX 12.1, que são modelos de tensores de Reynolds. Como estimativa inicial, foram utilizadas simulações com o modelo k-ε, pois devido a diversos problemas de divergência na simulação, não foi possível obter resultados ao se empregar diretamente este modelo.

Para as simulações transientes, o tempo total de simulação foi baseado no tempo de residência dos fluidos no equipamento do ponto central do planejamento de experimentos, que

foi de 0,35 s. Era esperado que as pressões nas entradas, as vazões de água e óleo no overflow e a velocidade média no overflow estivessem constante quando a simulação atingisse três vezes o tempo de residência (1,05 s) (Dirgo e Leith 1985).

Neste estudo ficou constatado que para a simulação do ponto central num tempo aproximado de 1.05 s o equipamento atingiu um estado estacionário com pequena oscilação. A Figura 22 mostra o acompanhamento das variáveis vazão mássica de óleo no overflow, vazão mássica de água no overflow, pressões nas entradas e velocidade média no overflow com o tempo de simulação. Pode-se perceber que o regime estacionário é atingido próximo a 1 s de simulação, mas de modo a ser conservativo, todas as simulações tiveram um tempo total de simulação de 1,13 s para garantir que o regime estacionário fosse atingido.

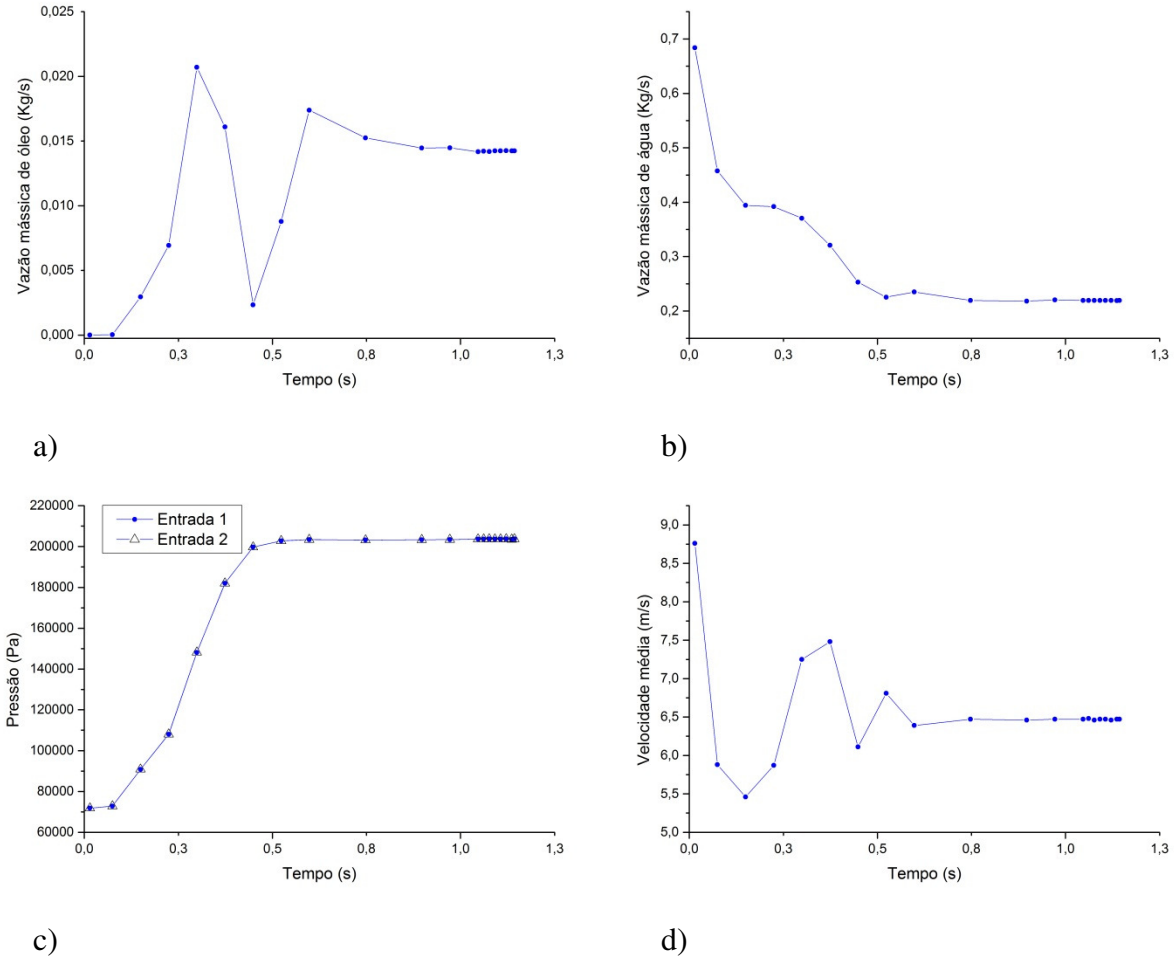


Figura 22 – acompanhamento das variáveis: a) vazão mássica de óleo no overflow, b) vazão mássica de água no overflow , c) pressões nas entradas e d) velocidade média no overflow.

Como o modelo multifásico utilizado foi o Euler-Euler, foi necessário fazer simulações com um diâmetro de gota de óleo e avaliar a distribuição granulométrica posteriormente. O anexo I mostra o *report* do programa com todos os dados de entrada das simulações.

3.1.4. Solução Numérica das Equações Definidas Para a Simulação, Análise dos Resultados em um Programa de Pós-Processamento e Hardware Utilizado

Para calcular todas as equações envolvidas no escoamento do hidrociclone, foi utilizado o programa CFX-Solver versão 12.1 (para as simulações feitas com o CFX 12.1) e o programa *Fluent* 12.1.

Após a convergência das equações, a solução foi obtida e o programa CFD-Post foi utilizado para analisar os resultados obtidos.

Para simular todos os casos, foi utilizado um cluster da marca SGI modelo ALTIX XE 1300 com as seguintes características:

- 20 nós contendo 40 processadores Intel Xeon quad-core com 2.33 GHz;
- 4 GB de memória RAM em cada nó;
- 250 GB de memória física em cada nó;
- Um head node com 2 processadores Intel Xeon quad-core de 2,33 GHz com 8 GB de memória RAM e HD SAS 146 GB;
- Total de 168 cores com 1 GB de memória RAM cada;
- Storage de 8 TB de memória física;
- Sistema operacional Linux SuSE Server versão 10.1.

3.2. Unidade Experimental

Foram feitos ensaios experimentais com um hidrociclone construído especificamente para este trabalho em parceria com a universidade do Porto. O equipamento foi desenvolvido em acrílico sob encomenda para medir experimentalmente os perfis de velocidades, eficiência granulométrica, razão de fluido, eficiência granulométrica reduzida e queda de pressão. O hidrociclone construído foi o otimizado de acordo com o planejamento de experimentos utilizando as simulações numéricas conforme discutido no capítulo 4.2.

A Figura 23 mostra o desenho, em *CAD*, do hidrociclone construído para este trabalho. Devido ao seu grande comprimento, para facilitar a construção, o equipamento foi dividido em

várias partes, uma parte com a região cilíndrica (Figura 24 e Figura 25) e 5 partes cônicas (Figura 26 e Figura 27).

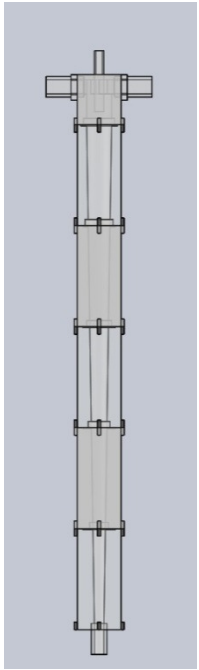


Figura 23 – Hidrociclone testado nos ensaios experimentais.

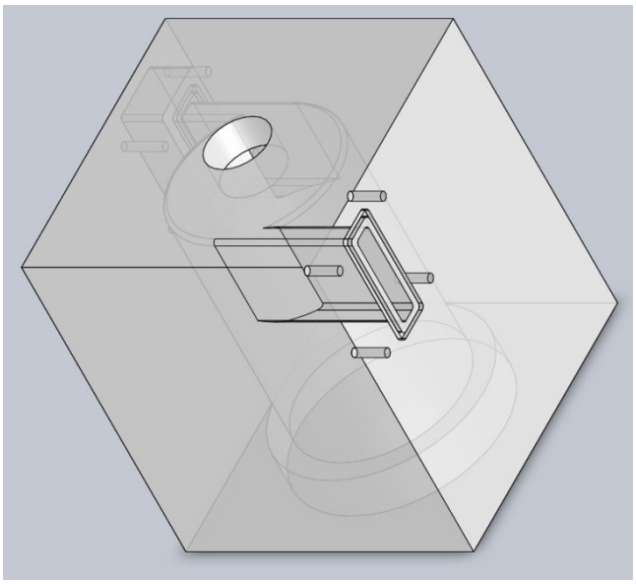


Figura 24 – Desenho construtivo da parte cilíndrica.

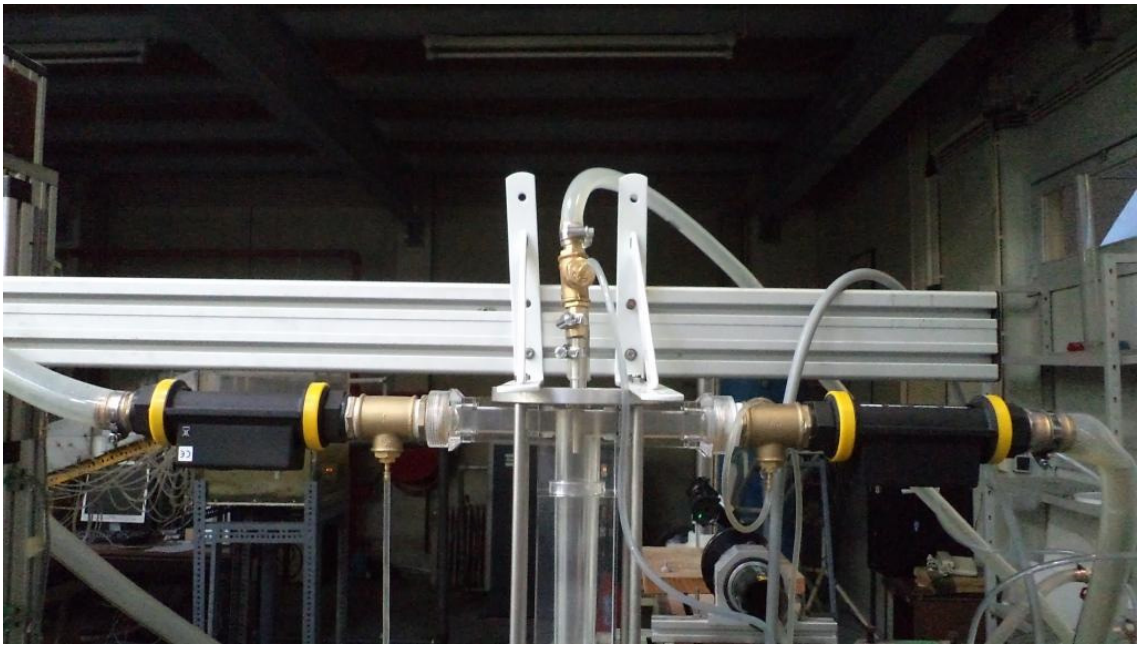


Figura 25 – Foto da seção cilíndrica do hidrociclone com os dois medidores de vazão conectados nas entradas do equipamento.

Figura 26 – Foto da seção cônica.

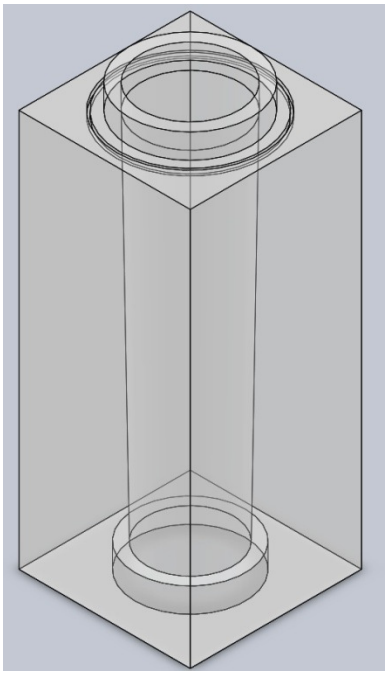


Figura 27 – Desenho construtivo em *CAD* da seção cônica.

A fim de validar as simulações, foram feitas medições de perfis de velocidade utilizando duas técnicas, a técnica de velocimetria por laser Doppler (*LDV*) e velocimetria por imagem de partículas (*PIV*).

Os experimentos com *PIV* e *LDV* foram realizados com apenas água escoando no equipamento para medir o perfil de velocidades ao longo do hidrociclone, calcular a razão de fluido e avaliar a perda de carga no equipamento.

Em seguida a unidade experimental foi modificada de modo a possibilitar a medição experimental de eficiência granulométrica, razão de fluido, eficiência granulométrica reduzida e queda de pressão.

3.2.1. Experimentos utilizando Velocimetria por Laser Doppler (*LDV*)

Esta etapa foi desenvolvida durante o período de doutorado sanduiche na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em Portugal com a colaboração do Professor PhD João Bernardo Lares Moreira de Campos. O aparato experimental foi montado no laboratório de hidráulica da Universidade do Porto.

A Figura 28 mostra um esquema da unidade experimental. A mesma consistia de um tanque em aço inox com capacidade para 50 L, duas bombas centrífugas da marca ESPA modelo Prisma 25-4 230V com potência de 1.25 HP, quatro medidores de vazão volumétrica

da marca Parker modelo DFT.990.RS, dois transdutores de pressão diferencial da marca Freescale modelo MPX5500DP e um hidrociclone em acrílico construído sob medida (Figura 28).

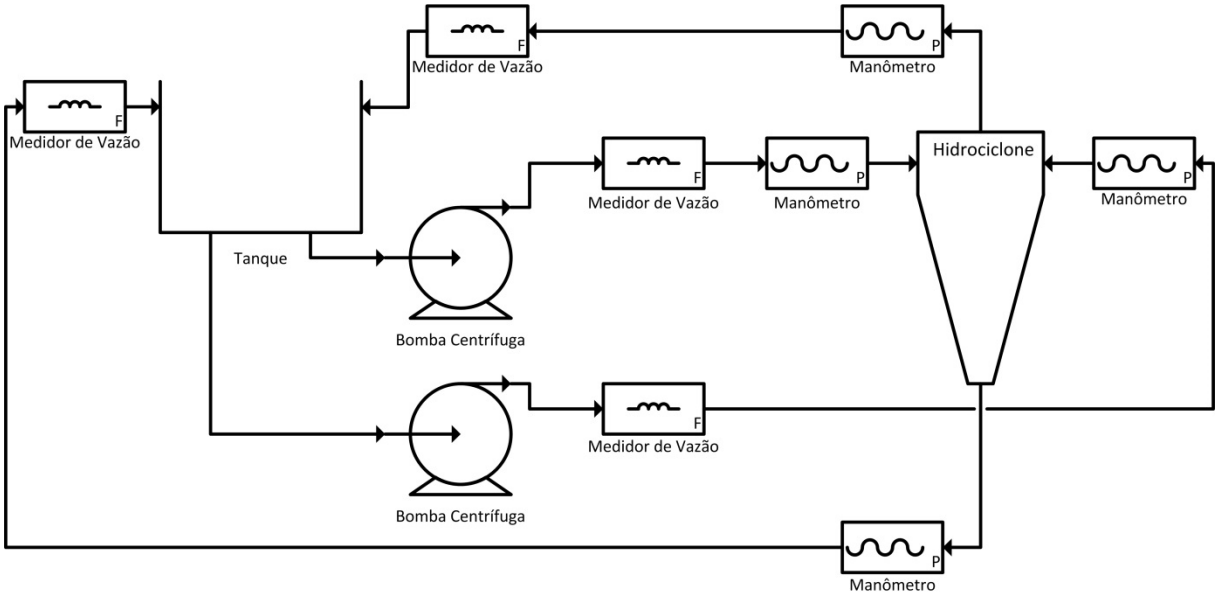


Figura 28 – Esquema da unidade experimental.

A unidade operava em circuito fechado e de modo contínuo. As duas bombas operavam em paralelo para succionar a água do tanque, sendo cada bomba ligada a uma entrada do hidrociclone.

Os medidores de vazão foram posicionados antes das entradas do hidrociclone e do tanque. Os transdutores de pressão diferenciais medem a diferença de pressão entre uma entrada e uma saída do equipamento, sendo localizados o mais próximo possível das entradas e saídas.

Para medir o perfil de velocidades, foi utilizado o *LDV* da marca CVI Melles Griot modelo 532-A-A04 de 514nm e potência de 100mW em *forward scatter*. A Figura 29 e Figura 30 mostram respectivamente a fonte emissora de laser e o posicionamento do laser no protótipo de acrílico para iniciar a medição utilizando a técnica LDA.

Figura 29 – Emissor de laser.

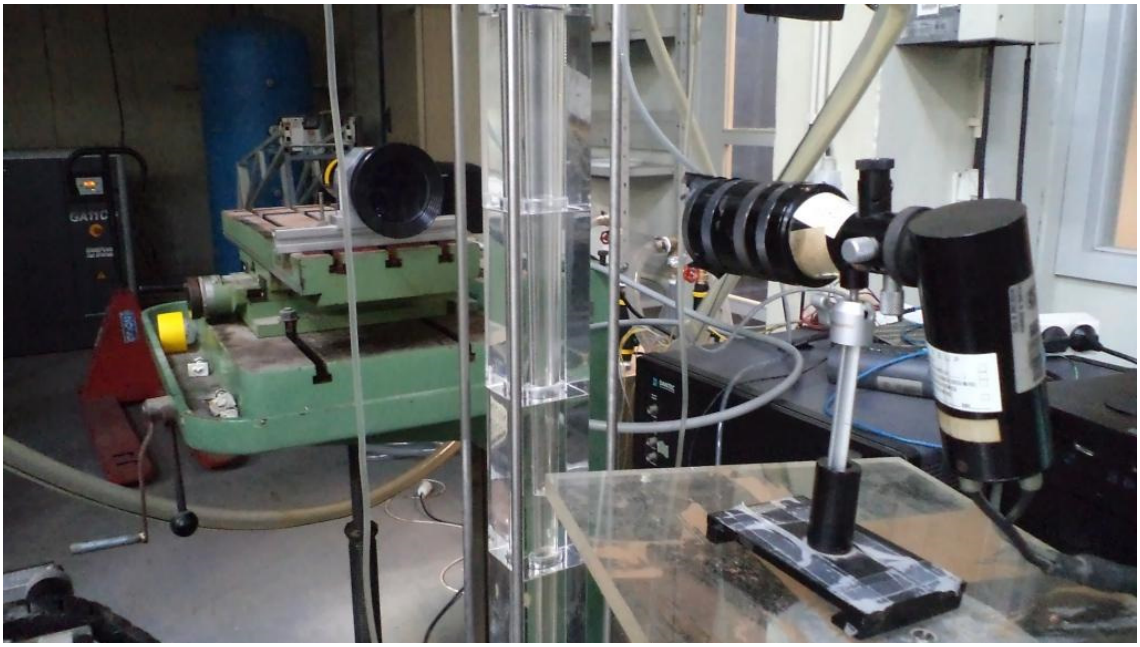


Figura 30 – Posicionamento do laser no protótipo de acrílico para medição de velocidade empregando a técnica de LDA.

A técnica de *LDV* demorava para obter um ponto experimental, devido ao efeito de curvatura do hidrociclone, pois pelo acrílico ter um índice de refração diferente do ar, a trajetória dos feixes de lasers na seção cônica variava, dificultando bastante o cruzamento dos raios e gerando uma incerteza no local exato da medição. Em média era obtido um ponto experimental por dia.

3.2.2. Experimentos utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV*)

A técnica do *PIV* é mais robusta que a técnica de *LDV*, pois a calibração é feita com um alvo de calibração dentro do equipamento e são tiradas fotos a fim de conhecer as coordenadas exatas do equipamento assim como corrigir automaticamente os efeitos de curvatura apresentados no protótipo.

Com o término do doutorado sanduiche, foi necessário trazer o hidrociclone de Portugal para serem feitos os demais testes experimentais. Com isso foi montada outra unidade experimental no Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica de Fluidos (NIDF) da UFRJ. A Figura 31 mostra o fluxograma da montagem do aparato experimental para a medição com o PIV.

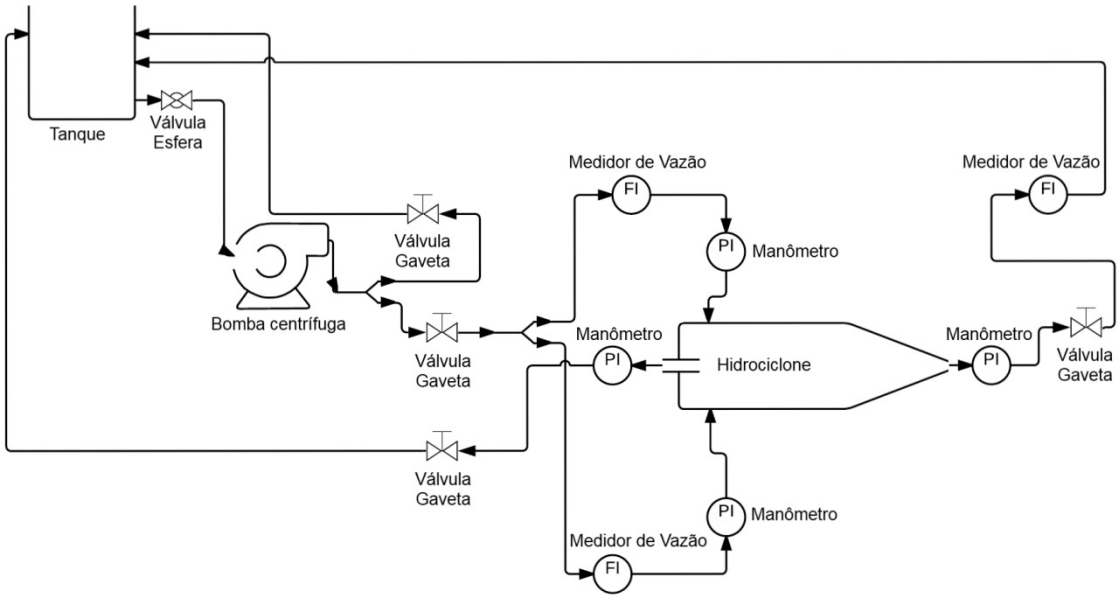
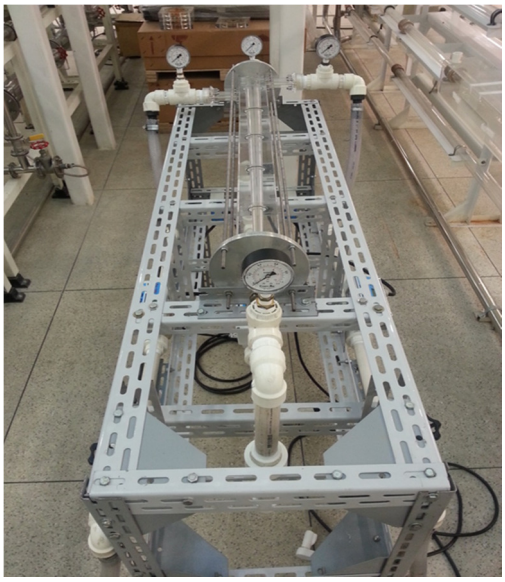


Figura 31 – Fluxograma da unidade experimental para análise com PIV.

A unidade experimental, assim como no experimento com *LDV*, operava em circuito fechado e de modo contínuo. A mesma consistia de um reservatório com capacidade para 310 L, uma bomba centrífuga da marca Dancor modelo CAM-W10 com potência de 1,5 CV, três medidores magnéticos de vazão volumétrica da marca Incontrol modelo PRO 1000, dois manômetros de bourdon com faixa de 0 a 7 bar de pressão da marca Conec-Rio, dois manômetros de bourdon com faixa de 0 a 1 bar de pressão da marca Conec-Rio e um hidrociclone em acrílico construído sob medida (Figura 32).



A)

B)

C)

Figura 32 – Hidrociclone montado em estrutura metálica

Nesta unidade experimental, foi utilizada uma bomba centrífuga para succionar a água do tanque em que havia um tê para dividir a vazão em cada uma das entradas do hidrociclone. Dois medidores de vazão foram posicionados antes das entradas do hidrociclone e o outro foi posicionado após o *underflow* do hidrociclone. Os manômetros mediram a pressão em cada entrada e em cada saída do equipamento, sendo localizado o mais próximo possível das entradas e saídas.

A técnica *PIV* é semelhante à *LDV*. Ela consiste em medir-se a velocidade de partículas marcadas através da quantificação do deslocamento dessas partículas, dentro do equipamento,

no intervalo de tempo entre dois pulsos de laser. No *PIV*, é gerado um plano de luz por onde as partículas atravessam e são captadas por câmeras sincronizadas com a emissão da luz.

As câmeras utilizadas foram *imager intense* 14 *bit* CCD da marca *Lavision* com resolução de 1376 x 1040 pixels (Figura 33) e lentes da marca *Nikkon* modelo *Nikkor* com distância focal de 60 e 105 mm. O emissor laser utilizado foi da marca *Continuun Inc* com potência de 50 mJ que emitia laser Nd:YAG com dupla pulsação e comprimento de onda de 532 nm.

Figura 33 – Câmeras e lentes utilizadas.

A Figura 34 mostra as câmeras posicionadas para medir os perfis de velocidades axiais e tangenciais. O ideal para a medição, é que a câmera esteja posicionada perpendicularmente com o plano de luz gerado, com isso, a câmera na posição vertical mede o perfil de velocidades axiais. Para medir o perfil de velocidades tangenciais, o ideal era que a câmera estivesse posicionada na horizontal e acima do *overflow*, porém, nessa posição não há como captar nenhuma imagem. Devido a isso, foi necessário colocar a câmera inclinada 30º em relação ao plano horizontal e emitir o plano de laser na direção vertical para depois a imagem ser processada pelo software do fabricante do *PIV* (FlowManager Software 2000).

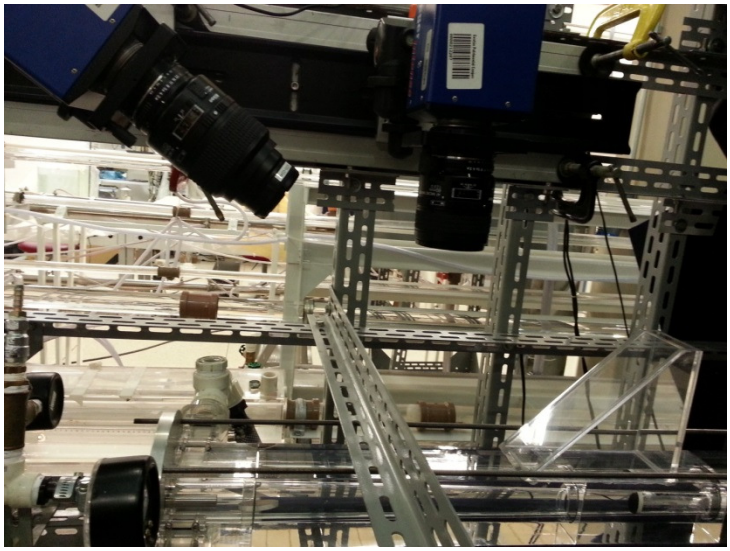


Figura 34 – Posicionamento das câmeras.

Antes de fazer qualquer medição foi necessário fazer a calibração das imagens, para isso foram construídos alvos de calibração. Os alvos foram construídos de plástico com espessura de 1 mm cobertos com papel para *plotter* impresso em preto com pequenas bolas brancas de diâmetro de 1 mm igualmente espaçadas em 5 mm.

O alvo para medir os perfis de velocidades axiais foi construído como um corte longitudinal da seção cônica do equipamento (Figura 35). Para medir os perfis de velocidades tangenciais foram necessários 3 alvos com formato circular com o mesmo diâmetro da seção em que foram medidos (Figura 35).

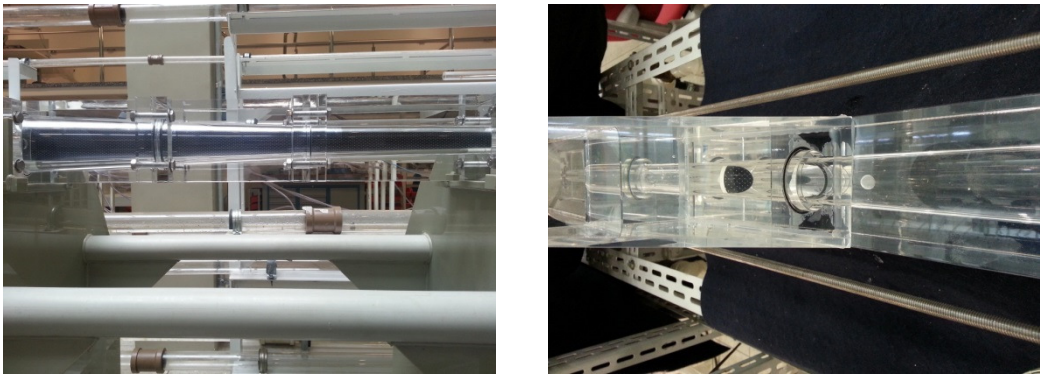


Figura 35 – Alvos de calibração para as medições axiais (esquerda) e tangenciais (direita) posicionados dentro do equipamento.

Para fazer a calibração, os alvos foram colocados dentro do equipamento, o mesmo foi preenchido com água e foram fotografados com as câmeras. Para a medição do perfil axial, não há muita distorção da imagem pelo efeito de desvio da luz pela diferença do índice de

refração, gerando uma imagem linear conforme mostra a imagem obtida pela câmera do *PIV*, Figura 36.

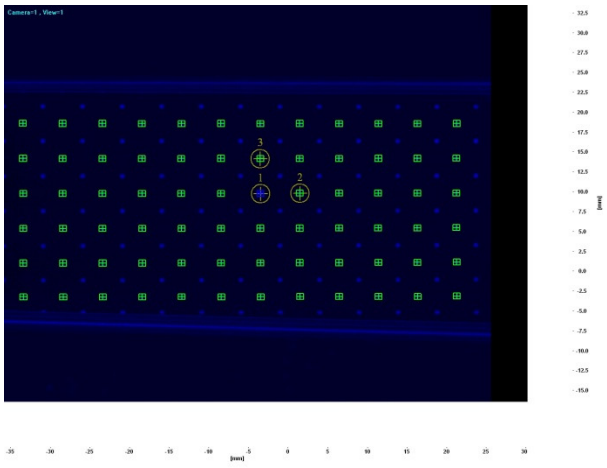


Figura 36 – Imagem obtida pela câmera do sistema PIV do alvo de calibração para as medições axiais posicionado dentro do hidrociclone.

Já para a calibração do sistema para as medições tangenciais, o efeito de distorção de luz é bem acentuado, a fim de ilustrar este efeito, a Figura 37 mostra duas fotos do hidrociclone com o alvo na mesma posição, porém na primeira foto o hidrociclone está sem água e na segunda, o mesmo encontra-se cheio de água.

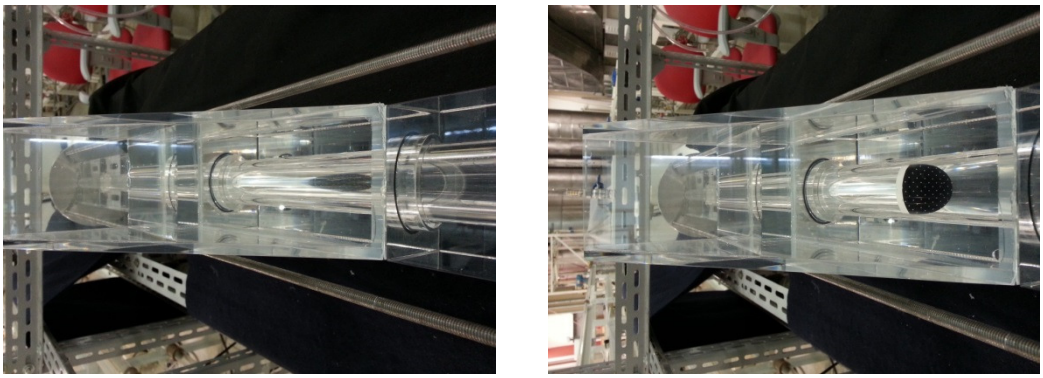


Figura 37 – Fotos do alvo de calibração para medições de velocidades tangenciais dentro do hidrociclone sem água (esquerda) e com água (direita).

Na foto sem água, praticamente não se enxerga o alvo com clareza e o mesmo aparenta ter o diâmetro bem menor do que realmente é. Na foto com água, pode-se observar o alvo com facilidade, porém, devido à distorção da luz, o alvo que possui a forma de um círculo aparenta ter formato elipsoidal e as bolinhas brancas no alvo não aparentam estar igualmente espaçadas.

Outro problema para este tipo de medição, é que a câmera está inclinada em relação ao hidrociclone, o que aumenta ainda mais o efeito de difração da luz. A fim de diminuir este efeito, foi criada uma peça de acrílico oca de modo que a câmera fique perpendicular a esta peça (Figura 38).

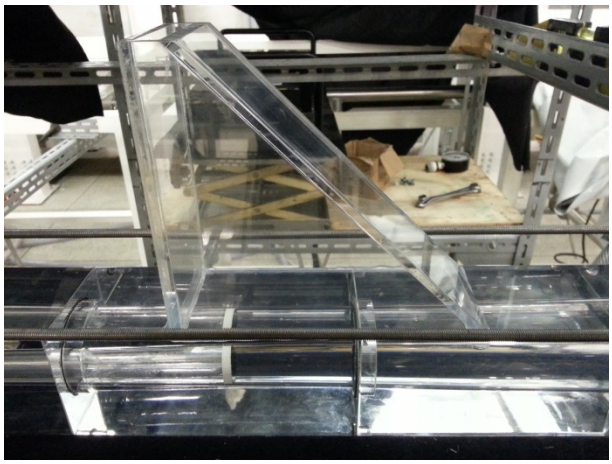


Figura 38 – Seção do hidrociclone de acrílico cheia de água.

A Figura 39 mostra uma foto obtida com a câmera do sistema PIV do alvo de calibração dentro do equipamento. Pode-se observar com clareza que há grande distorção da imagem e os pontos parecem não estar igualmente espaçados, por isso é necessário utilizar uma função de distorção (*dewarp*) gerada pelo software *Flowmanager* de modo a corrigir a imagem para a forma original conforme mostra a Figura 40.

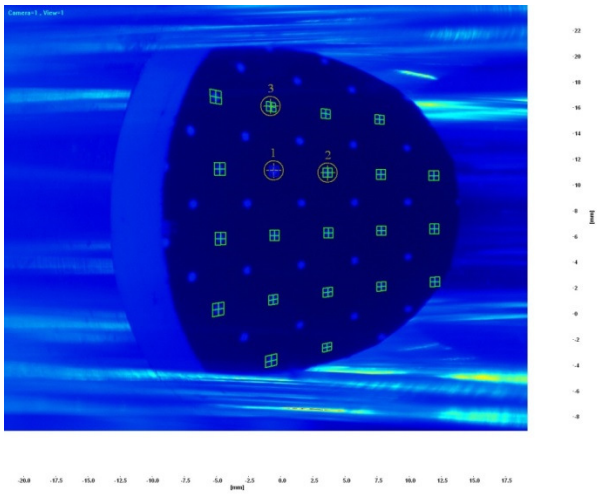


Figura 39 – Imagem original obtida pela câmera do sistema PIV.

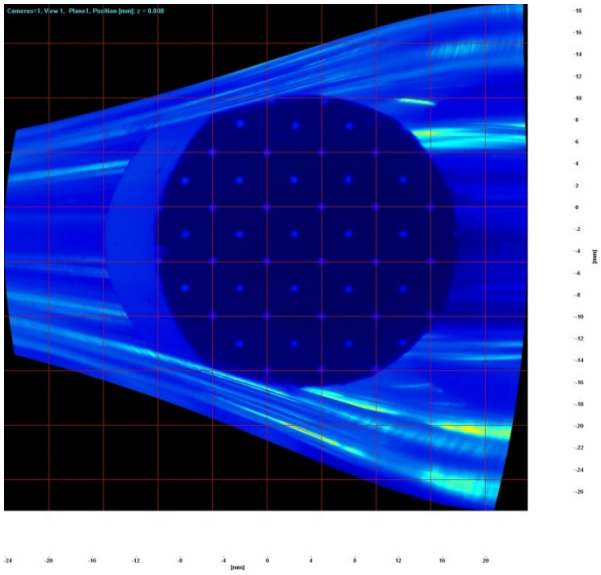


Figura 40 – Imagem corrigida pela função dewarp pelo software do sistema PIV.

Uma vez feita às calibrações, o próximo passo era proceder com as medições dos perfis de velocidade. Porém, foi avaliado que havia muita reflexão de luz sendo captado pelas câmeras, sendo assim, para melhorar a visualização das câmeras, foram adicionadas partículas esféricas de Metil-Metacrilato revestidas de Rodamina B (Figura 41). Estas partículas emitem fluorescência laranja (cujo comprimento de onda é maior do que 570 nm) quando iluminadas por laser de cor verde (que foi utilizado nos experimentos), com a utilização de um filtro nas câmeras (Figura 41) pode-se captar apenas as luzes refletidas pelas partículas, diminuindo assim os ruídos gerados (EBM 2010), isso melhora significativamente a qualidade do mapa de vetores para medidas com PIV e LDV.

Figura 41 – Solução de partículas de Rodamina B e filtro para eliminar comprimento de ondas inferior a 570 nm.

As partículas devem ser pequenas para não influenciar o escoamento, por isso foram utilizadas partículas com distribuição de tamanhos de 1-20 μm com diâmetro médio de 10 μm e densidade igual a 1,19 g/cm^3.

Uma vez ajustada a imagem captada pela câmera com a emissão do laser, pode-se gerar imagens a ser processadas pelo software *Flowmaster* da *Lavision Inc*.

A figura a seguir mostra duas imagens geradas em sequência para a medição do perfil de velocidades axiais. Podem-se ver as partículas iluminadas pelo laser e com isso acompanhar a distância percorrida por cada uma nas imagens em sequência.

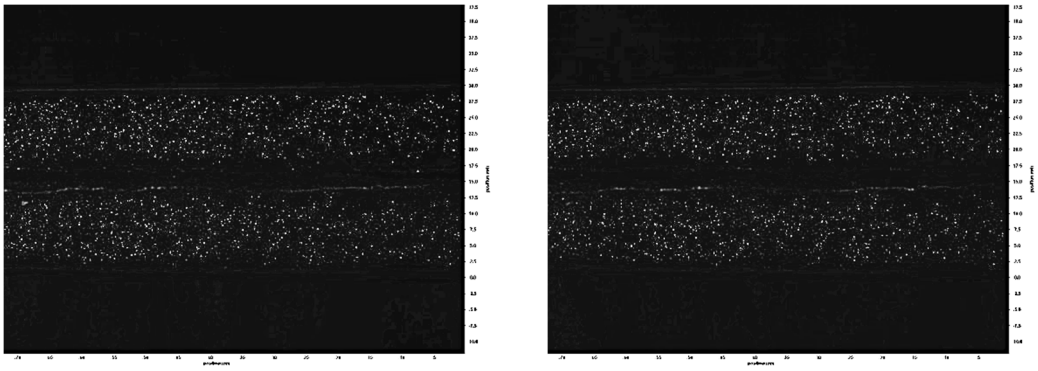


Figura 42 – Par de imagens obtidas em sequência para medir o perfil de velocidades axiais.

É importante destacar que o tempo entre o par de imagens obtido precisa ser ajustado de maneira a garantir que a interpretação dos dados pelo programa seja feita de maneira adequada. Para entender como é feito o ajuste, é necessário compreender como funciona a interpretação das imagens pela técnica PIV.

Na técnica PIV o par de imagens não é analisada inteiro, mas as imagens são divididas em pequenas janelas com tamanho a ser determinado pelo usuário. Os tamanhos comumente utilizados são janelas quadradas de 16 x 16 *pixels*, 32 x 32 *pixels*, 64 x 64 *pixels* ou 128 x 128 *pixels*. O deslocamento das partículas são analisados dentro dessas janelas em duas imagens consecutivas, por exemplo:

- pode-se analisar as duas imagens e dividi-las em janelas iguais de 32 x 32 *pixels*;
- identificar as partículas dentro de cada janela da primeira imagem;
- em seguida, analisar a segunda imagem e identificar as mesmas partículas da primeira imagem;

- verificar o deslocamento destas partículas em cada janela da primeira imagem para a segunda;
- conhecido o tempo decorrido entre as duas imagens e o deslocamento de cada partícula dentro da janela, calcula-se a velocidade das partículas na janela.
- Com isso cada janela mostra a velocidade média das partículas e gera um vetor de velocidade para aquela janela.

Assim, obtém-se o campo de velocidades para o par de imagens. Contudo, alguns cuidados devem ser observados, pois o tamanho das janelas tem influência direta sobre a quantidade de vetores gerados e qualidade na interpretação dos dados. Janelas muito grandes podem gerar erros nas medições, pois como cada janela gera um vetor, o ideal é que todas as suas partículas estejam na mesma velocidade, e janelas grandes podem não garantir isso. Obter janelas pequenas geram maior quantidade de vetores de velocidades em comparação com janelas maiores, porém, se a janela for pequena demais, pode estar calculando vetores a partir de ruídos e não apenas partículas, o que é prejudicial para a medição.

Deste modo, as janelas devem possuir um número de partículas grande o suficiente para estarem na mesma direção e poder medir o vetor velocidade sem ruídos. Sendo assim devem-se fazer medições com apenas um par de fotos a fim de ajustar a diferença de tempo entre as fotos e o tamanho da janela. Com isso se analisa visualmente quantas partículas se encontram em uma janela de cada imagem (recomenda-se pelo menos 4 partículas por janela) , depois se analisa o deslocamento das partículas (recomenda-se que as partículas se desloquem em torno de 1/4 do comprimento da janela), depois o programa que interpreta as imagens deve gerar um mapa de correlação.

Esse mapa serve para identificar se todas as partículas estão se deslocando no mesmo sentido, é gerado um pico para cada direção de partícula dentro da janela, ou seja, se todas as partículas estiverem na mesma direção, será gerado apenas um pico, porém, se houver ruídos vários picos são gerados. Pode-se perceber na Figura 43 que apesar de haver ruídos, um pico se destaca mais, identificando assim um bom tamanho de janela.

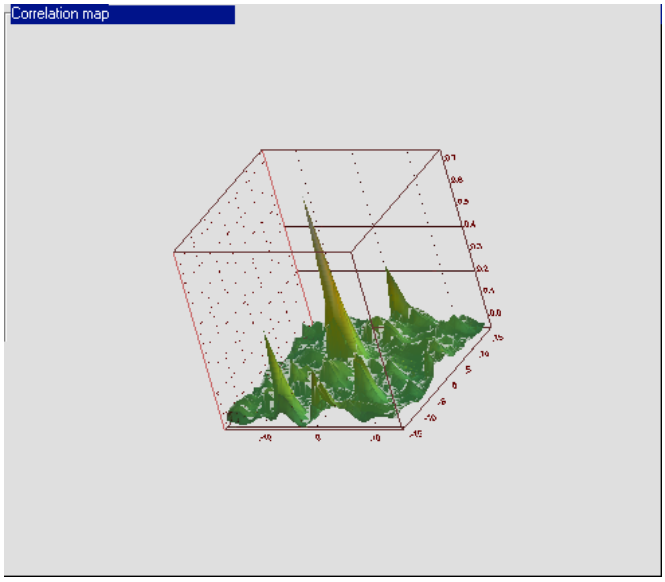


Figura 43 – Mapa de correlação para uma janela de 32 x 32 pixels.

Feitos os ajustes, foram utilizadas janelas com tamanho de 32 x 32 pixels e a diferença de tempo entre as fotos determinada foi de 35 μs.

A fim de aumentar a quantidade de vetores na imagem, pode ser utilizada uma técnica interpolativa conhecida como *overlap* (sobreposição das janelas). Em que se sobrepõe parcialmente as janelas de modo a que aumente a quantidade de dados analisados. Para este trabalho foi utilizado o *overlap* de 50%.

3.2.3. Experimentos com óleo para medir eficiência de separação

Terminadas as medições de campo de velocidade, foi necessário modificar a unidade para serem feitos experimentos de medição da eficiência de separação granulométrica, eficiência de separação granulométrica reduzida, eficiência total de separação e eficiência total de separação reduzida.

O escopo do equipamento era retirar o óleo de uma corrente de 5,5 m^3/h com concentração em volume de 1% de óleo em água. O óleo utilizado (Figura 44) foi um óleo lubrificante mineral comercial lubrax ob-10. É um óleo parafínico, desaromatizado por solvente e hidrogenado, possui aspecto transparente a amarelado, sua densidade é de 0,8504 g/cm^3 e sua viscosidade é de 13 cP na temperatura de 20º C. A distribuição de tamanhos típica de óleo presente em águas oleosas de refinaria foi fornecida pela Petrobras no início deste projeto e os parâmetros k e m do modelo RRB são 160 μm e 2,51 respectivamente.

Figura 44 – Amostra do óleo lubrax ob-10 utilizado nos experimentos.

Com a adição do óleo, tornou-se inviável a utilização de um circuito fechado, pois as gotículas de óleo recirculando no sistema iriam alterar seus tamanhos cada vez em que escoasse pela bomba, conexões ou o próprio hidrociclone.

Esta unidade foi remontada para operar em circuito aberto (Figura 45), a fim de promover a mistura de uma forma eficiente, a adição de óleo foi feita em paralelo com a adição de água, além do tanque de água utilizado para os experimentos com o PIV, foi utilizado um tanque de óleo de 30 L ligado a uma bomba de deslocamento positivo *Netzsch* modelo Nemo de 0,5 CV gerando uma corrente de óleo.

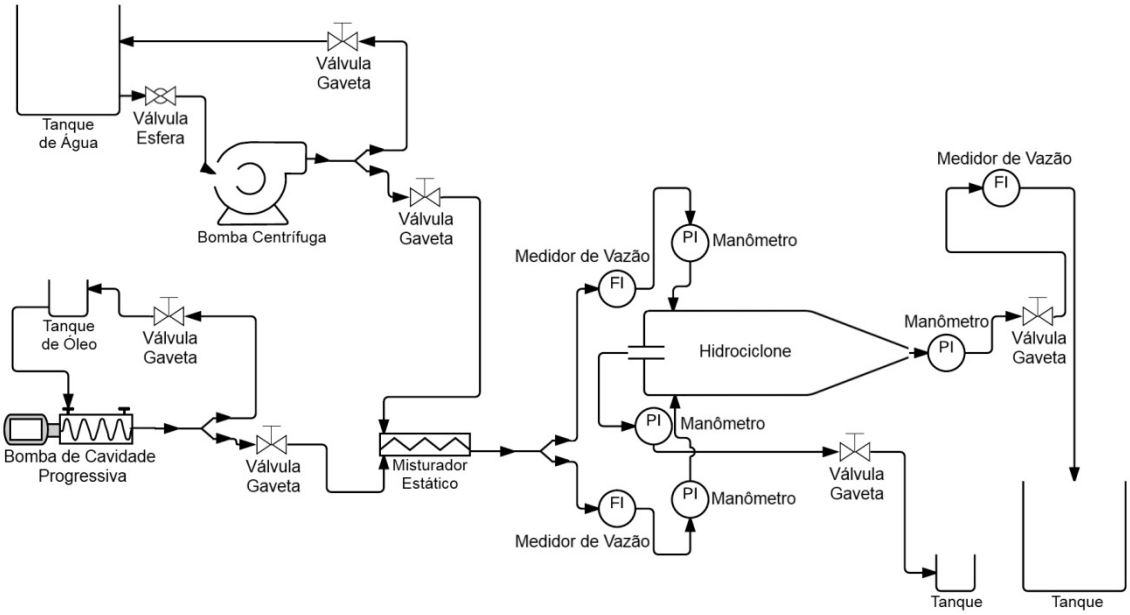


Figura 45 – Fluxograma da unidade experimental para a determinação da eficiência de separação.

Para ter uma mistura de 1% (que equivale a concentração de 8413,46 mg/L) de óleo em volume, foi utilizada uma corrente de 5,44 m^3/h de água misturada com uma corrente de 0,06 m^3/h de óleo.

Para promover a mistura homogênea de óleo com água, foi utilizado um misturador estático (Figura 46) construído no laboratório. Seu desenho promoveu alta turbulência na linha favorecendo a mistura. Após isto, a mistura água/óleo passou pelo hidrociclone onde ocorreu a separação e as correntes oriundas do *overflow* e *underflow* foram recolhidas em dois tanques diferentes.

Figura 46 – Foto do misturador estático.

A fim de calcular a eficiência de separação, foi necessário medir a concentração de óleo nas entradas e saídas do equipamento. Para isso, foi necessário utilizar uma técnica de análise quantitativa utilizando a lei de Lambert-Beer.

Foram recolhidas amostras das duas entradas, *overflow* e *underflow*. Foram feitas extrações do óleo com o solvente orgânico n-hexano com a finalidade de retirar todo o óleo da solução bifásica (água/óleo) e passar para uma solução monofásica (óleo/n-hexano).

Para conhecer a concentração do óleo em n-hexano foi utilizado um espectrofotômetro, pois de acordo com a lei de Lambert-Beer: "*A intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta aritmeticamente"*. Com isso pode-se afirmar que a relação entre a absorbância e a concentração da solução é linear e crescente (Skoog, West e Holler 2005).

Primeiramente foi necessário definir o comprimento de onda utilizado para a leitura da absorbância das soluções, para isso foram traçadas curvas de varredura de comprimento de onda no espectro (faixa de 1100 a 190 nm) para diferentes concentrações padrões de óleo em n-hexano. A Figura 47 mostra as varreduras para as concentrações de 240, 1000, 4000 mg/L e hexano puro.

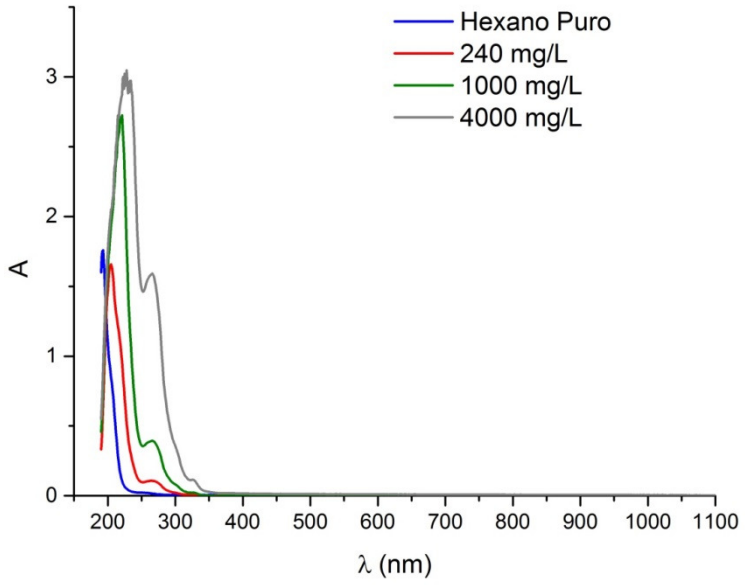


Figura 47 – Absorbância versus comprimento de onda para diferentes concentrações de óleo em n-hexano.

Pode-se observar com a curva de n-hexano puro um pico de absorbância no comprimento de onda de 200 nm. Esse pico identifica a substância pura, nas outras curvas pode-se observar a presença de outro pico no comprimento de onda de 266 nm, observa-se também que a absorbância aumenta com o aumento da concentração, conforme indica a lei de Lambert-Beer. A partir do comprimento de onda de aproximadamente 350 nm verifica-se que a absorbância é nula.

Foram preparadas soluções padrões de 250, 540, 1000, 2000, 4150, 6000 e 7000 e hexano puro e foram irradiadas com luz de comprimento de onda de 266 nm no espectofotômetro para fazer a calibração da concentração com absorbância medida (Figura 48).

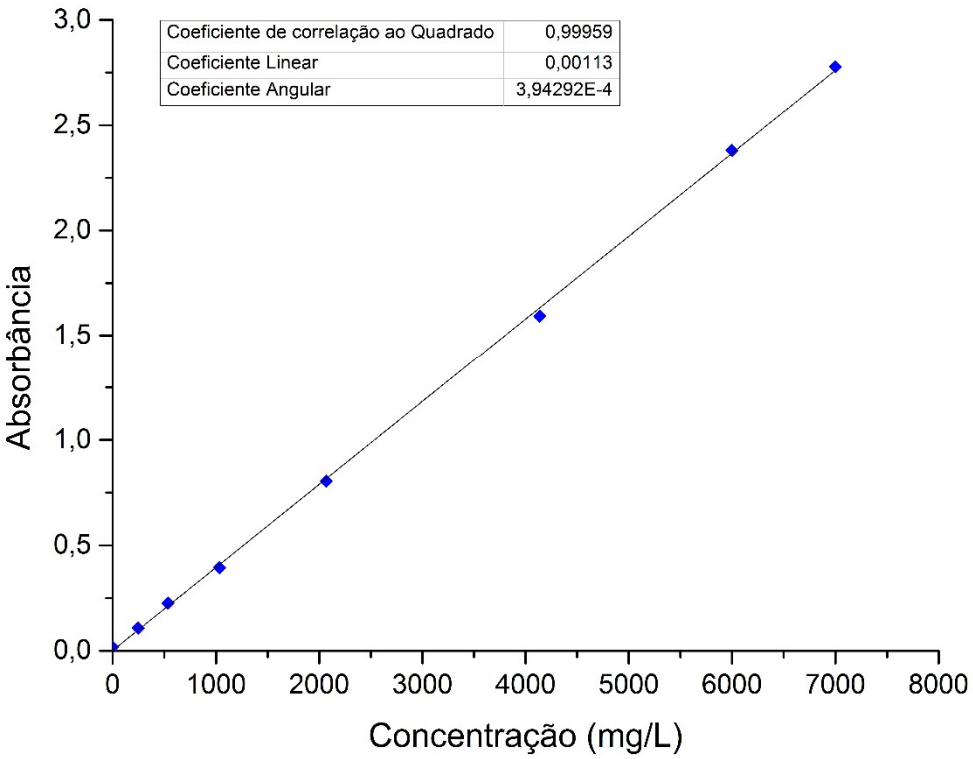


Figura 48 – Curva de Absorbância contra concentração de óleo em n-hexano para calibração.

Percebe-se que a curva foi bem ajustada já que o valor do coeficiente de correlação ao quadrado foi 0,9996 e a média dos desvios foi de 1,23%. Portanto, a concentração de óleo em n-hexano pode ser calculada pela equação 45.

$$C = 0{,}0004 \cdot \mathrm{Abs} + 0{,}0011 \tag{45}$$

Nesta equação, C é a concentração de óleo em n-hexano em mg/L e Abs é a absorbância medida no espectrofotômetro no comprimento de onda de 266 nm.

Com isso, pode-se medir a concentração de óleo em n-hexano e com um simples balanço de massa pode-se determinar indiretamente a concentração de óleo em água.

4. RESULTADOS

Este capítulo mostra uma análise dos resultados obtidos experimentalmente e em simulação.

4.1. Resultados das Simulações

Foram feitas simulações do ponto central do planejamento de experimentos (Simulação 9 da Tabela 6). Em um primeiro momento, foi utilizado o programa Ansys CFX e o modelo k-ε de turbulência para simular o hidrociclone. As figuras a seguir mostram os resultados das simulações feitas no CFX em regime estacionário com diâmetro de gota óleo de 25 μm.

A Figura 49 mostra as linhas de corrente do fluido escoando no interior do hidrociclone. A razão de fluido obtida foi de 32,47%.

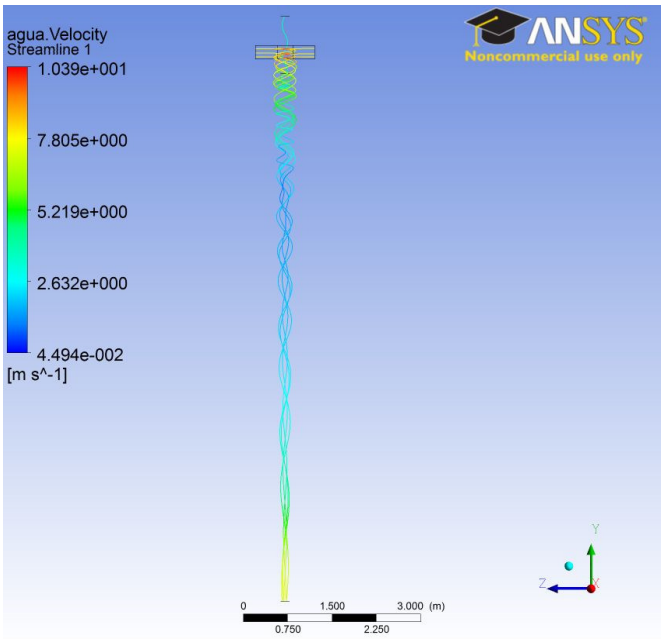


Figura 49 – Linhas de corrente do hidrociclone em simulação realizada com o modelo de turbulência k-ε no programa Ansys CFX.

A Figura 50 mostra a fração volumétrica de óleo no hidrociclone, observa-se que na região cilíndrica e no *overflow* há uma maior concentração de óleo.

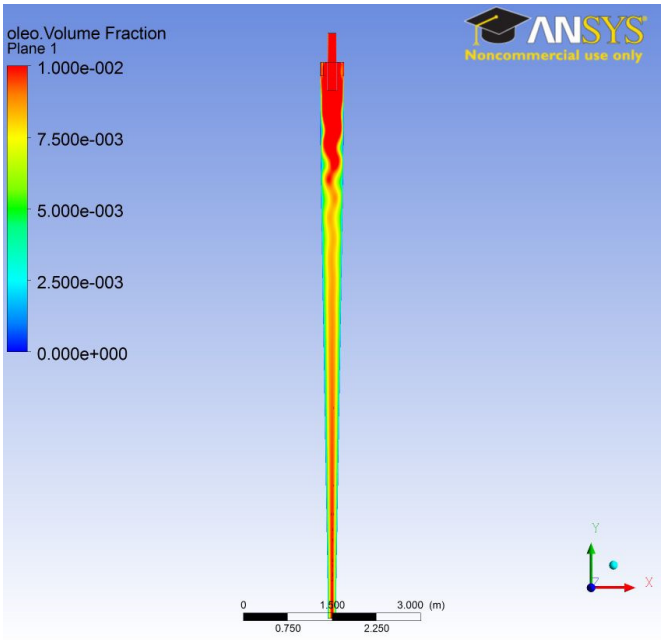


Figura 50 – Fração volumétrica de óleo no hidrociclone em simulação realizada com o modelo de turbulência k-ε no programa Ansys CFX.

A Figura 51 mostra a velocidade tangencial em função da distância radial da seção cônica. Era de se esperar, de acordo com Husveg *et al.* (2007) e Chu *et al.* (2004), que no perfil de velocidades, a região de maior valor de velocidade estivesse próxima do centro do hidrociclone. Porém, com base na simulação realizada, as maiores velocidades estão próximas da parede do equipamento, o que é não era esperado na simulação. Isso acontece porque o modelo de turbulência k-ε não é adequado para modelar escoamentos rotacionais. A fim de resolver este problema, pode-se utilizar um modelo de tensores Reynolds, porém não foi possível obter, com este modelo, convergência da simulação utilizando o programa CFX.

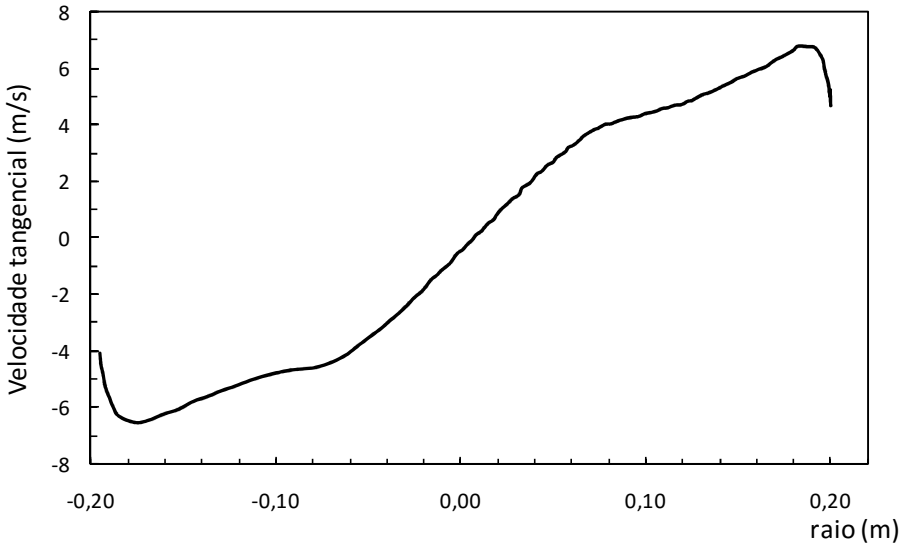


Figura 51 – Velocidade tangencial em função do raio em simulação realizada com o CFX e o modelo k-ε de turbulência.

Utilizando o programa Ansys CFX, foi escolhido o modelo de turbulência SSG e foi utilizado como estimativa inicial o resultado obtido com o modelo de turbulência k-ε, porém a partir de poucas iterações a viscosidade turbulenta divergia. Foram feitas diversas tentativas como modificar o passo de tempo, modificar os parâmetros de relaxação, alterar o esquema de interpolação, porém a simulação sempre divergia.

Decidiu-se, então, utilizar o programa Ansys FLUENT para realizar as simulações com a mesma geometria e malha. Foram feitas simulações transientes utilizando o modelo de turbulência de Gibson e Launder (1978) com diâmetro de gota óleo de 25 μm. As simulações convergiram sem problemas nas primeiras tentativas sem necessitar de resultado inicial, ou seja, a simulação começava com o hidrociclone contendo apenas água. Os resultados dessas simulações encontram-se nas figuras a seguir. A Figura 52 mostra as linhas de corrente para a água no hidrociclone, pode-se observar que o comportamento das linhas é bem mais definido que as simulações feitas pelo CFX utilizando o modelo de turbulência k-ε (Figura 50).

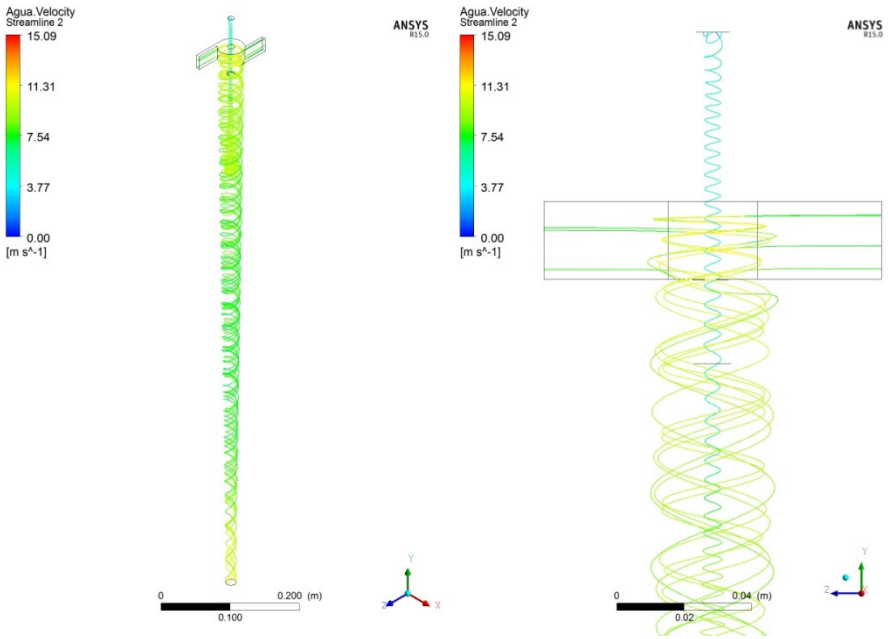


Figura 52 – Linhas de corrente em simulação realizada com o Fluent.

A Figura 53 mostra os resultados para a velocidade tangencial do hidrociclone na seção cônica, o resultado ficou bem próximo do esperado qualitativamente para o hidrociclone (maiores valores de velocidade próxima à região central do equipamento).

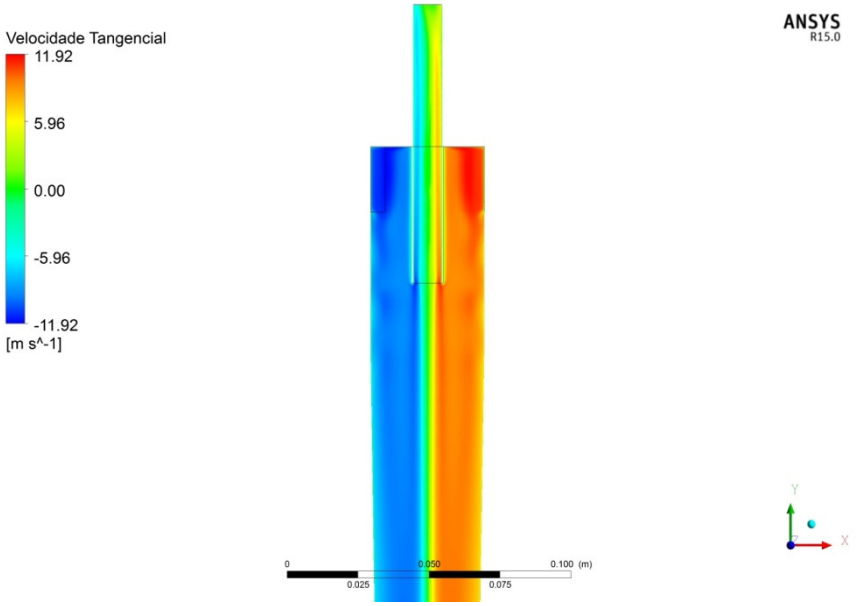


Figura 53 – Velocidade tangencial em simulação realizada com o Fluent.

A Figura 54 e a Figura 55 mostram vetores de velocidade nas saídas do equipamento (*overflow* e *underflow* respectivamente). Pode-se perceber que, devido à condição de contorno

utilizada, houve um espalhamento de água nas saídas e houve um pequeno retorno de fluido na região central. Isto significa que nestas regiões de retorno a simulação calculou uma pressão menor que a pressão atmosférica.

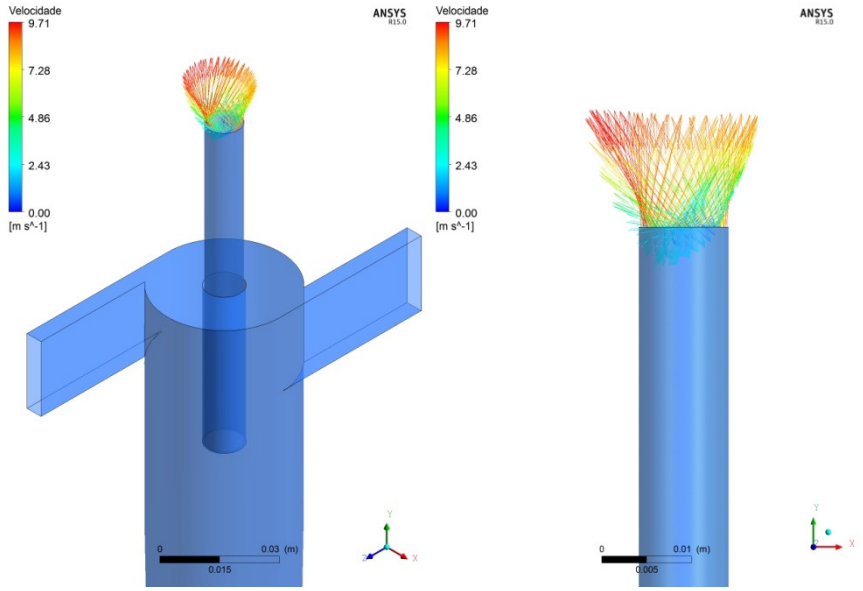


Figura 54 – Vetores de velocidade no *overflow* em simulação realizada com o Fluent.

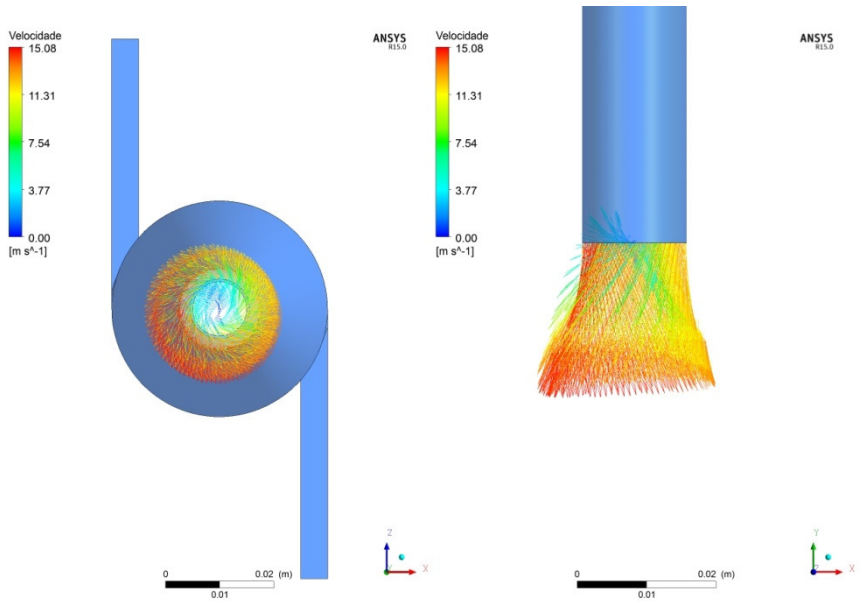


Figura 55 – Vetores de velocidade no *underflow* em simulação realizada com o Fluent.

Cabe ressaltar que a simulação considerou as saídas abertas para a atmosfera e se tivesse algum retorno de fluido, o fluido retornado seria água. Em uma situação real significaria entrada de ar no equipamento que poderia formar um núcleo de ar no interior do hidrociclone. Apesar disto poder afetar a eficiência de separação (Hararah, et al. 2010), a introdução de mais uma

fase na simulação (que se tornaria tri-fásica) e a necessidade de se modelar bem a interface ar/água acrescentaria um enorme grau de dificuldade às simulações. A simplificação utilizada é facilmente justificada pelo fato de que, na produção industrial, o hidrociclone fica sempre cheio de líquido, já que o mesmo não fica aberto para a atmosfera.

De modo a visualizar o escoamento no interior do hidrociclone, a Figura 56 mostra um plano horizontal na região cônica (localizado a 20 cm abaixo da região cilíndrica) dentro do equipamento com vetores de velocidade calculados pela simulação. Pode-se perceber o escoamento circular gerado dentro do equipamento, o fluido gira e é acelerado conforme se aproxima da região central, sendo que a partir de um ponto, a velocidade tangencial volta a diminuir até anular-se no eixo central do equipamento.

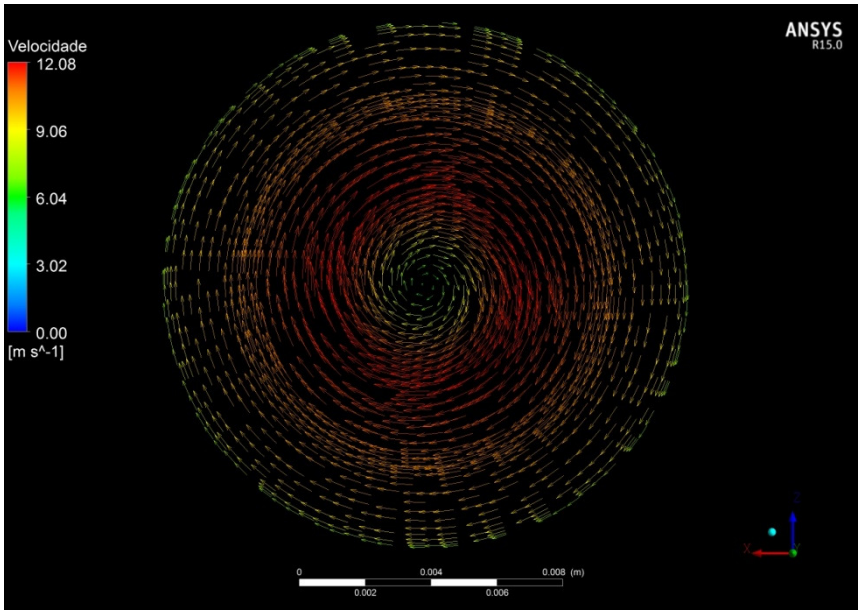


Figura 56 – Vetores de velocidade em um plano na seção cônica em simulação realizada com o Fluent.

A Figura 57 mostra um plano com vetores de velocidades axiais em diferentes posições. O lado esquerdo mostra uma posição na região cônica próxima da região cilíndrica em que se observa que na parte central do equipamento o escoamento é ascendente e na parte mais próxima da parede o escoamento se torna descendente. O lado direito mostra uma posição na região cônica mais próxima do *underflow* em que se observa a mudança do escoamento na parte central, em que todo o escoamento se torna descendente.

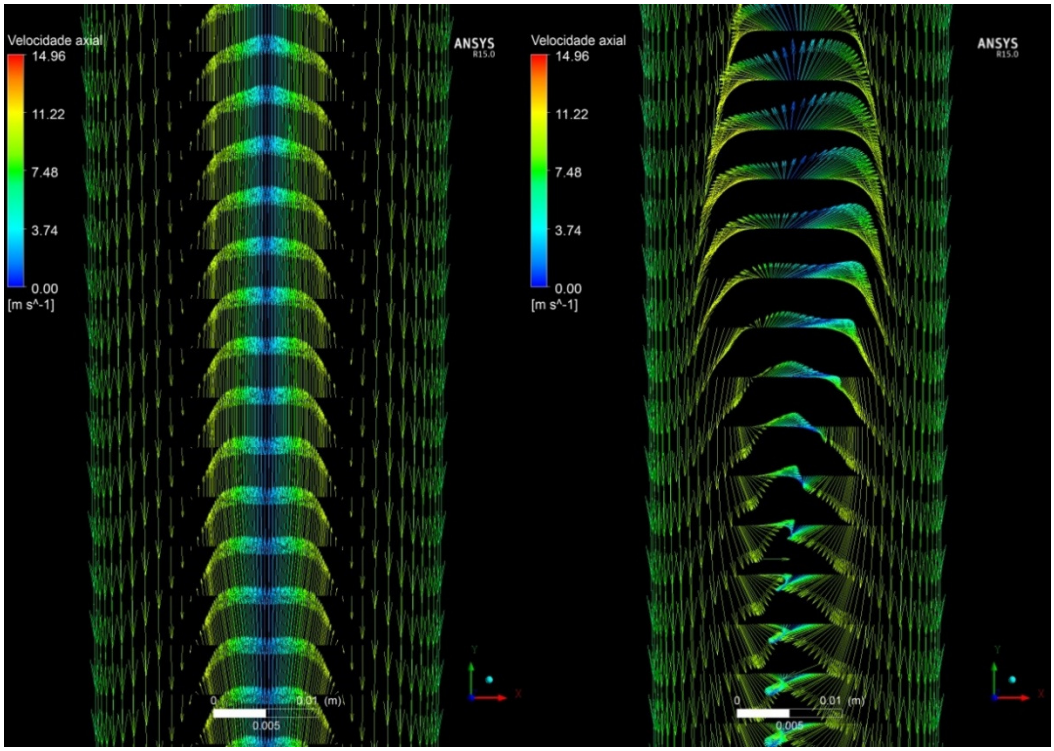


Figura 57 – Vetores de velocidade axial em um plano vertical no centro do hidrociclone em simulação realizada com o Fluent.

Além dos perfis de velocidade, pôde-se estimar a perda de carga no equipamento (Simulação 9 do planejamento de experimentos) como sendo 2,03 bar. A Figura 58 mostra o perfil de pressão em um plano localizado no centro do hidrociclone.

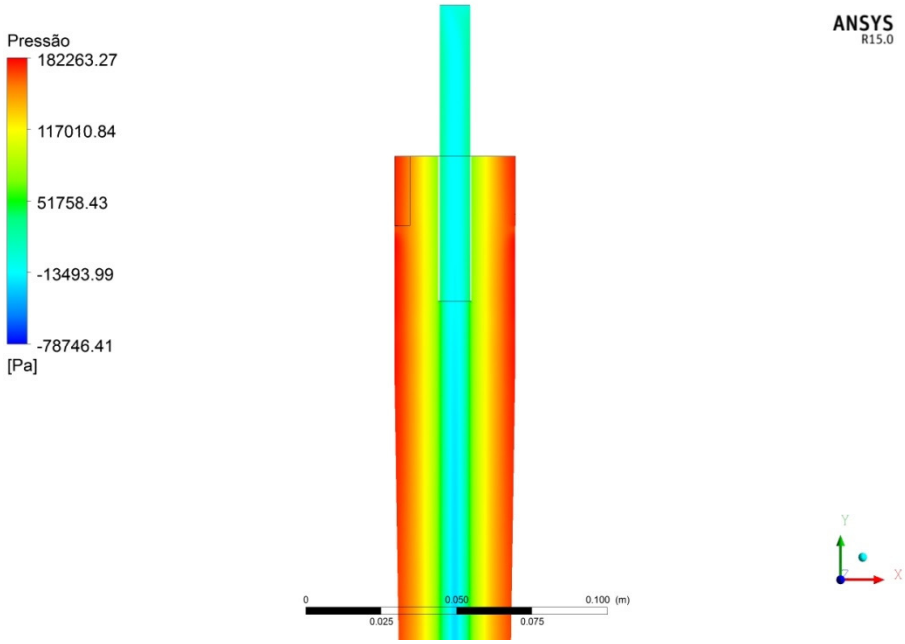


Figura 58 – Perfil de pressão em um plano na região central do hidrociclone da simulação 9 (ponto central do planejamento de experimentos).

Nesta figura observa-se que no centro do hidrociclone há uma pressão manométrica negativa devido ao forte campo centrífugo gerado no equipamento, isto pode explicar o núcleo de ar gerado nas medições experimentais no equipamento conforme mostrado no item 4.2.

Como o objetivo das simulações foi variar proporções geométricas do hidrociclone para obter uma geometria que (dentro da margem estudada) obtenha o máximo de eficiência e o mínimo de razão de fluido, foi realizado o planejamento de experimentos, cujos resultados são apresentados no tópico a seguir.

4.1.1. Resultados do planejamento de experimentos

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes ao planejamento de experimentos composto central rotacional com superfície de resposta. A finalidade é obter um valor de diâmetro de *overflow* e outro valor de diâmetro de *underflow* (nas faixas estipuladas de 5 a 15 mm para o Do e 10 a 20 mm para o Du) de forma a obter a maior eficiência de separação e menor razão de fluido do hidrociclone estudado.

A Tabela 10 mostra as respostas dos fatores analisados no planejamento experimental. As respostas são a razão de fluido (R_f) e a eficiência de separação (G) para o diâmetro de partículas de 25 μm.

Tabela 10 – Resultados do planejamento composto central rotacional.

Simulação	Do (mm)	Du (mm)	Do' (adimensionalizado)	Du' (adimensionalizado)	R_f (%)	G (%)
1	5	10	-1	-1	13,55	67,39
2	5	20	-1	1	1,18	0
3	15	10	1	-1	60,20	97,38
4	15	20	1	1	10,05	13,18
5	2,93	15	-1,41	0	0,19	3,24
6	17,07	15	1,41	0	41,52	83,80
7	10	7,93	0	-1,41	58,30	93,45
8	10	22,07	0	1,41	0,08	0
9	10	15	0	0	13,08	71,91

Com estes resultados é possível analisar estatisticamente os dados com o propósito de obter uma equação para cada variável dependente em relação aos fatores estatisticamente significativos. A forma geral da equação é expressa de acordo com a equação 46.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 Do + \beta_2 Du + \beta_3 Do^2 + \beta_4 Du^2 + \beta_5 DoDu \quad (46)$$

Em que Y é a variável dependente e β_i são as constantes obtidas para os modelos (efeitos). Esta equação pode ser utilizada com as variáveis em sua forma normal ou adimensionalizada com suas respectivas constantes.

A análise ANOVA (do termo em inglês *analysis of variance*) é útil para verificar a significância dos efeitos para cada fator em relação a variável dependente (Calado e Montgomery 2003). A Tabela 11 e a Tabela 12 mostram os resultados da ANOVA com intervalo de confiança de 95% para as respostas G e R_f respectivamente.

Tabela 11 – Análise ANOVA para a variável dependente G com R^2=0,9381

Fatores e Interações	Soma Quadrática do Erro	Graus de Liberdade	F	Nível-p
Do (Linear)	2704,64	1	8,72	0,06
Do (Quadrático)	548,14	1	1,77	0,28
Du (Linear)	10785,43	1	34,76	0,01
Du (Quadrático)	427,70	1	1,38	0,33
Do com Du	11,56	1	0,04	0,86
Erro	930,83	3		
Total Soma quadrática	15036,81	8		

Tabela 12 – Análise ANOVA para a variável dependente R_f com R^2=0,9837

Fatores e Interações	Soma Quadrática do Erro	Graus de Liberdade	F	Nível-p
Do (Linear)	1623,497	1	61,82	0,01
Do (Quadrático)	25,112	1	0,96	0,40
Du (Linear)	2622,974	1	99,88	0,00
Du (Quadrático)	146,992	1	5,60	0,10
Do com Du	356,775	1	13,58	0,03
Erro	78,787	3		
Total Soma quadrática	4841,303	8		

Pode-se notar que para G, o único efeito estatisticamente significante é o termo linear do diâmetro de *underflow*, devido ao valor do nível-p ser menor que 0,05. O termo linear do diâmetro de *overflow* também pode ser considerado estatisticamente significativo, pois o valor de nível-p é próximo de 0,05. A análise foi feita novamente utilizando apenas o modelo linear, porém com isso o valor de R^2 obtido foi de 0,8979 e os desvios relativos ficaram altos. A fim de minimizar este problema, foi utilizado o modelo de segunda ordem. A mesma premissa foi estabelecida para a análise de R_f.

Para confirmar a validade dos dados ANOVA, foi necessário verificar se a distribuição era normal, independente, com média zero e variância constante (Calado e Montgomery 2003). A Figura 59 e a Figura 60 mostram os gráficos de distribuição para as respostas G e R_f respectivamente.

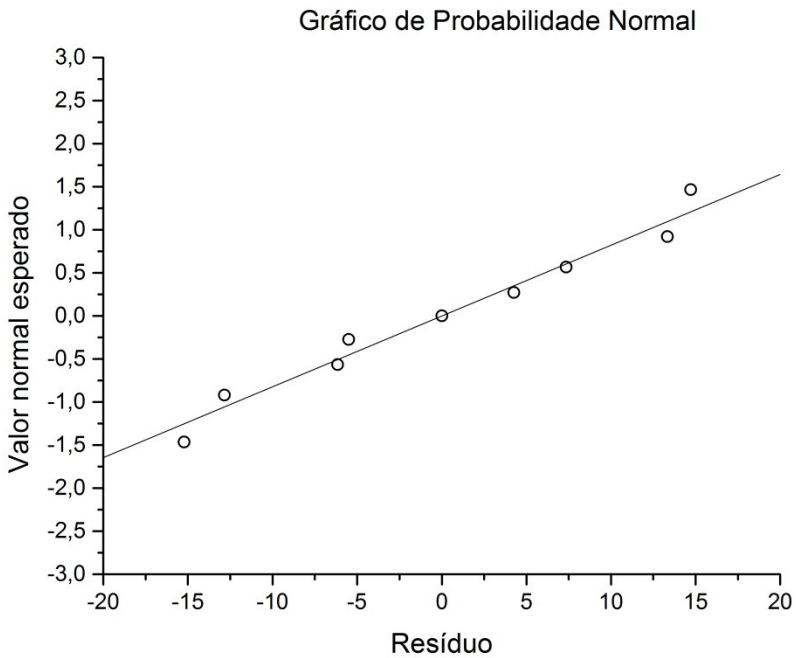


Figura 59 – Distribuição normal para a resposta G.

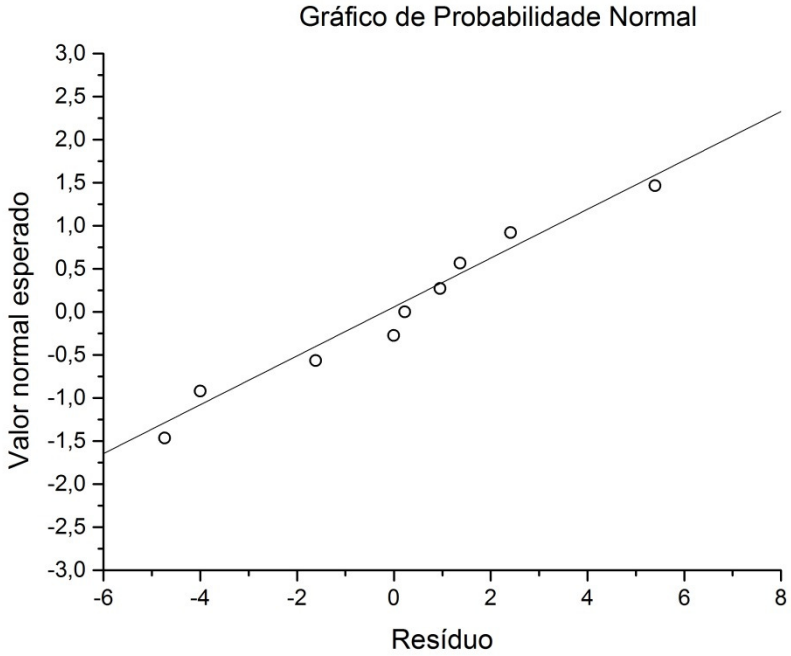


Figura 60 – Distribuição normal para a resposta R_f.

Os pontos obtidos para os resíduos estão próximos da linha reta normal esperada e não apresentam tendência, o que demonstra boa adequação a normalidade e independência dos dados. Para confirmar a normalidade, foi aplicado o teste de Shapiro e Kolmogorov (StatSoft, Inc. 2013). O nível-p (com intervalo de confiança de 95%) do teste de hipótese de normalidade para as respostas G e R_f foram 0,02056 e 0,02549 respectivamente. O que confirma a normalidade da distribuição.

A Figura 61 e Figura 62 mostram o comportamento dos resíduos para G e R_f. Pode ser observado que não há um padrão para os resíduos, indicando variância constante dos erros (Montgomery 2012).

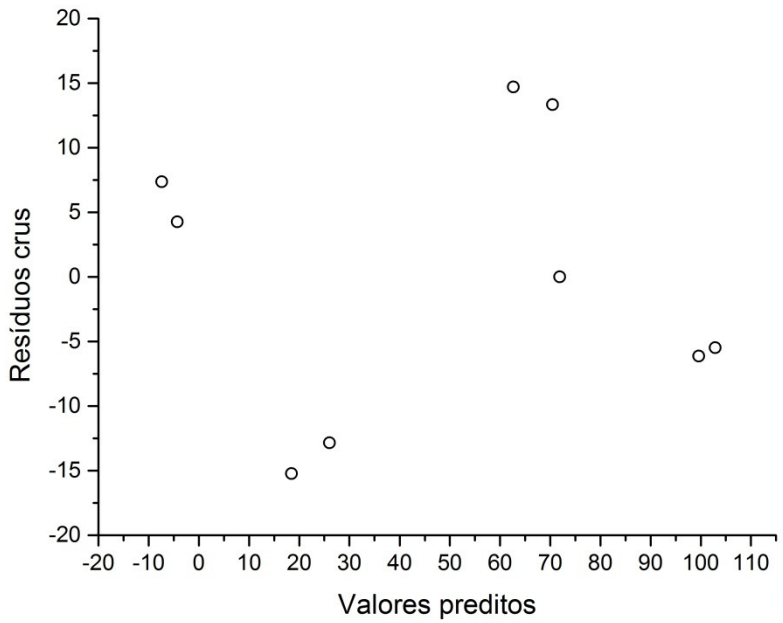


Figura 61 – Comportamento padrão para os gráficos de resíduos para a resposta G.

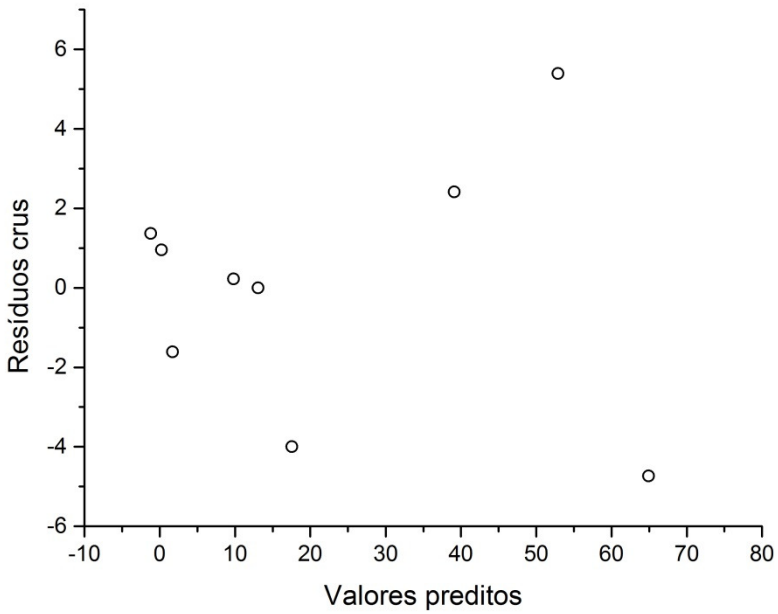


Figura 62 – Comportamento padrão para os gráficos de resíduos para a resposta R_f.

A Figura 63 e Figura 64 mostram o diagrama de Pareto (Montgomery 2012), indicando que o coeficiente linear de Du é o efeito que mais influencia negativamente a eficiência de separação e a razão de fluido. O coeficiente linear de Do é o segundo maior e possui efeito

positivo conforme mostra a Tabela 13 e Tabela 14. É possível concluir que aumentar o valor de Do aumenta os valores de G e R_f, percebe-se também que aumentar o valor de Du diminui G e R_f.

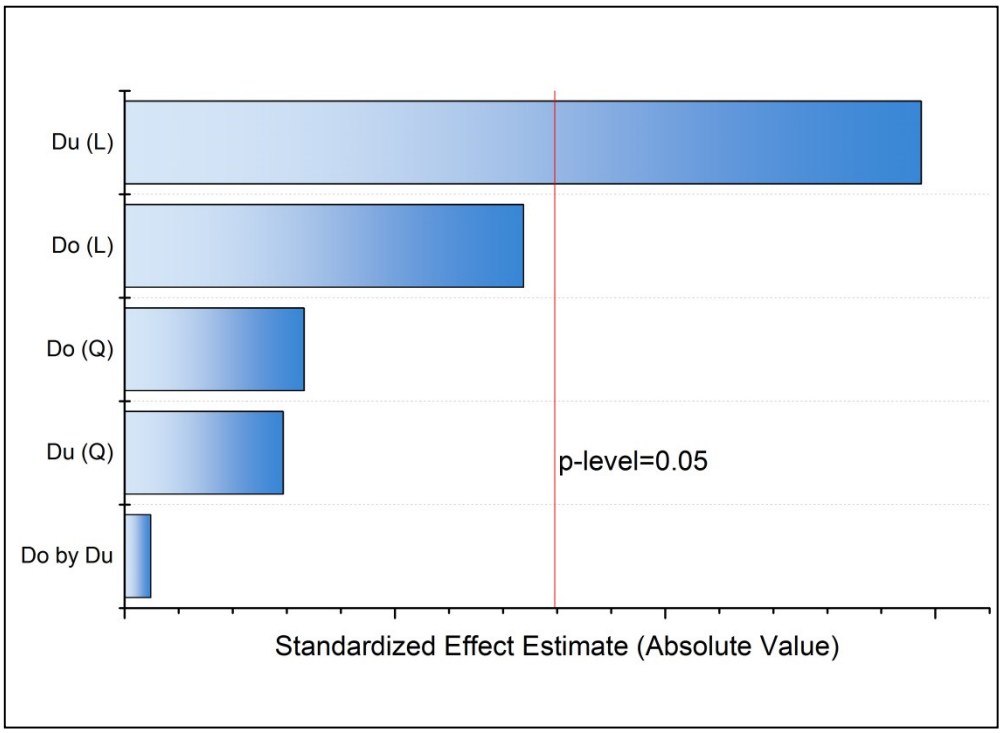


Figura 63 – Diagrama de Pareto para G.

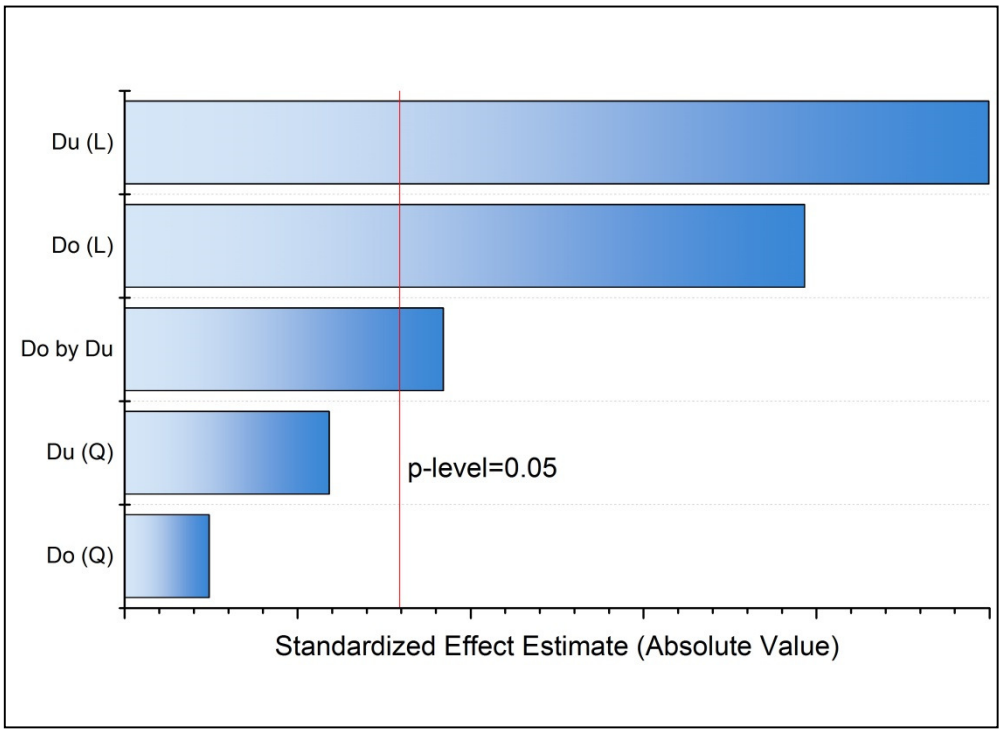


Figura 64 – Diagrama de Pareto para R_f.

Tabela 13 – Coeficientes de regressão para a resposta G.

Fatores	Coeficientes (β_x)	Erro Padrão
Constante	71,91	17,61
Do (Linear)	18,39	6,23
Do (Quadrático)	-13,73	10,33
Du (Linear)	-36,72	6,23
Du (Quadrático)	-12,13	10,33
Interação Do com Du	-1,70	8,81

Tabela 14 – Coeficientes de regressão para a resposta R_f.

Fatores	Coeficientes (β_x)	Erro Padrão
Constante	13,09	5,12
Do (Linear)	14,25	1,81
Do (Quadrático)	2,94	3,01
Du (Linear)	-18,11	1,81
Du (Quadrático)	7,11	3,01
Interação Do com Du	-9,44	2,56

As equações 47 e 48 foram montadas com os coeficientes de regressão (β_x) das tabelas Tabela 13 e Tabela 14 para G e R_f. Estas são equações estatísticas que podem ser utilizadas para quantificar os efeitos de Do e Du em G e R_f. A fim de encontrar o valor máximo e pontos de sela para as equações podem ser plotados gráficos de superfícies para as respostas (Figura 65 e Figura 66).

$$G = 71{,}9079 + 18{,}3883Do - 36{,}7203Du - 13{,}7292Do^2 - 12{,}1274Du^2 - 1{,}6997DoDu \quad (47)$$

$$S_R = 13{,}0863 + 14{,}2467Do - 18{,}1086Du + 2{,}9386Do^2 + 7{,}1096Du^2 - 9{,}4442DoDu \quad (48)$$

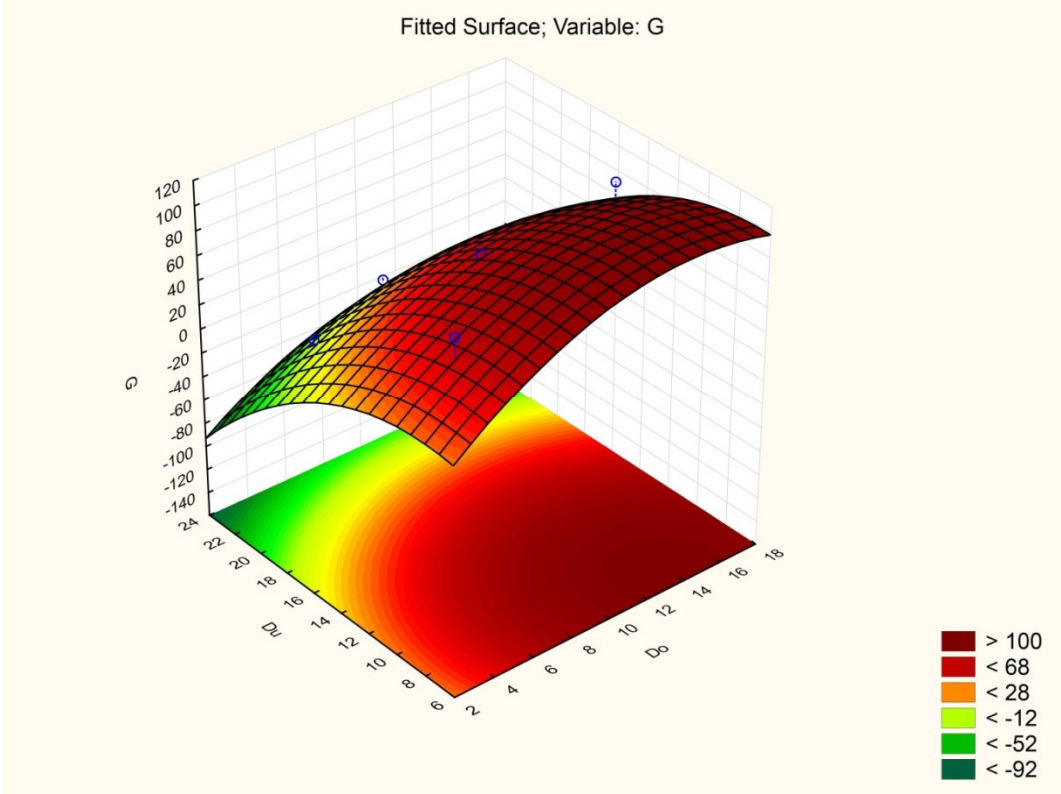


Figura 65 – Superfície de respostas para G.

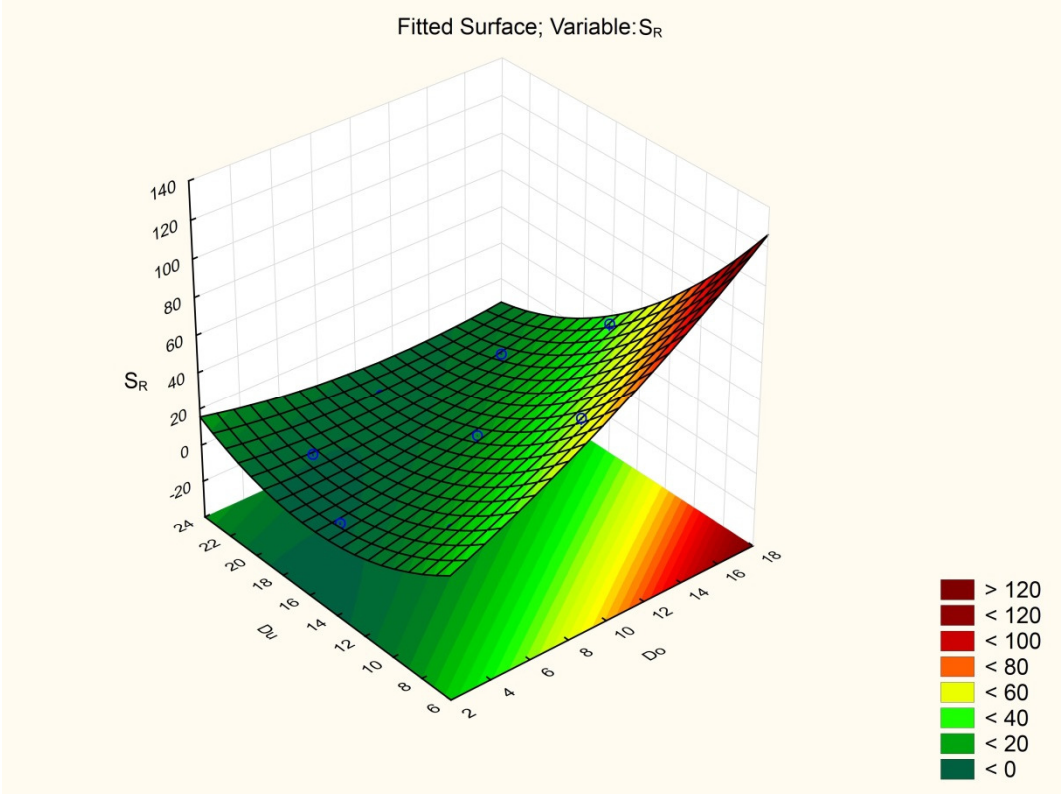


Figura 66 – Superfície de respostas para R_f.

Estes gráficos não possuem pontos de sela, mas indicam que para um par de valores de Do e Du existe um máximo local para G, para outro par de valores de Do e Du existe um mínimo local para R_f.

Com a finalidade de encontrar os valores de Do e Du que maximizam G e minimizam R_f simultaneamente foram utilizadas funções de desejabilidade. Para utilizar estas funções, primeiramente é necessário especificar um peso de desejabilidade, em que 0 é indesejável e 1 é desejável. Os pesos individuais de desejabilidade para os valores preditos para cada variável dependente são combinados computando suas médias geométricas (StatSoft, Inc. 2013). Neste trabalho os pesos de desejabilidade escolhidos para a variável G foram 0 para 0% e 1 para 100%, os pesos para a variável R_f foram 1 para 0% e 0 para 100%.

A Figura 67 mostra os resultados das funções de desejabilidade para a eficiência de separação para um tamanho de partícula de 25 μm e razão de fluido. De acordo com o gráfico, o valor de diâmetro de *overflow* que maximiza a eficiência de separação e minimiza a razão de fluido é 10 mm e o valor de Du que tem o mesmo efeito em G e R_f é 15 mm. Estes são os valores do ponto central do planejamento de experimentos.

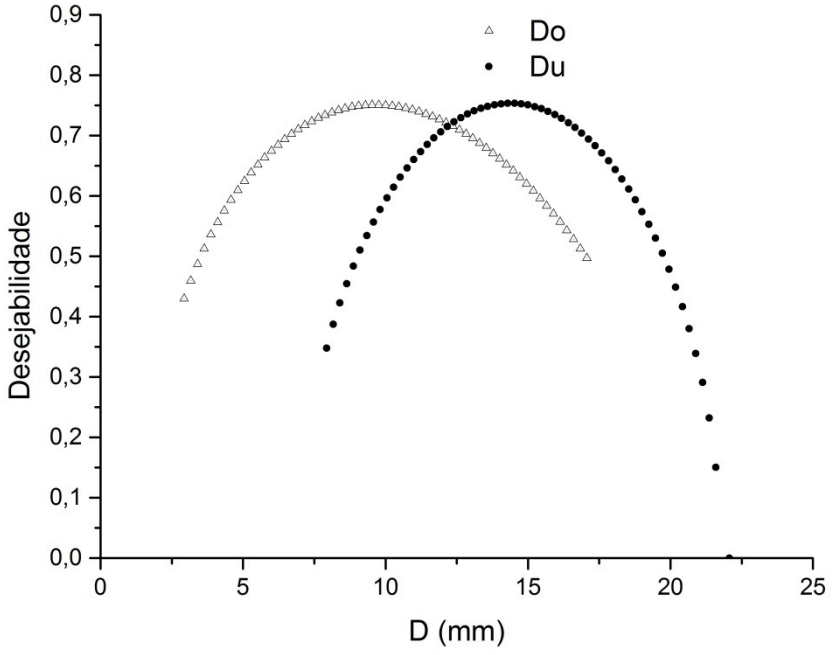


Figura 67 – Função de desejabilidade para G e R_f.

Os valores de 10 e 15 mm para Do e Du resultam em 13,08% de razão de fluido, 71,91% de eficiência de separação para uma gota de óleo com diâmetro de 25 μm e 67,68% de eficiência de separação reduzida para uma gota de óleo com mesmo diâmetro.

Escolhida a geometria, pode-se analisar a eficiência total de separação e eficiência total de separação reduzida conforme mostra o tópico a seguir.

4.1.2. Análise das eficiências de separação

Após a análise de eficiência de separação e razão de fluido para o diâmetro de gota de óleo de 25 μm, foram feitas simulações variando o diâmetro das gotas de óleo de modo a obter as curvas de eficiência granulométrica (G) e eficiência granulométrica reduzida (G') em função do diâmetro de gotas d. Foram simulados os diâmetros de partículas de 5, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 75, 100, 150 e 250 μm. A Figura 68 mostra a fração volumétrica de óleo para os diâmetros de gotas de 5, 10, 20 e 100 μm na região do overflow.

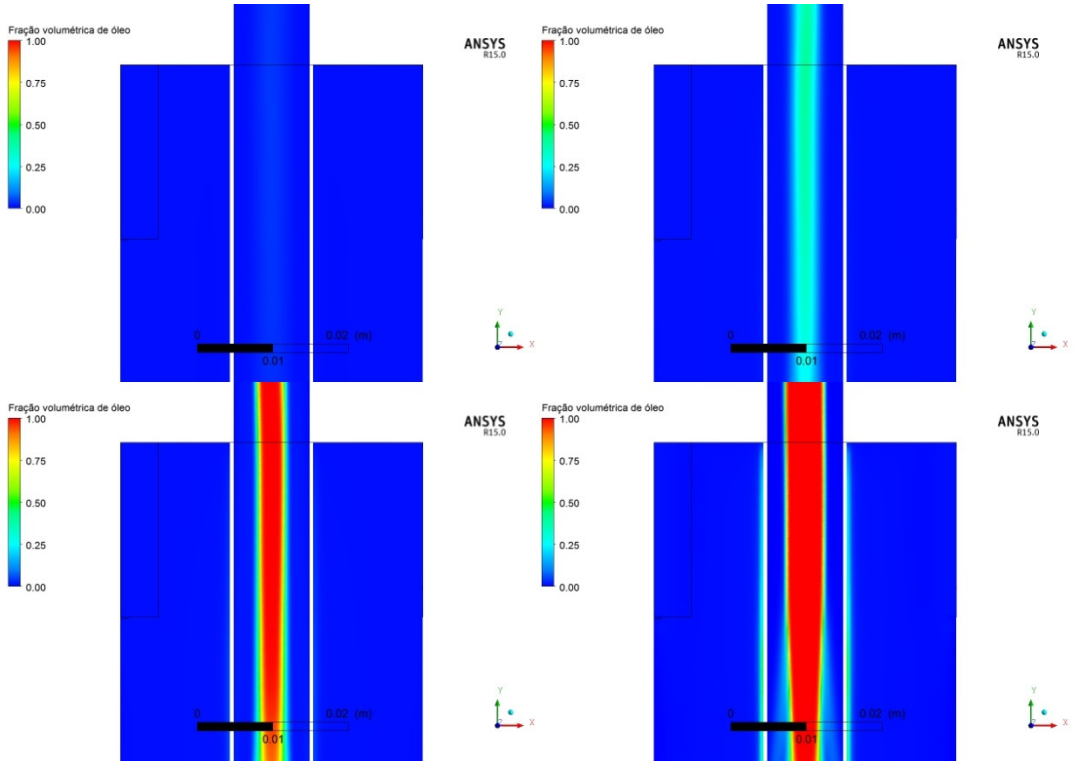


Figura 68 – Fração volumétrica de óleo no *overflow* para os diâmetros de gotas de 5, 10, 20 e 100 μm.

Como esperado, a eficiência de separação aumenta com o aumento do diâmetro de gotas. Para gotas de 5 μm praticamente nenhum óleo sai no *overflow*, mas, à medida que se aumenta o diâmetro de gotas, o óleo se concentra no centro do hidrociclone e sai pelo *overflow*. Com o diâmetro de 100 μm praticamente todo o óleo sai pelo *overflow*, obtendo-se eficiência granulométrica de 99,74%, conforme mostra a Tabela 15.

Tabela 15 – Eficiência granulométrica (G), razão de fluido (R_f) e eficiência granulométrica reduzida (G') para os diâmetros de gota de óleo simulados.

Tamanho da partícula (μm)	G (%)	R_f (%)	G' (%)
5	16,6	13,7	3,4
10	27,2	13,6	15,8
15	41,4	13,4	32,4
20	58,8	13,5	52,3
25	71,9	13,1	67,7
40	95,6	12,9	94,9
50	98,4	12,9	98,1
75	99,7	12,9	99,7
100	99,7	12,9	99,7
150	99,6	12,9	99,5
250	99,4	12,9	99,6

A Figura 69 e Figura 70 mostram os resultados obtidos para a eficiência granulométrica (G) e eficiência granulométrica reduzida (G'), respectivamente.

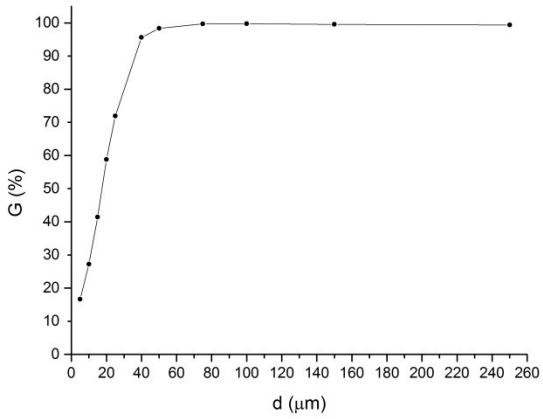


Figura 69 – Curva de eficiência granulométrica por diâmetro de gotas.

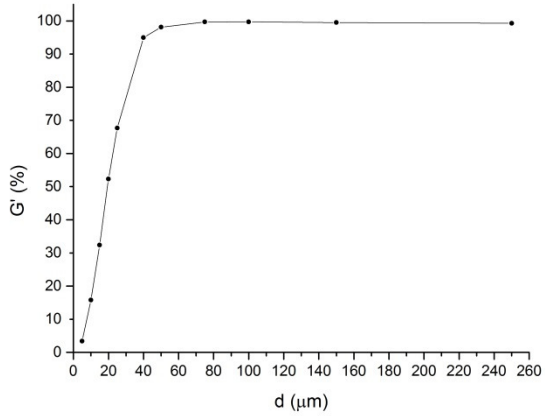


Figura 70 – Curva de eficiência granulométrica reduzida por diâmetro de gotas.

A partir da Figura 70, pode-se obter o diâmetro de corte reduzido d'_{50} (tamanho de gota que tem 50% de eficiencia granulométrica reduzida) no hidrociclone, sendo o mesmo aproximadamente 20 μm. Assim, é possível se calcular o parâmetro n da equação de Rosin-Rammler modificada (equação 6).

Para calcular o parâmetro n, foi necessário fazer uma regressão linear a partir da linearizarização da equação 6, resultando na equação 7 conforme explicitado no capítulo 2 deste texto. A linearização obteve um coeficiente de correlação R^2=0,9972 e o valor obtido do parâmetro n foi de 2,1 que pode ser substituído na equação 7, gerando a equação 49.

$$\ln\left(-\ln(1-G')\right) = -0{,}3809 + 2{,}1 \cdot \ln\left(\frac{d}{d'_{50}}\right) \tag{49}$$

Para se estimar a eficiência total de separação é necessário empregar a equação 11 que é a integração da eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro de gotas (equação 6) com o parâmetro n obtido. Empregando-se a distribuição de tamanhos típica de óleo presente em águas oleosas de refinaria fornecida pela Petrobras no início deste projeto (modelo RRB com parâmetros k e m de 160 μm e 2,51 respectivamente), pode-se estimar a eficiência reduzida total de separação a partir da equação 50.

$$E'_T = \int_0^1 1 - \exp\left[-0{,}693\left(\frac{160\,(-\ln(1-y)^{\frac{1}{2{,}51}}}{20}\right)^{2{,}1}\right]dy \tag{50}$$

Com isso a eficiência total de separação (E_T) foi igual a 99,02% e a eficiência total de separação reduzida (E'_T) foi igual a 98,86%. Mostrando que o hidrociclone simulado é eficaz na separação de águas oleosas de refinaria.

4.2. Resultados Experimentais

Os experimentos para determinação do perfil de velocidades tangenciais do hidrociclone otimizado foram realizados apenas com água e a Figura 71 mostra fotografias do escoamento dentro do hidrociclone de acrílico iluminadas com uma luz vermelha para facilitar a visualização. Pode-se observar a formação de um núcleo de ar dentro do equipamento (*Air core*).

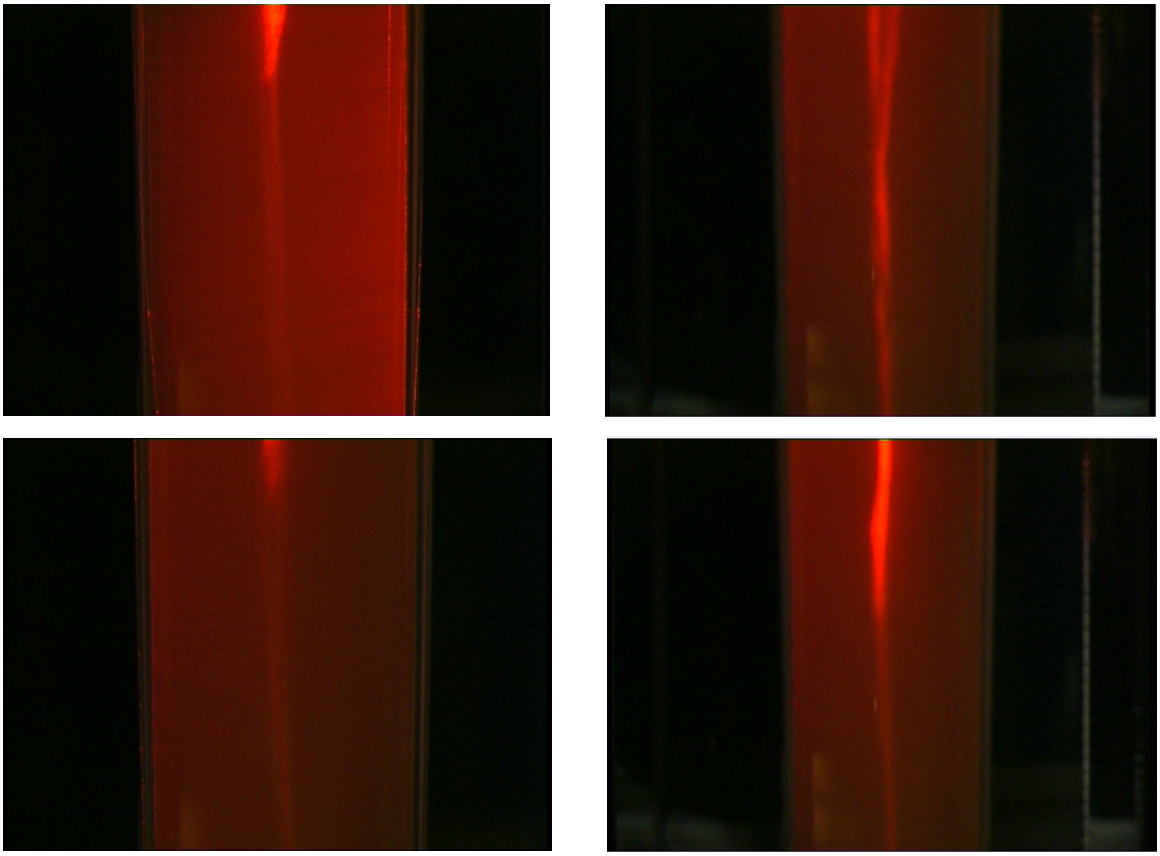


Figura 71 – Fotografias do escoamento da água no hidrociclone.

Nos experimentos a queda de pressão medida entre as entradas e saídas foi de 2,1 bar, o que validou a simulação que teve como resultado a perda de carga de 2,03 bar (A Figura 72 mostra a curva construída de ΔP contra vazão total de entrada no hidrociclone para os dados experimentais), tendo assim um desvio de 4,8% em relação aos dados experimentais.

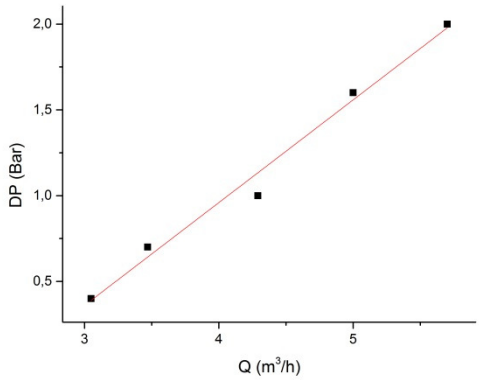


Figura 72 – ΔP contra vazão total de entrada no hidrociclone obtidos nos ensaios experimentais.

Inicialmente, para determinar o perfil de velocidades, foi utilizada a técnica *LDV*. A Figura 73 mostra um perfil de velocidades tangenciais simulado com CFD (utilizando o Ansys fluent com o modelo de turbulência Gibson e Launder) e com velocidades medidas experimentalmente utilizando a técnica de LDV, em uma posição 62,8 cm abaixo do final da seção cilíndrica.

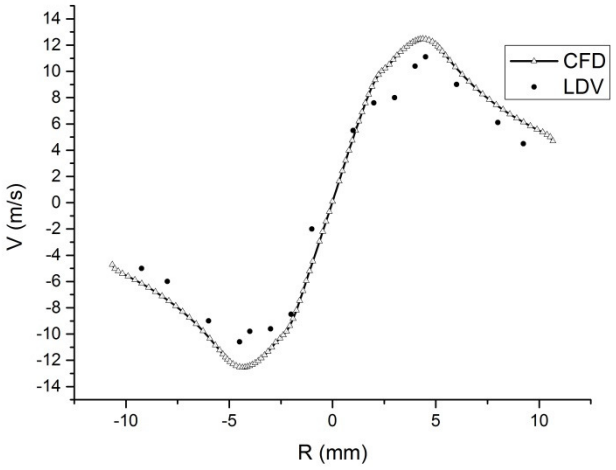


Figura 73 – Perfil de velocidades tangenciais: comparação dos resultados simulados com os dados experimentais.

Pode-se observar que há uma pequena superestimação dos valores simulados para os medidos experimentalmente, mas mostra uma boa adequação da simulação.

A técnica de LDV apresentou grande dificuldade para se obter pontos experimentais, devido ao efeito de curvatura do hidrociclone, pois pelo acrílico ter um índice de refração

diferente do ar, a trajetória dos raios lasers na seção cônica variava muito, dificultando consideravelmente o cruzamento dos raios e gerando uma incerteza no local exato da medição. Com isso, foram obtidos 16 resultados experimentais em apenas uma linha radial.

A técnica do PIV é muito mais robusta, pois a calibração é feita com um alvo de calibração dentro do equipamento com fluido e são tiradas fotos a fim de conhecer as coordenadas exatas do equipamento assim como corrigir automaticamente os efeitos de curvatura apresentados no protótipo.

A Figura 74 mostra duas imagens geradas em sequência para a medição do perfil de velocidades tangenciais.

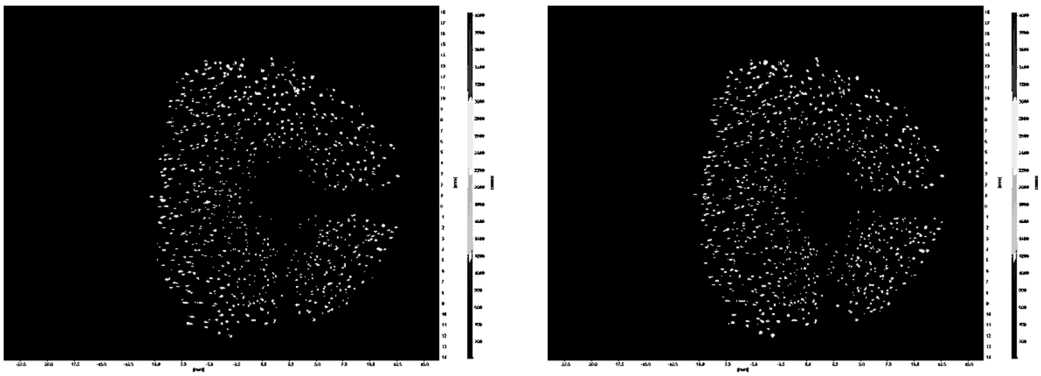


Figura 74 – Par de imagens obtidas em sequência para medir o perfil de velocidades tangenciais.

A Figura 74 mostra que, no centro do equipamento, há a formação de um núcleo de ar, sendo que a unidade experimental estava abaixo do nível do tanque e todo o sistema foi "sangrado" diversas vezes. Apesar destes cuidados, em todos os experimentos, sempre surgiu este núcleo de ar.

Uma possível explicação para a formação deste núcleo central de ar pode ser encontrada nos resultados simulados. Nestes, pôde-se observar que no centro do equipamento há regiões com pressão manométrica negativa, chegando-se até o valor de -0,8 bar (ou pressão absoluta de 0,21 bar, abaixo, portanto, da pressão atmosférica de 1,013 bar). Isto pôde fazer com que o ar dissolvido na água se desprendesse, formando o núcleo de ar.

A partir das fotos obtidas para o experimento (foram utilizadas 2000 pares de fotos para cada perfil de velocidade), foi possível calcular os vetores dos perfis de velocidades axiais e tangenciais.

A fim de comparar valores experimentais com valores obtidos por simulação em CFD, foram escolhidas algumas linhas em diferentes posições do equipamento para medir os perfis de velocidade conforme mostrado na Figura 75.

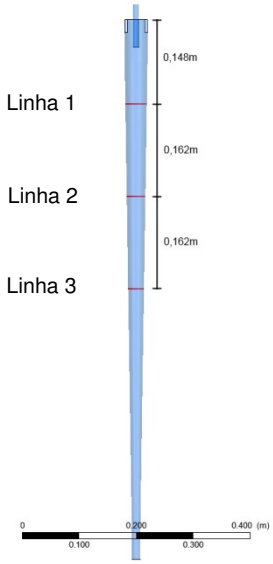


Figura 75 – Posições das medições experimentais e simuladas em três sessões.

Na posição da linha 1, foi medido experimentalmente o perfil de velocidades tangenciais, a Figura 76 mostra um par de imagens obtidas em sequência para o experimento.

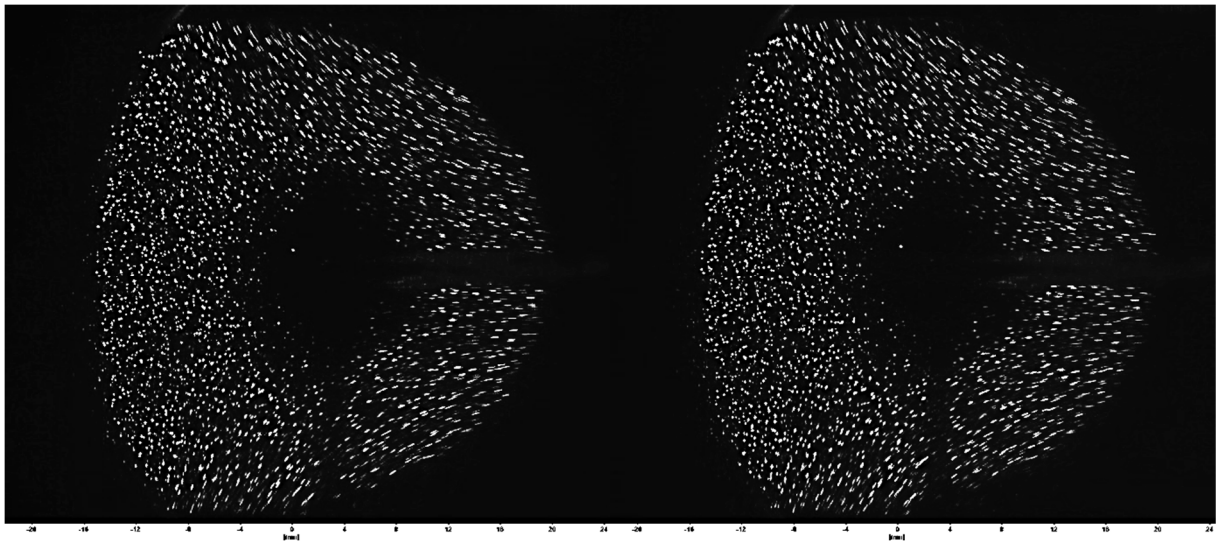


Figura 76 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade tangenciais utilizando a técnica PIV na seção 1.

Observa-se que nas regiões circular superior e inferior às partículas não estão muito bem focadas, isso ocorre porque a câmera estava inclinada 30º em relação ao hidrociclone e mesmo

usando o *Scheimpflug* não foi possível obter toda a imagem bem focada. Na parte da direita pode-se observar que devido à presença do núcleo de ar, há uma sombra na imagem. Por estes motivos estas regiões não foram utilizadas para a comparação dos dados experimentais com os dados simulados.

A partir destas fotos pode-se verificar o deslocamento das partículas de uma imagem para a outra e através das técnicas de interpretação do *software* foram calculados vetores de velocidade instantânea conforme mostra a Figura 77 para quatro pares de imagens.

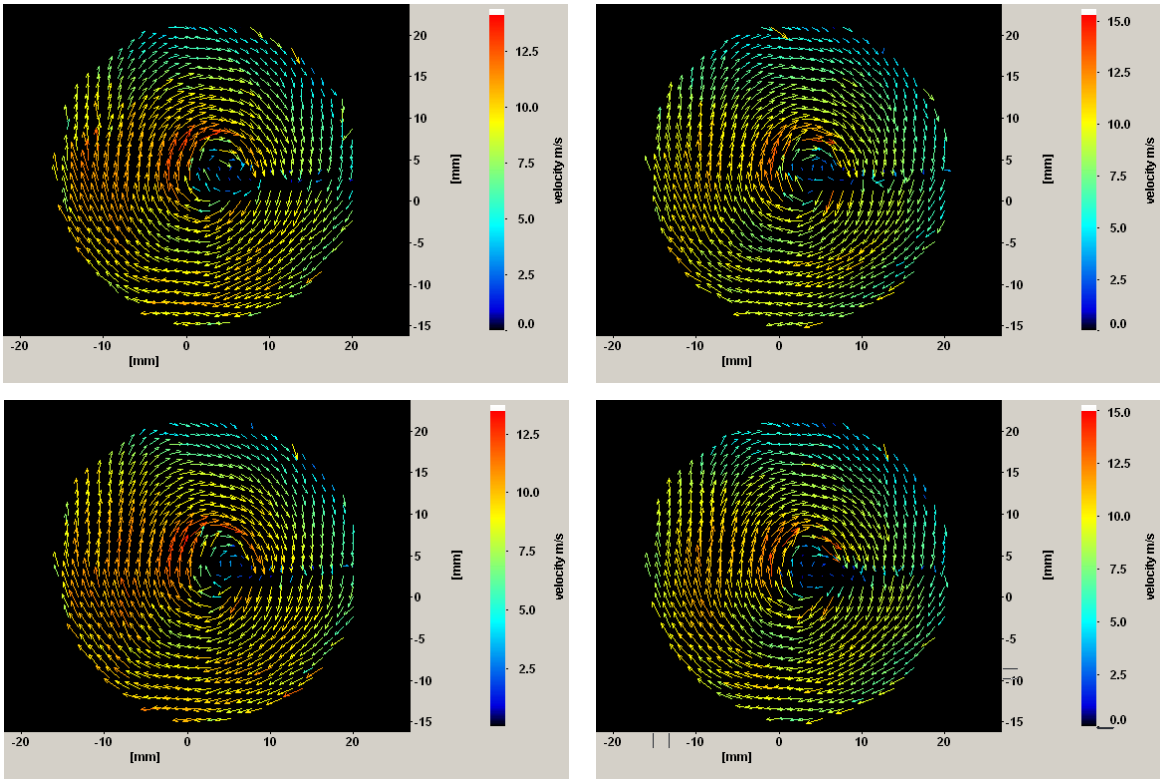
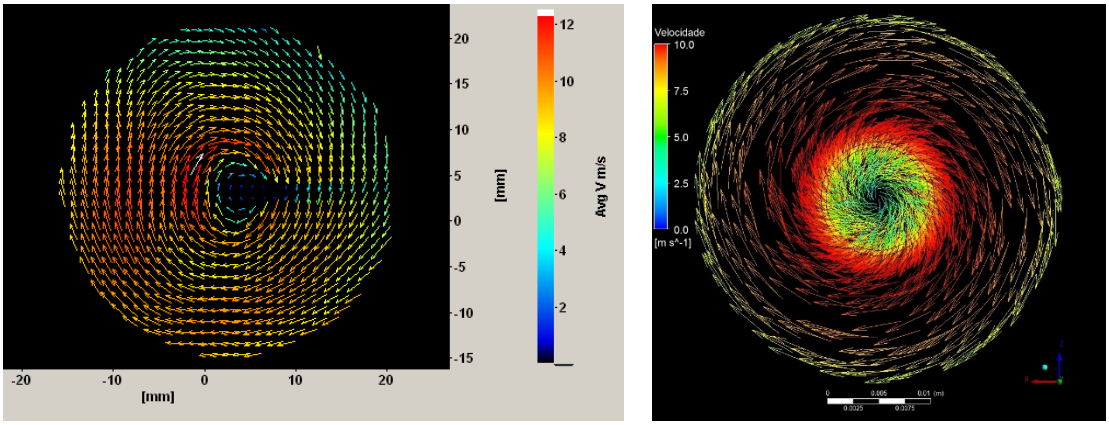


Figura 77 – Vetores de velocidade instantânea para quatro pares de imagens obtidas em sequencia utilizando a técnica PIV na seção 1.

Com todos os vetores de velocidade instantânea criados podem-se obter os vetores de velocidade média mostrado na Figura 78-A. Era de se esperar que os vetores fossem uniformes como nas simulações obtidas, porém conforme dito anteriormente, pode-se dizer que a região da esquerda possui informações quantitativas exatas enquanto nas outras regiões deve apenas ter uma análise qualitativa.



A) B)

Figura 78 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 1).

Pode-se observar que a simulação tem um comportamento semelhante aos dados obtidos pelo PIV em que há aumento da velocidade na região próxima do centro do equipamento e velocidade nula no centro.

Para comparar melhor os dados obtidos, foram plotados em um gráfico (Figura 79) os perfis de velocidades tangenciais calculados pela simulação e obtidos experimentalmente com o PIV ao longo da posição radial (linha 1).

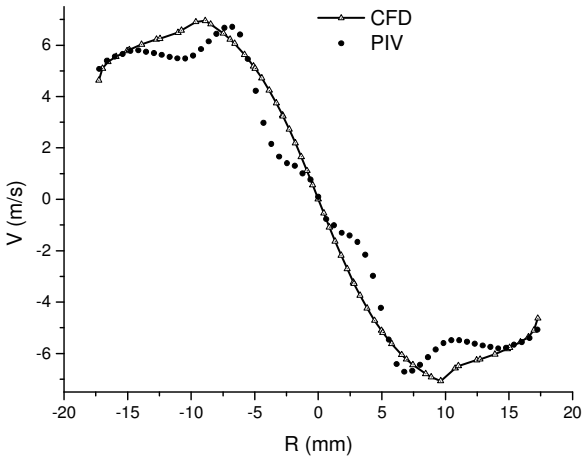


Figura 79 – Perfis de velocidades tangenciais simulado e experimental medidos na linha 1.

Observa-se que há uma boa concordância dos dados simulados com os experimentais, em que a simulação tem o pico de velocidade deslocado um pouco para a direção da parede (cerca de 2 mm).

Na posição da linha 2, foi medido experimentalmente o perfil de velocidades tangenciais e axiais, a Figura 80 mostra um par de imagens obtidas em sequência para o experimento.

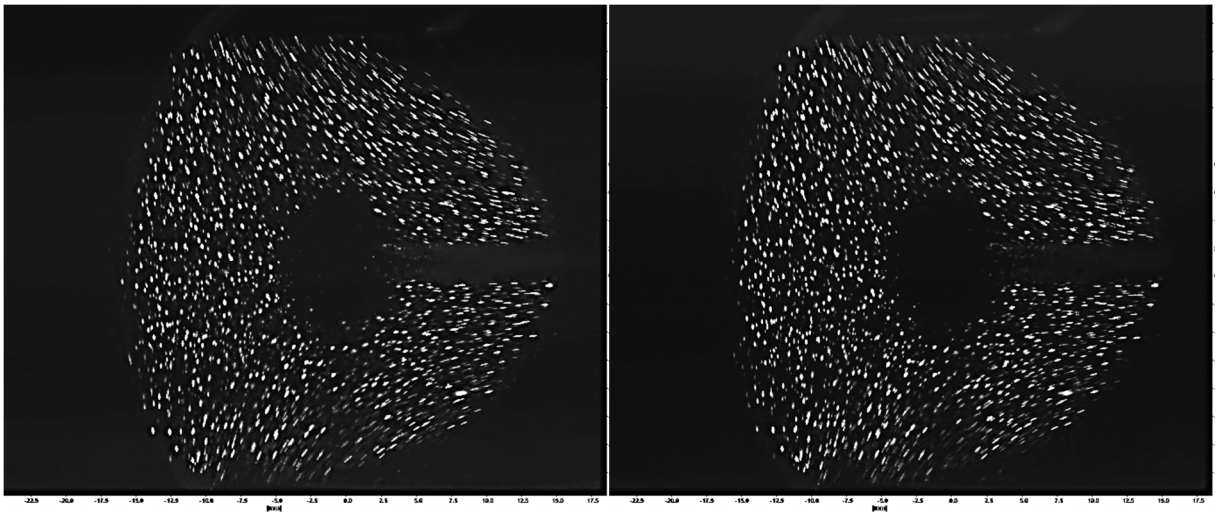
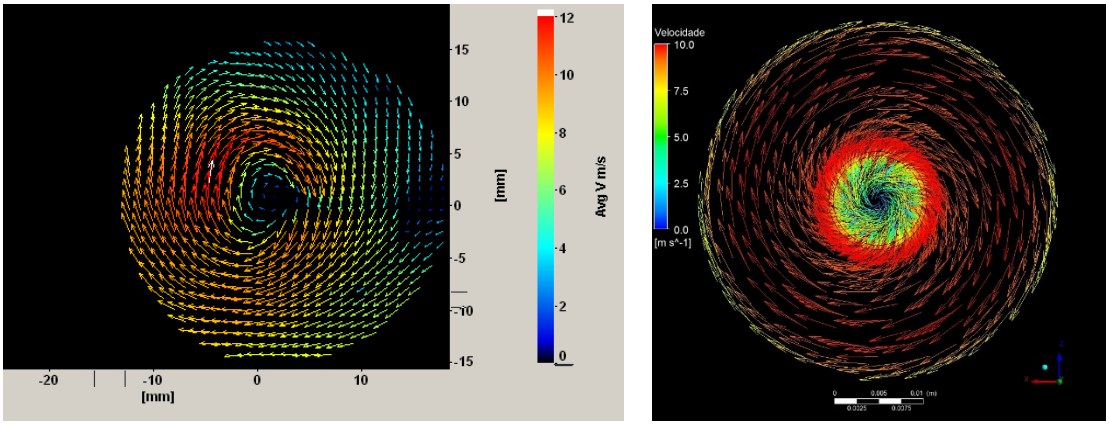


Figura 80 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade tangenciais utilizando a técnica PIV na seção 2.

Da mesma forma que na seção 1 observa-se que nas regiões circular superior e inferior às partículas não estão muito bem focadas, percebe-se também que na parte da direita há uma sombra na imagem. Por estes motivos estas regiões não foram utilizadas para a comparação dos dados experimentais com os dados simulados.

A partir destas fotos foram calculados vetores de velocidade instantânea que deram origem aos vetores de velocidade média mostrado na imagem da esquerda da Figura 81. Assim como na região 1, era de se esperar que os vetores fossem uniforme como nas simulações obtidas, porém conforme dito anteriormente, pode-se dizer que a região da esquerda possui informações quantitativas exatas enquanto nas outras regiões deve apenas ter uma análise qualitativa.



A) B)

Figura 81 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 2).

Assim como na seção 1, pode-se observar que a simulação tem um comportamento semelhante aos dados obtidos pelo PIV em que há aumento da velocidade na região próxima do centro do equipamento e velocidade nula no centro. Foram plotados em um gráfico (Figura 82) os perfis de velocidades tangenciais calculados pela simulação e obtidos experimentalmente com o PIV ao longo da posição radial (linha 2).

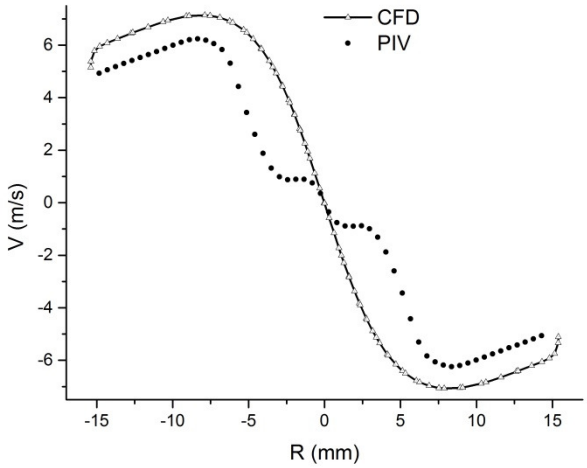


Figura 82 – Perfis de velocidades tangenciais simulado e experimental medidos na linha 2.

Observa-se que nesta seção também há uma boa concordância dos dados simulados com os experimentais, porém os dados obtidos por simulação superestimam um pouco os dados experimentais obtendo desvios maiores em relação a seção 1.

Para esta seção foram medidos também dados experimentais de velocidades axiais. A Figura 83 mostra um par de imagens obtidas em sequência para o experimento.

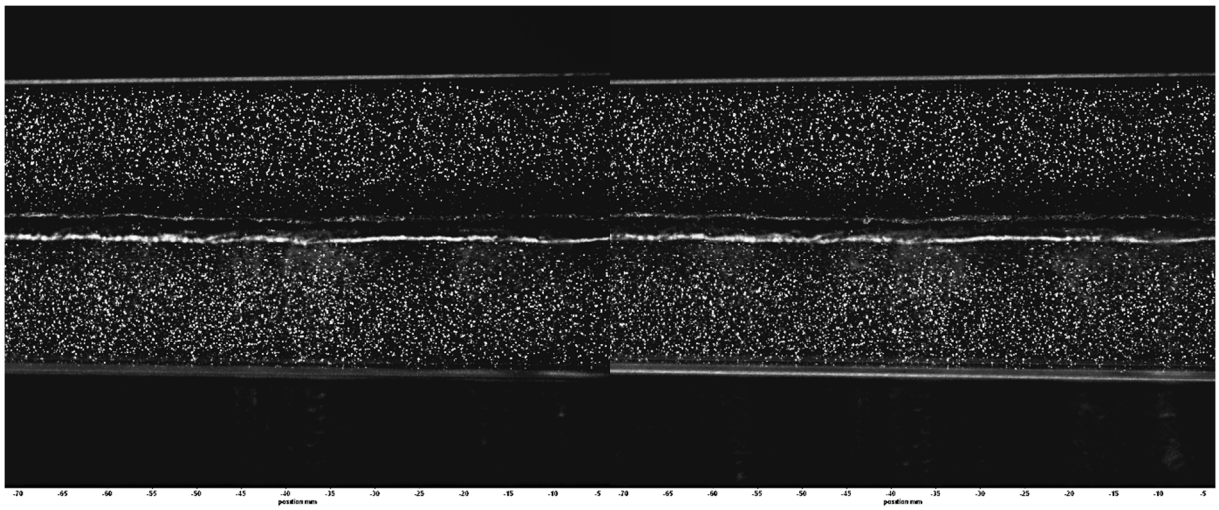
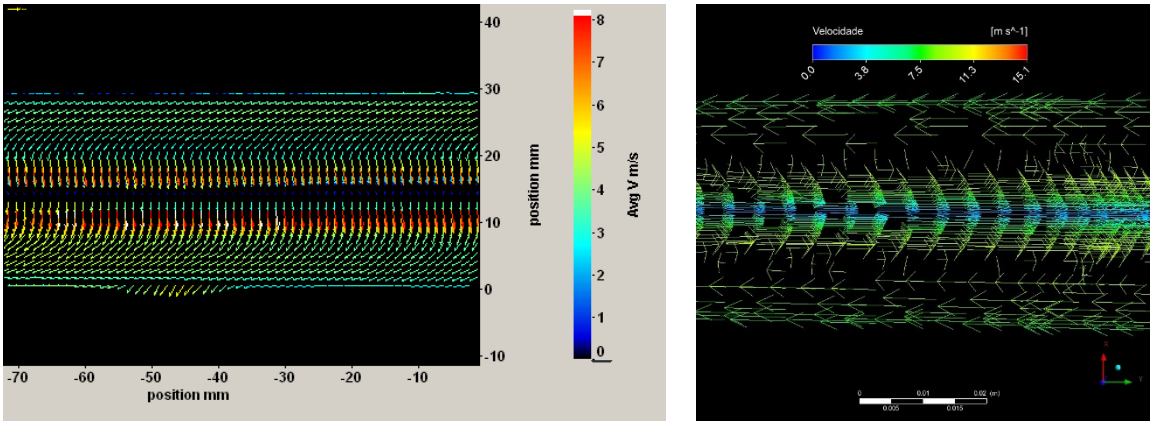


Figura 83 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidades axiais utilizando a técnica PIV na seção 2.

A partir destas fotos, da mesma forma que no perfil de velocidades axiais pode-se verificar o deslocamento das partículas de uma imagem para a outra e através das técnicas de interpretação do software foram formados vetores de velocidade instantânea que deram origem aos vetores de velocidade média mostrados na imagem da esquerda da Figura 84.



A) B)

Figura 84 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 2).

Percebe-se que no centro não há vetores, pois o núcleo de ar não possibilitou medir nesta região, portanto os pequenos vetores azuis na região central são ruídos da imagem. O escoamento próximo da parede, assim como na simulação é descendente e há mudança de sentido na região central, porém, observa-se que na direção radial todos os vetores apontam para a mesma direção, o que é fisicamente incoerente. Isto se deve porque a componente radial é menor que a componente axial, com isso não foi possível adequar o intervalo de tempo entre as fotos para capturar ambas as componentes. Como para a separação do equipamento o mais importante é a componente axial, então o intervalo de tempo foi ajustado de modo a permitir a medição correta da velocidade axial.

A Figura 85 mostra um plano de velocidade axial medido experimentalmente. De forma a comparar com os dados simulados, foi plotado em um gráfico (Figura 86) os perfis de velocidades axiais experimentais e simulados na linha 2.

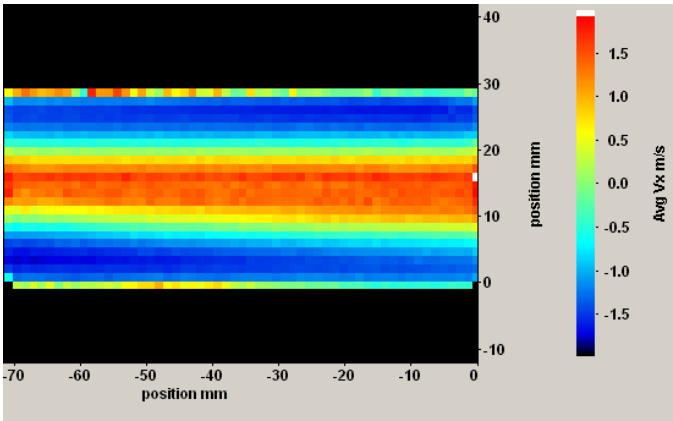


Figura 85 – Plano de velocidade média axial na seção 2 utilizando a técnica PIV.

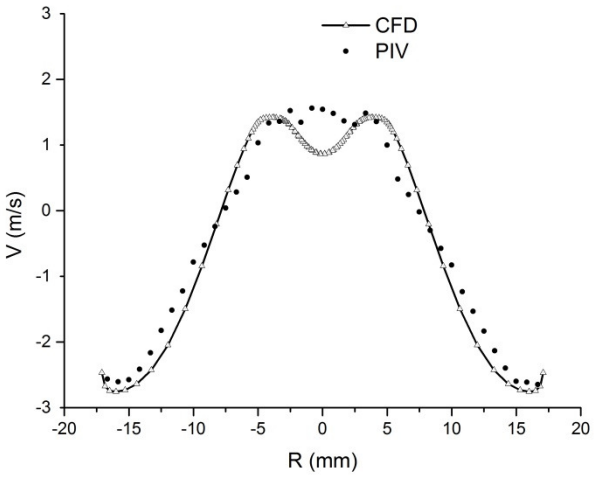


Figura 86 – Perfis de velocidade axial simulado e experimental na linha 2.

Pode-se perceber que ambos os perfis tangenciais e axiais mostraram coerência com os dados experimentais reforçando assim a validação dos dados simulados.

Para conferir mais uma região das simulações, foram feitos experimentos de velocidades tangencias e axiais na terceira seção do hidrociclone, a Figura 87 mostra um par de imagens obtidas em sequência para o experimento.

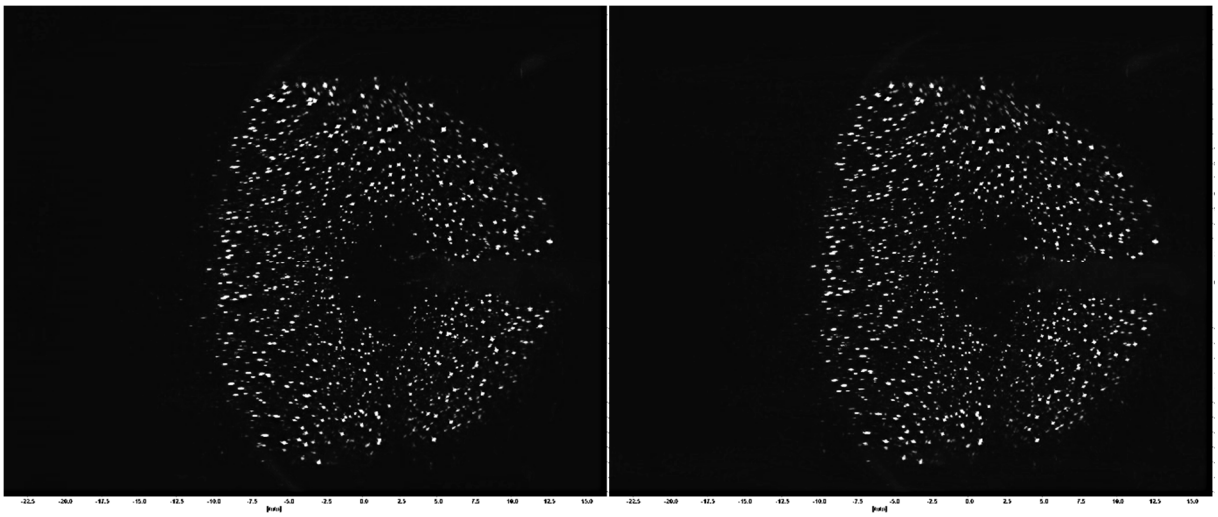
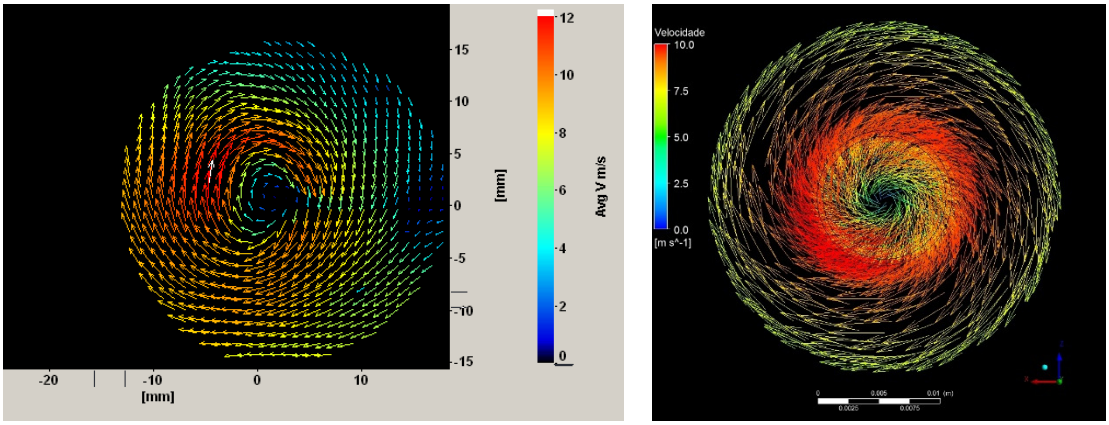


Figura 87 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade tangenciais utilizando a técnica PIV na seção 3.

Da mesma forma que nas sessões 1 e 2, observa-se que nas regiões circular superior e inferior às partículas não estão muito bem focadas, percebe-se também que na parte da direita há uma sombra na imagem. Por estes motivos estas regiões não foram utilizadas para a comparação dos dados experimentais com os dados simulados.

A partir destas fotos foram formados vetores de velocidade instantânea que deram origem aos vetores de velocidade média mostrado na imagem da esquerda da Figura 88.



A) B)

Figura 88 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 3).

Assim como nas sessões 1 e 2, pode-se observar que a simulação tem um comportamento semelhante aos dados obtidos pelo PIV em que há aumento da velocidade na região próxima do centro do equipamento e velocidade nula no centro. Foram plotados em um gráfico (Figura 89) os perfis de velocidades tangenciais calculados pela simulação e obtidos experimentalmente com o PIV ao longo da posição radial (linha 3).

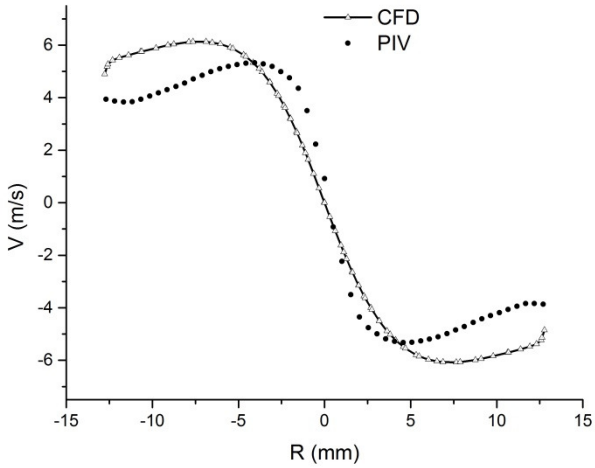


Figura 89 – Perfis de velocidades tangenciais simulado e experimental medidos na linha 3.

Observa-se que nesta seção também há uma boa concordância dos dados simulados com os experimentais, sendo que os dados obtidos por simulação superestimam um pouco os dados experimentais na região da parede e superestima na região central. Isso se deve ao fato de

estar diminuindo o diâmetro na região cônica fazendo com que a região da parede influencie um pouco a simulação, já que essa região não é resolvida por um modelo de turbulência, e sim uma função de parede. Como as simulações apresentaram bons resultados, não foi necessário modelar a camada limite de escoamento nesta região.

Para esta seção foram medidos também dados experimentais de velocidades axiais. A Figura 90 mostra um par de imagens obtidas em sequência para o experimento.

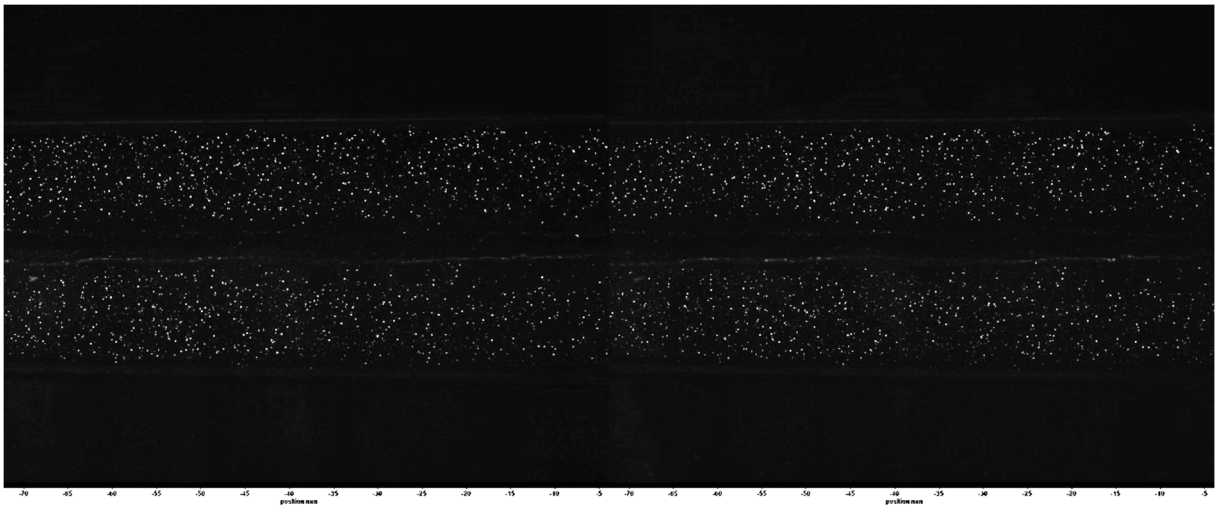
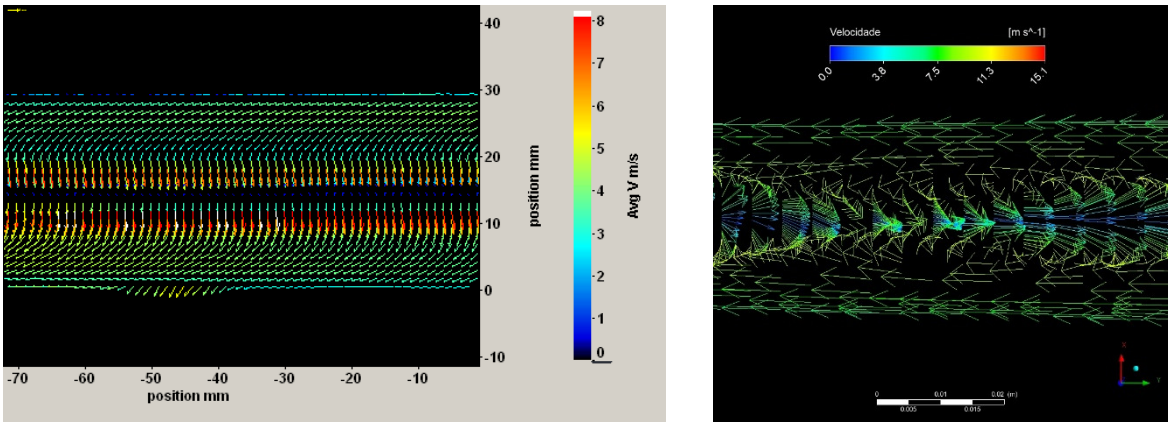


Figura 90 – Par de imagens obtidas em sequência para determinação dos vetores de velocidade axiais utilizando a técnica PIV na seção 3.

A partir destas fotos, da mesma forma que no perfil de velocidades axiais pode-se verificar o deslocamento das partículas de uma imagem para a outra e através das técnicas de interpretação do software foram formados vetores de velocidade instantânea que deram origem aos vetores de velocidade média mostrados na imagem da esquerda da Figura 91.



A) B)

Figura 91 – Vetores de velocidade média utilizando a técnica PIV (A) e vetores normalizados calculados pela simulação (B) (seção 3).

Assim como na seção 2, observa-se que no centro não há vetores, devido a presença do núcleo de ar. O escoamento próximo da parede é descendente e há mudança de sentido na região central, porém, observa-se que na direção radial todos os vetores apontam para a mesma direção, o que é fisicamente incoerente. Da mesma forma da seção anterior, o intervalo de tempo entre as fotos foi ajustado de modo a permitir a medição correta da velocidade axial.

A

Figura 92 mostra um plano de velocidade axial medido experimentalmente. De forma a comparar com os dados simulados, foi plotado em um gráfico (Figura 93) os perfis de velocidades axiais experimentais e simulados na linha 3.

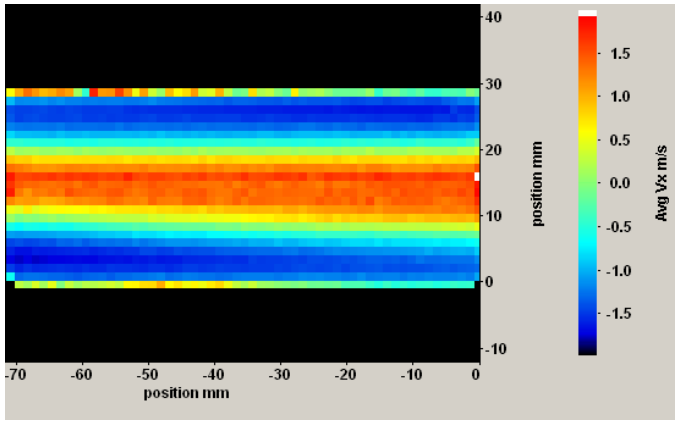


Figura 92 – Plano de velocidade média axial na seção 3 utilizando a técnica PIV.

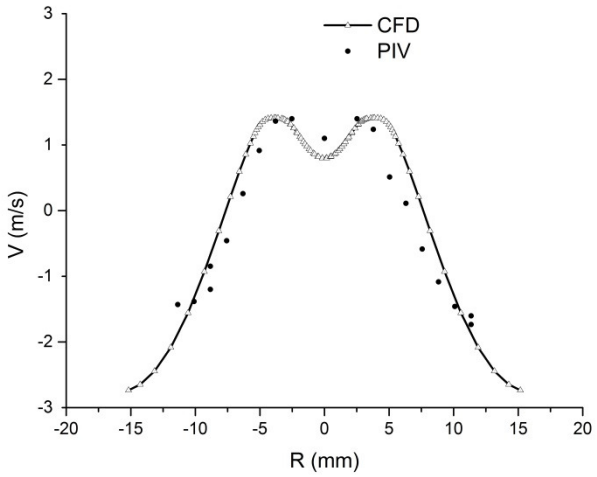


Figura 93 – Perfis de velocidade axial simulado e experimental na linha 3.

Com estes resultados pode-se afirmar que as simulações foram validadas de forma bem sucedida com os dados experimentais.

Em seguida foram validados os dados de eficiência global medidos experimentalmente para o hidrociclone ótimo na faixa estudada de Do e Du. Com isso foram medidas as concentrações de óleo no hidrociclone de acordo com a Tabela 16. A vazão volumétrica da mistura em cada entrada do equipamento foi de 2,75 m^3/h e se obteve uma vazão volumétrica no *overflow* de 0,74 m^3/h. os experimentos foram realizados em triplicata nas mesmas condições experimentais citadas anteriormente.

Tabela 16 – Eficiência total de separação

Experimento	Ponto de coleta	Absorbância	Concentração de óleo em n-hexano (mg/L)	Concentração de óleo na água (mg/L)	Eficiência (%)
1	Entrada 1	2,710	6869,5	6966,2	93,63
	Entrada 2	2,906	7367,3	7292,9	
	Overflow	2,103*	21321,0	49612,3	
2	Entrada 1	2,710	6870,2	6967,0	94,87
	Entrada 2	2,869	7273,5	7200,0	
	Overflow	2,117*	21465,1	49947,5	
3	Entrada 1	2,680	6794,1	6889,8	95,29
	Entrada 2	2,872	7281,1	7207,5	
	Overflow	2,116*	21454,9	49923,9	

* Absorbâncias para um *overflow* diluído em 1:4.

A concentração média de óleo na saída de *overflow* foi 49.827,9 mg/L e através de um balaço de massa das entradas e saídas pode-se calcular que a concentração média de óleo no *underflow* foi de 525,1 mg/L.

Como se pode observar, foi obtida uma eficiência total média de separação (E_T) do óleo de 94,60%, enquanto que a eficiência estimada nas simulações foi de 99,02% (desvio de 4,65% em relação aos dados experimentais). A razão de fluido (R_f) obtida experimentalmente foi de 13,50%, obtendo eficiência total de separação reduzida (E'_T) de 93,75%. A E'_T estimada nas simulações foi de 98,86% (desvio de 5,45% em relação aos dados experimentais) o que mostra a boa adequabilidade dos resultados simulados aos experimentais.

5. CONCLUSÕES

Foi construído um hidrociclone otimizado em simulação para separação óleo-água de dispersões com baixa concentração de óleo. As simulações com fluidodinâmica computacional utilizando o programa Ansys Fluent apresentaram resultados satisfatórios em comparação com os dados experimentais obtidos, tendo os perfis de velocidades e eficiência validados.

Neste trabalho foi realizado um planejamento composto central rotacional com superfície de resposta para as simulações em *CFD*. O planejamento indicou os valores de diâmetro de *overflow* e diâmetro de *underflow* (na faixa avaliada) que obtêm maior valor de eficiência de separação granulométrica de gotas de 25 μm de óleo em água com baixa concentração e menor valor de razão de fluido foram de 10 mm e 15 mm, respectivamente.

O hidrociclone otimizado foi eficiente para a separação de uma corrente de 5,5 m^3/h contendo 1% de óleo em água. A distribuição granulométrica de gotas empregada seguiu o modelo RRB com os parâmetros k e m valendo 160 μm e 2,51 respectivamente. O diâmetro de corte (diâmetro de gota que tem 50% de eficiência de separação) foi de 20 μm. Com isso a eficiência total de separação estimada nas simulações foi de 99,0%, a razão de fluido obtida foi de 13,1% e a eficiência total reduzida de separação de 98,9%.

Os ensaios experimentais nas mesmas condições das simulações obtiveram eficiência total de separação de 94,6%, razão de fluido de 13,5% e eficiência total de separação reduzida de 93,8%.

A concentração média de óleo na saída de *overflow* foi 50 g/L e a concentração média de óleo no *underflow* foi de 0,5 g/L.

Com isso, pode-se concluir que o equipamento possui um bom potencial para ser utilizado na separação de águas oleosas com baixa concentração de óleo em água.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Medir a distribuição de tamanhos de gotas no *overflow* e *underflow* e comparar com a distribuição da entrada para verificar a ocorrência de aumento e diminuição de diâmetros de gotas, gerando informações para avaliar os efeitos de quebra e coalescência;
- Avaliar experimentalmente os fenômenos de quebra e coalescência nos hidrociclones do presente trabalho;
- Avaliar modelos de quebra e coalescência presentes no Ansys FLUENT com os dados obtidos experimentalmente e se necessário propor novo modelo;
- Determinar a faixa ótima de operação destes hidrociclones, estabelecendo, também, a vazão crítica a partir da qual se atinge um patamar de eficiência total constante;
- Aumentar a capacidade destes hidrociclones aumentando o volume do HC e o diâmetro da entrada e avaliar a eficiência.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, J., e R. Damian. "Guidelines on numerical modeling of cyclones and hydrocyclones." *South American ANSYS Conference.* Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

Ansys CFX 15.0. "Solver Theory Guide." abril de 2013.

Ansys Fluent 15.0. "Theory Guide." abril de 2013.

Ansys Icem CFD 15.0. "User Manual." abril de 2013.
Ansys Meshing Application Introduction. "Appendix A: Mesh Quality." abril de 2013.

Bai, Z. S., H. L. Wang, e S. T. Tu. "Experimental study of flow patterns in deoiling hydrocyclone." *Minerals Engineering*, 2009: 319-323.

Bernardo, S., M. Mori, A. Peres, e R. Dionisio. "3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles." *Powder Technology*, 2006: 190-200.

Bird, R. B., W. E. Stewart, e E. N. Lightfoot. *Fenômenos de Transporte.* 2ª. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

Boussinesq, J. "Théorie de I´Écoulement Tourbillant." *Mem. Présentés par Divers Savants Acad. Sci. Inst. Fr* 23 (1877): 46-50.

BSA Flow Software Version 4. *Installation & User's Guide.* 9ª. Dinamarca, 2005.

Calado, V., e D. C. Montgomery. *Planejamento de experimentos usando o Statistica.* Rio de Janeiro: E-Papers Serviços editoriais, 2003.

Carvalho, A. T., e R. A Medronho. "Perfuração com duplo gradiente: a separação da barita do fluido de perfuração utilizando hidrociclones." *Anais do Rio Oil & Gas Expo e Conference.* Rio de Janeiro, outubro de 2004.

Chu, L.-Y, W.-M. Chen, e X.-Z. Lee. "Effect of structural modification on hydrocyclone." *Separ Purif Technol*, 2000: 71-86.

Chu, L.Y., W. YU, G.J. Wang, X.T. Zhow, W.M. Chen, e G. Q. Dai. "Enhancement of hydrocyclone separation performance by elimination the air core." *Chemical Engineering and Processing 43*, 2004: 1441-1448.

Chuah, T., J. Gimbun, e T.S. Choong. "A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics." *Powder Technology*, 2006: 126-132.

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

Colman, D. A., M. T. Thew, e D. R. Corney. “Hydrocyclones for oil/water separation.” *International Conference on Hydrocyclones.* Cambridge: BHRA, 1980. 143-154.

Conama - Conselho Nacional do Meio Ambiente. “Resolução N° 393, de 08/08/2007, Publicada no DOU nº 153, de 09/08/2007, Seção 1.” 2007. 72-73.

Deckwer, W. D., R.A. Medronho, B. Anspach, e M. Lubberstedt. EUA Patente 6,878,545. 2005.

Delfos, R.,, S., Murphy, D. Stanbridge, Z. Olujic, e P. J. Jansena. “A design tool for optimizing axial liquid-liquid hydrocyclones.” *Minerals Engineering 17*, 2004: 721-731.

Delgadillo, J.A., e R.K. Rajamani. “Exploration of Hydrocyclone Designs using Computacional Fluid Dynamics.” *Int, J. Miner. Process.*, 2007: 252-261.

Dirgo, J., e D Leith. “Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions.” *Aerosol Science and Technology 4*, 1985: 401–415.

EBM. “FLUOSTAR Rhodamine B-"encapsulating" microspheres are seeding particles optimized for Particle Image Velocimetry.” *Technical handbook ver.1.* February de 2010.

Elsayed, K., e C. Lacor. “The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance.” *Applied Mathematical Modelling*, 2011: 1952-1968.

FlowManager Software. “FlowManager Software and Introduction to PIV Instrumentation.” *Software User´s Guide.* Setembro de 2000.

Freire, A. P. S., A. Ilha, e M.J. Colaço. *Turbulência.* 2006.

Freitas, A.G.B., A. E. A. Paixão, R. A. Medronho, e G. F. Silva. “Influência de algumas variáveis geométricas do hidrociclone na razão de fluido e eficiência granulométrica reduzida: um estudo com CFD.” *Anais do ENEMP 2009 - XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas.* UNICAMP, Campinas, 2009.

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

Gibson, M. M., e B. E. Launder. “Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer.” *Journal of Fluid Mechanics vol. 86, part 3*, 1978: 491-511.

Grady, S. A., G. D. Wesson, M. Abdullah, e E. E. Kalu. “Prediction of 10-mm hydrocyclone separation efficiency using computational fluid dynamics.” *Filtration & Separation*, 2003: 41-46.

Griffiths, W.D., e F. Boysan. “Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers.” *Journal of Aerosol Science*, 1996: 281-304.

Gupta, A., e R. Kumar. “Three-dimensional turbulent swirling flow in a cylinder: Experiments and computations.” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007: 249-261.

Hararah, M.A. , E. Endres, J. Dueck, L. Minkov, e T. Neesse. “Flow conditions in the air core of the hydrocyclone.” *Minerals Engineering*, 2010: 295-300.

Hashmi, K. A., H. A. Hamza, e J. C., Wilson. “Canmet hydrocyclone: an emerging alternative for the treatment of oily waste streams.” *Minerals Engineering*, 2004: 643-649.

Heiskanen, K. *Particle Classification.* Londres: Chapman & Hall, 1993.

Huang, L., K. Kumar, e A.S. Mujumdar. “Simulation of a spray dryer fitted with a rotary disk atomizer using a three-dimensional computational fluid dynamic model.” *Drying Technology*, 2004: 1489-1515.

Husveg, T., O. Rambeau, e T. Drengstig. “Peformance of a deoling hidrocyclone during variable flow rates.” *Minerals Engineering 20*, 2007: 368-379.

Kaya, F., e I. Karagoz. “Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones.” *Current Science*, 2008: 1273-1278.

Launder, B. E., e B. I. Sharma. “Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc.” *Letters in Heat and Mass Transfer, 1*, 1974: 131-138.

Liu, Hai-fei, X. Jing-yu, Zhang Jun, Huan-qiang Sun, Z. Jian, e Ying-xiang Wu. “Oil-water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone.” *Journal of Hydrodynamic, 24*, 2012: 116-123.

Maliska, C.R. *Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.* 2ª. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

Mariano, J.B. “Impactos Ambientais do Refino de Petróleo.” *Dissertação de Mestrado.* COPPE/UFRJ - Rio de janeiro, Fevereiro de 2001.

Marins, L. P. M. “Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso.” *Dissertação de Mestrado.* COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro, 2007.

Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments* . 8ª. Wiley, 2012.

Moraes, C. A. C. “Curso de Hidrociclones e Sistemas de Separação Ciclônica.” Rio e Janeiro: Cenpes. Universidade Coorporativa, Agosto de 2006.

Oliveira, A. G., Medronho, R. A. “Otimização da geometria de hidrociclones para o tratamento de águas de lastro de navios petroleiros.” *Rio Oil & Gas Expo and Conference - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás.* Rio de Janeiro, 2004.

Pinto, R. C. V., R. A. Medronho, e L. R. Castilho. “Separation of CHO cell using hydrocyclones.” *Cytotechnology v. 56*, 2008: 57-67.

Plitt, L. R. “The analysis of solid-solid separations in classifiers.” *CIM Bulletin, v. 64*, 1971: 42-47.

Ramirez, M. V. “Simulação da perda de carga e da eficiência de coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional.” *Dissertação de mestrado.* São Carlos, UFSCar, 2009.

Rodrigues, M. I., e A. F. Iemma. *Planejamento de experimentos & otimização de processos.* 2ª revisada. Campinas – SP: AMIC, 2009.

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

Schütz, S., G. Gorbach, e M. Piesche. “Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid–liquid separation in hydrocyclones.” *Chemical Engineering Science, v. 64*, 2009: 3935-3952.

Skoog, D. A., D. M. West, e J. F. Holler. *Fundamentos de Quimica Analitica.* 8ª. PIONEIRA, 2005.

Slack, M.D., Del Porte, S., e Engelman, M.S. “Designing automated computational fluid dynamics modeling tools for hydrocyclone design.” *Minerals Engineering, 17*, 2004: 705-711.

Sommerfeld, M., e C.A. Ho. “Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows.” *Powder Technology*, 2003: 1-6.

Speziale, C. G., S. Sarkar, e T. B. Gatski. “Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach.” *J. Fluid Mech., 227*, 1991: 245-272.

StatSoft, Inc. *Electronic Statistics Textbook.* StatSoft. 2013. http://www.statsoft.com/textbook/.

Svarovsky, L. *Hydrocyclones.* Londres: Holt: Renehart and Winston, 1984.

Svarovsky, L. “Solid-liquid Separation.” Czech Repuplic: Butterworth-Heinermann, 2000.

Swain, S., e Mohanty, S. “A 3-Dimensional Eulerian-Eulerian CFD Simulation of a Hydrocyclone.” *Applied Mathematical Modelling*, 2012.

Thew, M. T., e K. Nezhati. “Aspects of the performance and scaling of hydrocyclones for use with light dispersions.” *3rd International Conference on Hydrocyclones.* Oxford: Elsevier Applied Science Publishers, 1987. 167-180.

Torres, C. C. G., P.Q. Diez, J. A. J. Bernal, A. L. Lobato, e J. G. B. Saldaña. “Effects of particle diameter correction factor on the performance of cyclone collection efficiency

models for an industrial application." *International Journal of Mineral Processing.*, 25 de Janeiro de 2012: 156-160.

Wan, G., G. Sun, X. Xue, e M. Shi. "Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator." *Powder Technology*, 2008: 94-104.

Wang, B., e A.B. Yu. "Numerical Study of Particle-Fluid Flow in Hydrocyclones with Different Body Dimensions." *Minerals Engineering, 19*, 2006: 1022-1033.

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

ANEXO I

Reports das simulações feitas no *Ansys Fluent*.

Caso 9 com diâmetro de partícula de 5 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                  Settings
   ---------------------------------------------------------------
   Space                                  3D
   Time                                   Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                                Reynolds stress model
   Wall Treatment                         Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                  Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option     Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)         Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option       Disabled
   Heat Transfer                          Disabled
   Solidification and Melting             Disabled
   Species                                Disabled
   Coupled Dispersed Phase                Disabled
   NOx Pollutants                         Disabled
   SOx Pollutants                         Disabled
   Soot                                   Disabled
   Mercury Pollutants                     Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property                Units    Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)      j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity    w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                          Units      Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------------------
      Density                           kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)                j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity              w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                         kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                  kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient     1/k        constant   0
```

```
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         ------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)       0
         Turbulent Specification Method                   3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)                 1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)               1
         Turbulent Intensity (%)                          4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                       1
         Hydraulic Diameter (m)                           0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                        10
         Reynolds-Stress Specification Method             0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
```

```
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

entrada2

   Condition                                    Value
   -----------------------------------------------------
   Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
   Turbulent Specification Method               3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
   Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                   1
   Hydraulic Diameter (m)                       0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                    10
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

overflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
```

```
      Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
      Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
      Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
      Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.015
      Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
      Reynolds-Stress Specification Method          0
      Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
      Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
      Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
      Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
      Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
      Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
      is zone used in mixing-plane model?           no
      Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

   parede

      Condition                                              Value
      -------------------------------------------------------------
      Enable shell conduction?                               no
      Wall Motion                                            0
      Shear Boundary Condition                               0
      Define wall motion relative to adjacent cell zone?     yes
      Apply a rotational velocity to this wall?              no
      Velocity Magnitude (m/s)                               0
      X-Component of Wall Translation                        1
      Y-Component of Wall Translation                        0
      Z-Component of Wall Translation                        0
      Define wall velocity components?                       no
      X-Component of Wall Translation (m/s)                  0
      Y-Component of Wall Translation (m/s)                  0
      Z-Component of Wall Translation (m/s)                  0
      Wall Roughness Height (m)                              0
      Wall Roughness Constant                                0.5
      Rotation Speed (rad/s)                                 0
      X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                 0
      Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                 0
      Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                 0
      X-Component of Rotation-Axis Direction                 0
      Y-Component of Rotation-Axis Direction                 0
      Z-Component of Rotation-Axis Direction                 1
      X-component of shear stress (pascal)                   0
      Y-component of shear stress (pascal)                   0
      Z-component of shear stress (pascal)                   0
      Fslip constant                                         0
      Eslip constant                                         0
      Specularity Coefficient                                0
      Enable Thermal Stabilization?                          no
      Scale Factor                                           0
      Stabilization Method                                   1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
```

```
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      --------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation   yes

   Unsteady Calculation Parameters


      --------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step   10

   Relaxation

      Variable                     Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                     0.3
      Density                      1
      Body Forces                  1
      Momentum                     0.7
      Volume Fraction              0.5
      Turbulent Kinetic Energy     0.8
      Turbulent Dissipation Rate   0.8
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction              Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy     Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate   Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses            Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme

      Variable                     Scheme
      ----------------------------------------------
```

```
      Momentum                      Second Order Upwind
      Volume Fraction               QUICK
      Turbulent Kinetic Energy      First Order Upwind
      Turbulent Dissipation Rate    First Order Upwind
      Reynolds Stresses             First Order Upwind

   Solution Limits

      Quantity                          Limit
      --------------------------------------
      Minimum Absolute Pressure         1
      Maximum Absolute Pressure         5e+10
      Minimum Temperature               1
      Maximum Temperature               5000
      Minimum Turb. Kinetic Energy      1e-14
      Minimum Turb. Dissipation Rate    1e-20
      Maximum Turb. Viscosity Ratio     100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 10 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                 Settings
   ---------------------------------------------------------------------
   Space                                 3D
   Time                                  Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                               Reynolds stress model
   Wall Treatment                        Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                 Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option    Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)        Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option      Disabled
   Heat Transfer                         Disabled
   Solidification and Melting            Disabled
   Species                               Disabled
   Coupled Dispersed Phase               Disabled
   NOx Pollutants                        Disabled
   SOx Pollutants                        Disabled
   Soot                                  Disabled
   Mercury Pollutants                    Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property                Units    Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
```

```
      Cp (Specific Heat)     j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity   w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                       kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      ---------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1
```

```
   Condition                                        Value
   -------------------------------------------------------
   Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
   Turbulent Specification Method               3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
   Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                   1
   Hydraulic Diameter (m)                       0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                    10
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

entrada2

   Condition                                        Value
   -------------------------------------------------------
   Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
   Turbulent Specification Method               3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
   Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                   1
   Hydraulic Diameter (m)                       0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                    10
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

overflow

   Condition                                         Value
   ---------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                           0
   Backflow Direction Specification Method           2
   Turbulent Specification Method                    3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)         1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)       1
   Backflow Turbulent Intensity (%)                  4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)               1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                   0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio                10
   Reynolds-Stress Specification Method              0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)             1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)             1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)             1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)             0
```

```
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

parede

   Condition                                                Value
   ---------------------------------------------------------------
   Enable shell conduction?                                 no
   Wall Motion                                              0
   Shear Boundary Condition                                 0
   Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
   Apply a rotational velocity to this wall?                no
   Velocity Magnitude (m/s)                                 0
   X-Component of Wall Translation                          1
   Y-Component of Wall Translation                          0
   Z-Component of Wall Translation                          0
   Define wall velocity components?                         no
   X-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Y-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Z-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Wall Roughness Height (m)                                0
   Wall Roughness Constant                                  0.5
   Rotation Speed (rad/s)                                   0
   X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   X-Component of Rotation-Axis Direction                   0
   Y-Component of Rotation-Axis Direction                   0
   Z-Component of Rotation-Axis Direction                   1
   X-component of shear stress (pascal)                     0
   Y-component of shear stress (pascal)                     0
   Z-component of shear stress (pascal)                     0
   Fslip constant                                           0
```

```
         Eslip constant                                        0
         Specularity Coefficient                               0
         Enable Thermal Stabilization?                         no
         Scale Factor                                          0
         Stabilization Method                                  1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                         Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation   yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                   0.00013
      Max. Iterations Per Time Step   10

   Relaxation

      Variable                     Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                     0.3
      Density                      1
      Body Forces                  1
      Momentum                     0.7
      Volume Fraction              0.5
      Turbulent Kinetic Energy     0.8
      Turbulent Dissipation Rate   0.8
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction              Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy     Flexible   0.1           0.7
```

```
   Turbulent Dissipation Rate   Flexible   0.1           0.7
   Reynolds Stresses            Flexible   0.1           0.7

Pressure-Velocity Coupling

   Parameter   Value
   --------------------------------
   Type        Phase Coupled SIMPLE

Discretization Scheme

   Variable                     Scheme
   ------------------------------------------------
   Momentum                     Second Order Upwind
   Volume Fraction              QUICK
   Turbulent Kinetic Energy     First Order Upwind
   Turbulent Dissipation Rate   First Order Upwind
   Reynolds Stresses            First Order Upwind

Solution Limits

   Quantity                          Limit
   --------------------------------------
   Minimum Absolute Pressure         1
   Maximum Absolute Pressure         5e+10
   Minimum Temperature               1
   Maximum Temperature               5000
   Minimum Turb. Kinetic Energy      1e-14
   Minimum Turb. Dissipation Rate    1e-20
   Maximum Turb. Viscosity Ratio     100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 15 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                Settings
   ------------------------------------------------------------------
   Space                                3D
   Time                                 Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                              Reynolds stress model
   Wall Treatment                       Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option   Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)       Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option     Disabled
   Heat Transfer                        Disabled
```

```
   Solidification and Melting           Disabled
   Species                              Disabled
   Coupled Dispersed Phase              Disabled
   NOx Pollutants                       Disabled
   SOx Pollutants                       Disabled
   Soot                                 Disabled
   Mercury Pollutants                   Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property               Units    Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------
      Density                kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)     j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity   w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                       kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
```

```
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
         Turbulent Specification Method               3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
         Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                   1
         Hydraulic Diameter (m)                       0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                    10
         Reynolds-Stress Specification Method         0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         is zone used in mixing-plane model?          no

      entrada2

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
         Turbulent Specification Method               3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
         Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                   1
         Hydraulic Diameter (m)                       0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                    10
         Reynolds-Stress Specification Method         0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         is zone used in mixing-plane model?          no

      overflow
```

```
   Condition                                        Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                          0
   Backflow Direction Specification Method          2
   Turbulent Specification Method                   3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)        1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)      1
   Backflow Turbulent Intensity (%)                 4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)              1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                  0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio               10
   Reynolds-Stress Specification Method             0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   is zone used in mixing-plane model?              no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution         no

underflow

   Condition                                        Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                          0
   Backflow Direction Specification Method          2
   Turbulent Specification Method                   3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)        1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)      1
   Backflow Turbulent Intensity (%)                 4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)              1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                  0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio               10
   Reynolds-Stress Specification Method             0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   is zone used in mixing-plane model?              no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution         no

parede

   Condition                                                Value
   ---------------------------------------------------------------
   Enable shell conduction?                                 no
   Wall Motion                                              0
   Shear Boundary Condition                                 0
   Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
   Apply a rotational velocity to this wall?                no
   Velocity Magnitude (m/s)                                 0
   X-Component of Wall Translation                          1
   Y-Component of Wall Translation                          0
   Z-Component of Wall Translation                          0
   Define wall velocity components?                         no
```

```
         X-Component of Wall Translation (m/s)                0
         Y-Component of Wall Translation (m/s)                0
         Z-Component of Wall Translation (m/s)                0
         Wall Roughness Height (m)                            0
         Wall Roughness Constant                              0.5
         Rotation Speed (rad/s)                               0
         X-Position of Rotation-Axis Origin (m)               0
         Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)               0
         Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)               0
         X-Component of Rotation-Axis Direction               0
         Y-Component of Rotation-Axis Direction               0
         Z-Component of Rotation-Axis Direction               1
         X-component of shear stress (pascal)                 0
         Y-component of shear stress (pascal)                 0
         Z-component of shear stress (pascal)                 0
         Fslip constant                                       0
         Eslip constant                                       0
         Specularity Coefficient                              0
         Enable Thermal Stabilization?                        no
         Scale Factor                                         0
         Stabilization Method                                 1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation    yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step    10

   Relaxation

      Variable                      Relaxation Factor
      -----------------------------------------------
      Pressure                      0.3
      Density                       1
      Body Forces                   1
      Momentum                      0.7
      Volume Fraction               0.5
      Turbulent Kinetic Energy      0.8
      Turbulent Dissipation Rate    0.8
```

```
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction              Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy     Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate   Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses            Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme

      Variable                     Scheme
      ------------------------------------------------
      Momentum                     Second Order Upwind
      Volume Fraction              QUICK
      Turbulent Kinetic Energy     First Order Upwind
      Turbulent Dissipation Rate   First Order Upwind
      Reynolds Stresses            First Order Upwind

   Solution Limits

      Quantity                         Limit
      ---------------------------------------
      Minimum Absolute Pressure        1
      Maximum Absolute Pressure        5e+10
      Minimum Temperature              1
      Maximum Temperature              5000
      Minimum Turb. Kinetic Energy     1e-14
      Minimum Turb. Dissipation Rate   1e-20
      Maximum Turb. Viscosity Ratio    100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 20 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
```

```
Title:

Models
------

   Model                                Settings
   ---------------------------------------------------------------
   Space                                3D
   Time                                 Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                              Reynolds stress model
   Wall Treatment                       Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option   Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)       Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option     Disabled
   Heat Transfer                        Disabled
   Solidification and Melting           Disabled
   Species                              Disabled
   Coupled Dispersed Phase              Disabled
   NOx Pollutants                       Disabled
   SOx Pollutants                       Disabled
   Soot                                 Disabled
   Mercury Pollutants                   Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property               Units    Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------
      Density                kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)     j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity   w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                       kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      -------------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
```

```
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)       0
         Turbulent Specification Method                   3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)                 1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)               1
         Turbulent Intensity (%)                          4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                       1
         Hydraulic Diameter (m)                           0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                        10
         Reynolds-Stress Specification Method             0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         UW Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         is zone used in mixing-plane model?              no

      entrada2

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)       0
         Turbulent Specification Method                   3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)                 1
```

```
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
   Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                   1
   Hydraulic Diameter (m)                       0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                    10
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

overflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
```

```
         Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

      parede

         Condition                                                Value
         ---------------------------------------------------------------
         Enable shell conduction?                                 no
         Wall Motion                                              0
         Shear Boundary Condition                                 0
         Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
         Apply a rotational velocity to this wall?                no
         Velocity Magnitude (m/s)                                 0
         X-Component of Wall Translation                          1
         Y-Component of Wall Translation                          0
         Z-Component of Wall Translation                          0
         Define wall velocity components?                         no
         X-Component of Wall Translation (m/s)                    0
         Y-Component of Wall Translation (m/s)                    0
         Z-Component of Wall Translation (m/s)                    0
         Wall Roughness Height (m)                                0
         Wall Roughness Constant                                  0.5
         Rotation Speed (rad/s)                                   0
         X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
         Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
         Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
         X-Component of Rotation-Axis Direction                   0
         Y-Component of Rotation-Axis Direction                   0
         Z-Component of Rotation-Axis Direction                   1
         X-component of shear stress (pascal)                     0
         Y-component of shear stress (pascal)                     0
         Z-component of shear stress (pascal)                     0
         Fslip constant                                           0
         Eslip constant                                           0
         Specularity Coefficient                                  0
         Enable Thermal Stabilization?                            no
         Scale Factor                                             0
         Stabilization Method                                     1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      ----------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation    yes

   Unsteady Calculation Parameters
```

```
      ---------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step   10

   Relaxation

      Variable                      Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                      0.3
      Density                       1
      Body Forces                   1
      Momentum                      0.7
      Volume Fraction               0.5
      Turbulent Kinetic Energy      0.8
      Turbulent Dissipation Rate    0.8
      Turbulent Viscosity           1
      Reynolds Stresses             0.5

   Linear Solver

                                    Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                      Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                      V-Cycle    0.1
      X-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction               Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy      Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate    Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses             Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme

      Variable                      Scheme
      ------------------------------------------------
      Momentum                      Second Order Upwind
      Volume Fraction               QUICK
      Turbulent Kinetic Energy      First Order Upwind
      Turbulent Dissipation Rate    First Order Upwind
      Reynolds Stresses             First Order Upwind

   Solution Limits

      Quantity                          Limit
      ---------------------------------------
      Minimum Absolute Pressure         1
      Maximum Absolute Pressure         5e+10
      Minimum Temperature               1
```

```
      Maximum Temperature              5000
      Minimum Turb. Kinetic Energy     1e-14
      Minimum Turb. Dissipation Rate   1e-20
      Maximum Turb. Viscosity Ratio    100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 25 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                Settings
   ---------------------------------------------------------------
   Space                                3D
   Time                                 Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                              Reynolds stress model
   Wall Treatment                       Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option   Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)       Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option     Disabled
   Heat Transfer                        Disabled
   Solidification and Melting           Disabled
   Species                              Disabled
   Coupled Dispersed Phase              Disabled
   NOx Pollutants                       Disabled
   SOx Pollutants                       Disabled
   Soot                                 Disabled
   Mercury Pollutants                   Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property                Units    Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)      j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity    w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                         Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                          kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)               j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity             w/m-k      constant   0.0242
```

```
      Viscosity                        kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                 kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient    1/k        constant   0
      Speed of Sound                   m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                         Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
--
      Density                          kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)               j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity             w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                        kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                 kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient    1/k        constant   0
      Speed of Sound                   m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                         Units      Method     Value(s)
      -----------------------------------------------------------------
      Density                          kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)               j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity             w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                        kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                 kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient    1/k        constant   0
      Speed of Sound                   m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         ----------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
         Turbulent Specification Method               3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
         Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                   1
         Hydraulic Diameter (m)                       0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                    10
```

```
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

entrada2

   Condition                                    Value
   -----------------------------------------------------
   Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
   Turbulent Specification Method               3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
   Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                   1
   Hydraulic Diameter (m)                       0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                    10
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

overflow

   Condition                                     Value
   ------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   ------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
```

```
      Backflow Direction Specification Method       2
      Turbulent Specification Method                3
      Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
      Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
      Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
      Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
      Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.015
      Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
      Reynolds-Stress Specification Method          0
      Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
      Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
      Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
      Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
      Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
      Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
      is zone used in mixing-plane model?           no
      Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

   parede

      Condition                                                Value
      ---------------------------------------------------------------
      Enable shell conduction?                                 no
      Wall Motion                                              0
      Shear Boundary Condition                                 0
      Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
      Apply a rotational velocity to this wall?                no
      Velocity Magnitude (m/s)                                 0
      X-Component of Wall Translation                          1
      Y-Component of Wall Translation                          0
      Z-Component of Wall Translation                          0
      Define wall velocity components?                         no
      X-Component of Wall Translation (m/s)                    0
      Y-Component of Wall Translation (m/s)                    0
      Z-Component of Wall Translation (m/s)                    0
      Wall Roughness Height (m)                                0
      Wall Roughness Constant                                  0.5
      Rotation Speed (rad/s)                                   0
      X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
      Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
      Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
      X-Component of Rotation-Axis Direction                   0
      Y-Component of Rotation-Axis Direction                   0
      Z-Component of Rotation-Axis Direction                   1
      X-component of shear stress (pascal)                     0
      Y-component of shear stress (pascal)                     0
      Z-component of shear stress (pascal)                     0
      Fslip constant                                           0
      Eslip constant                                           0
      Specularity Coefficient                                  0
      Enable Thermal Stabilization?                            no
      Scale Factor                                             0
      Stabilization Method                                     1

Solver Settings
---------------

   Equations
```

```
      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      --------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation    yes

   Unsteady Calculation Parameters


      --------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step    10

   Relaxation

      Variable                     Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                     0.3
      Density                      1
      Body Forces                  1
      Momentum                     0.7
      Volume Fraction              0.5
      Turbulent Kinetic Energy     0.8
      Turbulent Dissipation Rate   0.8
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction              Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy     Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate   Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses            Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme
```

```
   Variable                      Scheme
   ------------------------------------------------
   Momentum                      Second Order Upwind
   Volume Fraction               QUICK
   Turbulent Kinetic Energy      First Order Upwind
   Turbulent Dissipation Rate    First Order Upwind
   Reynolds Stresses             First Order Upwind

Solution Limits

   Quantity                          Limit
   --------------------------------------
   Minimum Absolute Pressure         1
   Maximum Absolute Pressure         5e+10
   Minimum Temperature               1
   Maximum Temperature               5000
   Minimum Turb. Kinetic Energy      1e-14
   Minimum Turb. Dissipation Rate    1e-20
   Maximum Turb. Viscosity Ratio     100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 50 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                  Settings
   ---------------------------------------------------------------
   Space                                  3D
   Time                                   Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                                Reynolds stress model
   Wall Treatment                         Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                  Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option     Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)         Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option       Disabled
   Heat Transfer                          Disabled
   Solidification and Melting             Disabled
   Species                                Disabled
   Coupled Dispersed Phase                Disabled
   NOx Pollutants                         Disabled
   SOx Pollutants                         Disabled
   Soot                                   Disabled
   Mercury Pollutants                     Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)
```

```
      Property                Units    Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)      j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity    w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                       kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions
```

entrada1

Condition	Value
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0
Turbulent Specification Method	3
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	1
Turbulent Intensity (%)	4.9999999
Turbulent Length Scale (m)	1
Hydraulic Diameter (m)	0.016
Turbulent Viscosity Ratio	10
Reynolds-Stress Specification Method	0
UU Reynolds Stresses (m2/s2)	1
VV Reynolds Stresses (m2/s2)	1
WW Reynolds Stresses (m2/s2)	1
UV Reynolds Stresses (m2/s2)	0
VW Reynolds Stresses (m2/s2)	0
UW Reynolds Stresses (m2/s2)	0
is zone used in mixing-plane model?	no

entrada2

Condition	Value
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0
Turbulent Specification Method	3
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	1
Turbulent Intensity (%)	4.9999999
Turbulent Length Scale (m)	1
Hydraulic Diameter (m)	0.016
Turbulent Viscosity Ratio	10
Reynolds-Stress Specification Method	0
UU Reynolds Stresses (m2/s2)	1
VV Reynolds Stresses (m2/s2)	1
WW Reynolds Stresses (m2/s2)	1
UV Reynolds Stresses (m2/s2)	0
VW Reynolds Stresses (m2/s2)	0
UW Reynolds Stresses (m2/s2)	0
is zone used in mixing-plane model?	no

overflow

Condition	Value
Gauge Pressure (pascal)	0
Backflow Direction Specification Method	2
Turbulent Specification Method	3
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	1
Backflow Turbulent Intensity (%)	4.9999999
Backflow Turbulent Length Scale (m)	1
Backflow Hydraulic Diameter (m)	0.01
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
Reynolds-Stress Specification Method	0
Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)	1

```
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

parede

   Condition                                                Value
   ---------------------------------------------------------------
   Enable shell conduction?                                 no
   Wall Motion                                              0
   Shear Boundary Condition                                 0
   Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
   Apply a rotational velocity to this wall?                no
   Velocity Magnitude (m/s)                                 0
   X-Component of Wall Translation                          1
   Y-Component of Wall Translation                          0
   Z-Component of Wall Translation                          0
   Define wall velocity components?                         no
   X-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Y-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Z-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Wall Roughness Height (m)                                0
   Wall Roughness Constant                                  0.5
   Rotation Speed (rad/s)                                   0
   X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   X-Component of Rotation-Axis Direction                   0
   Y-Component of Rotation-Axis Direction                   0
   Z-Component of Rotation-Axis Direction                   1
   X-component of shear stress (pascal)                     0
```

```
         Y-component of shear stress (pascal)                 0
         Z-component of shear stress (pascal)                 0
         Fslip constant                                       0
         Eslip constant                                       0
         Specularity Coefficient                              0
         Enable Thermal Stabilization?                        no
         Scale Factor                                         0
         Stabilization Method                                 1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation    yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step    10

   Relaxation

      Variable                     Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                     0.3
      Density                      1
      Body Forces                  1
      Momentum                     0.7
      Volume Fraction              0.5
      Turbulent Kinetic Energy     0.8
      Turbulent Dissipation Rate   0.8
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
```

```
   Z-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
   Volume Fraction               Flexible   0.1           0.7
   Turbulent Kinetic Energy      Flexible   0.1           0.7
   Turbulent Dissipation Rate    Flexible   0.1           0.7
   Reynolds Stresses             Flexible   0.1           0.7

Pressure-Velocity Coupling

   Parameter   Value
   --------------------------------
   Type        Phase Coupled SIMPLE

Discretization Scheme

   Variable                      Scheme
   ------------------------------------------------
   Momentum                      Second Order Upwind
   Volume Fraction               QUICK
   Turbulent Kinetic Energy      First Order Upwind
   Turbulent Dissipation Rate    First Order Upwind
   Reynolds Stresses             First Order Upwind

Solution Limits

   Quantity                          Limit
   ---------------------------------------
   Minimum Absolute Pressure         1
   Maximum Absolute Pressure         5e+10
   Minimum Temperature               1
   Maximum Temperature               5000
   Minimum Turb. Kinetic Energy      1e-14
   Minimum Turb. Dissipation Rate    1e-20
   Maximum Turb. Viscosity Ratio     100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 75 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                Settings
   ------------------------------------------------------------------
   Space                                3D
   Time                                 Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                              Reynolds stress model
   Wall Treatment                       Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option   Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)       Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option     Disabled
   Heat Transfer                        Disabled
```

```
   Solidification and Melting           Disabled
   Species                              Disabled
   Coupled Dispersed Phase              Disabled
   NOx Pollutants                       Disabled
   SOx Pollutants                       Disabled
   Soot                                 Disabled
   Mercury Pollutants                   Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property               Units    Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------
      Density                kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)     j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity   w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                       kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
```

```
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
         Turbulent Specification Method               3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
         Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                   1
         Hydraulic Diameter (m)                       0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                    10
         Reynolds-Stress Specification Method         0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         is zone used in mixing-plane model?          no

      entrada2

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
         Turbulent Specification Method               3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
         Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                   1
         Hydraulic Diameter (m)                       0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                    10
         Reynolds-Stress Specification Method         0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
         is zone used in mixing-plane model?          no

      overflow
```

```
   Condition                                        Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                          0
   Backflow Direction Specification Method          2
   Turbulent Specification Method                   3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)        1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)      1
   Backflow Turbulent Intensity (%)                 4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)              1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                  0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio               10
   Reynolds-Stress Specification Method             0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   is zone used in mixing-plane model?              no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution         no

underflow

   Condition                                        Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                          0
   Backflow Direction Specification Method          2
   Turbulent Specification Method                   3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)        1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)      1
   Backflow Turbulent Intensity (%)                 4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)              1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                  0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio               10
   Reynolds-Stress Specification Method             0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)            1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)            0
   is zone used in mixing-plane model?              no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution         no

parede

   Condition                                                Value
   ---------------------------------------------------------------
   Enable shell conduction?                                 no
   Wall Motion                                              0
   Shear Boundary Condition                                 0
   Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
   Apply a rotational velocity to this wall?                no
   Velocity Magnitude (m/s)                                 0
   X-Component of Wall Translation                          1
   Y-Component of Wall Translation                          0
   Z-Component of Wall Translation                          0
   Define wall velocity components?                         no
```

```
         X-Component of Wall Translation (m/s)                0
         Y-Component of Wall Translation (m/s)                0
         Z-Component of Wall Translation (m/s)                0
         Wall Roughness Height (m)                            0
         Wall Roughness Constant                              0.5
         Rotation Speed (rad/s)                               0
         X-Position of Rotation-Axis Origin (m)               0
         Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)               0
         Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)               0
         X-Component of Rotation-Axis Direction               0
         Y-Component of Rotation-Axis Direction               0
         Z-Component of Rotation-Axis Direction               1
         X-component of shear stress (pascal)                 0
         Y-component of shear stress (pascal)                 0
         Z-component of shear stress (pascal)                 0
         Fslip constant                                       0
         Eslip constant                                       0
         Specularity Coefficient                              0
         Enable Thermal Stabilization?                        no
         Scale Factor                                         0
         Stabilization Method                                 1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation    yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step    10

   Relaxation

      Variable                      Relaxation Factor
      -----------------------------------------------
      Pressure                      0.3
      Density                       1
      Body Forces                   1
      Momentum                      0.7
      Volume Fraction               0.5
      Turbulent Kinetic Energy      0.8
      Turbulent Dissipation Rate    0.8
```

```
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction              Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy     Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate   Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses            Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme

      Variable                     Scheme
      ------------------------------------------------
      Momentum                     Second Order Upwind
      Volume Fraction              QUICK
      Turbulent Kinetic Energy     First Order Upwind
      Turbulent Dissipation Rate   First Order Upwind
      Reynolds Stresses            First Order Upwind

   Solution Limits

      Quantity                         Limit
      ---------------------------------------
      Minimum Absolute Pressure        1
      Maximum Absolute Pressure        5e+10
      Minimum Temperature              1
      Maximum Temperature              5000
      Minimum Turb. Kinetic Energy     1e-14
      Minimum Turb. Dissipation Rate   1e-20
      Maximum Turb. Viscosity Ratio    100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 100 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
```

```
------

   Model                                  Settings
   ------------------------------------------------------------------
   Space                                  3D
   Time                                   Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                                Reynolds stress model
   Wall Treatment                         Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                  Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option     Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)         Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option       Disabled
   Heat Transfer                          Disabled
   Solidification and Melting             Disabled
   Species                                Disabled
   Coupled Dispersed Phase                Disabled
   NOx Pollutants                         Disabled
   SOx Pollutants                         Disabled
   Soot                                   Disabled
   Mercury Pollutants                     Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property                Units    Method     Value(s)
      ------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)      j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity    w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                          Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                           kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)                j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity              w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                         kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                  kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient     1/k        constant   0
      Speed of Sound                    m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                          Units      Method     Value(s)
      -------------------------------------------------------------------
--
      Density                           kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)                j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity              w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                         kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                  kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient     1/k        constant   0
      Speed of Sound                    m/s        none       #f
```

```
   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ----------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)       0
         Turbulent Specification Method                   3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)                 1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)               1
         Turbulent Intensity (%)                          4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                       1
         Hydraulic Diameter (m)                           0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                        10
         Reynolds-Stress Specification Method             0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         UW Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         is zone used in mixing-plane model?              no

      entrada2

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)       0
         Turbulent Specification Method                   3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)                 1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)               1
         Turbulent Intensity (%)                          4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                       1
```

```
   Hydraulic Diameter (m)                        0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                     10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   is zone used in mixing-plane model?           no

overflow

   Condition                                      Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                        0
   Backflow Direction Specification Method        2
   Turbulent Specification Method                 3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)      1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)    1
   Backflow Turbulent Intensity (%)               4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)            1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio             10
   Reynolds-Stress Specification Method           0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   is zone used in mixing-plane model?            no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution       no

underflow

   Condition                                      Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                        0
   Backflow Direction Specification Method        2
   Turbulent Specification Method                 3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)      1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)    1
   Backflow Turbulent Intensity (%)               4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)            1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio             10
   Reynolds-Stress Specification Method           0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   is zone used in mixing-plane model?            no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution       no

parede
```

```
        Condition                                                Value
        ---------------------------------------------------------
        Enable shell conduction?                                 no
        Wall Motion                                              0
        Shear Boundary Condition                                 0
        Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
        Apply a rotational velocity to this wall?                no
        Velocity Magnitude (m/s)                                 0
        X-Component of Wall Translation                          1
        Y-Component of Wall Translation                          0
        Z-Component of Wall Translation                          0
        Define wall velocity components?                         no
        X-Component of Wall Translation (m/s)                    0
        Y-Component of Wall Translation (m/s)                    0
        Z-Component of Wall Translation (m/s)                    0
        Wall Roughness Height (m)                                0
        Wall Roughness Constant                                  0.5
        Rotation Speed (rad/s)                                   0
        X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
        Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
        Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
        X-Component of Rotation-Axis Direction                   0
        Y-Component of Rotation-Axis Direction                   0
        Z-Component of Rotation-Axis Direction                   1
        X-component of shear stress (pascal)                     0
        Y-component of shear stress (pascal)                     0
        Z-component of shear stress (pascal)                     0
        Fslip constant                                           0
        Eslip constant                                           0
        Specularity Coefficient                                  0
        Enable Thermal Stabilization?                            no
        Scale Factor                                             0
        Stabilization Method                                     1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                         Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation   yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                   0.00013
```

```
      Max. Iterations Per Time Step   10

   Relaxation

      Variable                      Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                      0.3
      Density                       1
      Body Forces                   1
      Momentum                      0.7
      Volume Fraction               0.5
      Turbulent Kinetic Energy      0.8
      Turbulent Dissipation Rate    0.8
      Turbulent Viscosity           1
      Reynolds Stresses             0.5

   Linear Solver

                                    Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                      Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                      V-Cycle    0.1
      X-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction               Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy      Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate    Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses             Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme

      Variable                      Scheme
      ------------------------------------------------
      Momentum                      Second Order Upwind
      Volume Fraction               QUICK
      Turbulent Kinetic Energy      First Order Upwind
      Turbulent Dissipation Rate    First Order Upwind
      Reynolds Stresses             First Order Upwind

   Solution Limits

      Quantity                          Limit
      ---------------------------------------
      Minimum Absolute Pressure         1
      Maximum Absolute Pressure         5e+10
      Minimum Temperature               1
      Maximum Temperature               5000
      Minimum Turb. Kinetic Energy      1e-14
      Minimum Turb. Dissipation Rate    1e-20
```

```
      Maximum Turb. Viscosity Ratio    100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 150 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                  Settings
   ---------------------------------------------------------------
   Space                                  3D
   Time                                   Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                                Reynolds stress model
   Wall Treatment                         Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                  Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option     Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)         Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option       Disabled
   Heat Transfer                          Disabled
   Solidification and Melting             Disabled
   Species                                Disabled
   Coupled Dispersed Phase                Disabled
   NOx Pollutants                         Disabled
   SOx Pollutants                         Disabled
   Soot                                   Disabled
   Mercury Pollutants                     Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property                Units    Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)      j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity    w/m-k    constant   202.4

   Material: air (fluid)

      Property                          Units      Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------------------
      Density                           kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)                j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity              w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                         kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                  kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient     1/k        constant   0
      Speed of Sound                    m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)
```

```
      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         ------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)       0
         Turbulent Specification Method                   3
         Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)                 1
         Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)               1
         Turbulent Intensity (%)                          4.9999999
         Turbulent Length Scale (m)                       1
         Hydraulic Diameter (m)                           0.016
         Turbulent Viscosity Ratio                        10
         Reynolds-Stress Specification Method             0
         UU Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         VV Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         WW Reynolds Stresses (m2/s2)                     1
         UV Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
         VW Reynolds Stresses (m2/s2)                     0
```

```
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

entrada2

   Condition                                    Value
   -----------------------------------------------------
   Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
   Turbulent Specification Method               3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)             1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)           1
   Turbulent Intensity (%)                      4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                   1
   Hydraulic Diameter (m)                       0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                    10
   Reynolds-Stress Specification Method         0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                 1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                 0
   is zone used in mixing-plane model?          no

overflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
```

```
      Backflow Hydraulic Diameter (m)              0.015
      Backflow Turbulent Viscosity Ratio           10
      Reynolds-Stress Specification Method         0
      Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)        1
      Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)        1
      Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)        1
      Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)        0
      Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)        0
      Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)        0
      is zone used in mixing-plane model?          no
      Radial Equilibrium Pressure Distribution     no

   parede

      Condition                                              Value
      ------------------------------------------------------------
      Enable shell conduction?                               no
      Wall Motion                                            0
      Shear Boundary Condition                               0
      Define wall motion relative to adjacent cell zone?     yes
      Apply a rotational velocity to this wall?              no
      Velocity Magnitude (m/s)                               0
      X-Component of Wall Translation                        1
      Y-Component of Wall Translation                        0
      Z-Component of Wall Translation                        0
      Define wall velocity components?                       no
      X-Component of Wall Translation (m/s)                  0
      Y-Component of Wall Translation (m/s)                  0
      Z-Component of Wall Translation (m/s)                  0
      Wall Roughness Height (m)                              0
      Wall Roughness Constant                                0.5
      Rotation Speed (rad/s)                                 0
      X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                 0
      Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                 0
      Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                 0
      X-Component of Rotation-Axis Direction                 0
      Y-Component of Rotation-Axis Direction                 0
      Z-Component of Rotation-Axis Direction                 1
      X-component of shear stress (pascal)                   0
      Y-component of shear stress (pascal)                   0
      Z-component of shear stress (pascal)                   0
      Fslip constant                                         0
      Eslip constant                                         0
      Specularity Coefficient                                0
      Enable Thermal Stabilization?                          no
      Scale Factor                                           0
      Stabilization Method                                   1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      --------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
```

```
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation   yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step   10

   Relaxation

      Variable                      Relaxation Factor
      ------------------------------------------------
      Pressure                      0.3
      Density                       1
      Body Forces                   1
      Momentum                      0.7
      Volume Fraction               0.5
      Turbulent Kinetic Energy      0.8
      Turbulent Dissipation Rate    0.8
      Turbulent Viscosity           1
      Reynolds Stresses             0.5

   Linear Solver

                                    Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                      Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                      V-Cycle    0.1
      X-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                    Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction               Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy      Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate    Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses             Flexible   0.1           0.7

   Pressure-Velocity Coupling

      Parameter   Value
      --------------------------------
      Type        Phase Coupled SIMPLE

   Discretization Scheme

      Variable                      Scheme
      ---------------------------------------------------
      Momentum                      Second Order Upwind
      Volume Fraction               QUICK
      Turbulent Kinetic Energy      First Order Upwind
```

```
      Turbulent Dissipation Rate   First Order Upwind
      Reynolds Stresses            First Order Upwind

   Solution Limits

      Quantity                          Limit
      --------------------------------------
      Minimum Absolute Pressure         1
      Maximum Absolute Pressure         5e+10
      Minimum Temperature               1
      Maximum Temperature               5000
      Minimum Turb. Kinetic Energy      1e-14
      Minimum Turb. Dissipation Rate    1e-20
      Maximum Turb. Viscosity Ratio     100000
```

Caso 9 com diâmetro de partícula de 250 μm

```
Fluent
Version: 3d, dp, pbns, eulerian, RSM, transient (3d, double precision,
pressure-based, Eulerian, Reynolds stress model, transient)
Release: 15.0.7
Title:

Models
------

   Model                                Settings
   ------------------------------------------------------------------
   Space                                3D
   Time                                 Unsteady, 1st-Order Implicit
   Viscous                              Reynolds stress model
   Wall Treatment                       Standard Wall Functions
   Multiphase RSM Models                Mixture RSM
   RSM Wall Reflection Effects Option   Enabled
   RSM Wall B.C. Option (solve k)       Enabled
   Quadratic Pressure-Strain Option     Disabled
   Heat Transfer                        Disabled
   Solidification and Melting           Disabled
   Species                              Disabled
   Coupled Dispersed Phase              Disabled
   NOx Pollutants                       Disabled
   SOx Pollutants                       Disabled
   Soot                                 Disabled
   Mercury Pollutants                   Disabled

Material Properties
-------------------

   Material: aluminum (solid)

      Property                Units    Method     Value(s)
      ---------------------------------------------------
      Density                 kg/m3    constant   2719
      Cp (Specific Heat)      j/kg-k   constant   871
      Thermal Conductivity    w/m-k    constant   202.4
```

```
   Material: air (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      ------------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   1.225
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1006.43
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0242
      Viscosity                       kg/m-s     constant   1.7894e-05
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   28.966
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: water-liquid (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      -------------------------------------------------------------------
--
      Density                         kg/m3      constant   996.5
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   4182
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.6
      Viscosity                       kg/m-s     constant
0.00085000001
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   18.0152
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

   Material: oleo (fluid)

      Property                        Units      Method     Value(s)
      -----------------------------------------------------------------
      Density                         kg/m3      constant   840
      Cp (Specific Heat)              j/kg-k     constant   1000
      Thermal Conductivity            w/m-k      constant   0.0454
      Viscosity                       kg/m-s     constant   0.0132
      Molecular Weight                kg/kgmol   constant   1
      Thermal Expansion Coefficient   1/k        constant   0
      Speed of Sound                  m/s        none       #f

Boundary Conditions
-------------------

   Zones

      name        id   type
      --------------------------------
      entrada1    13   velocity-inlet
      entrada2    14   velocity-inlet
      overflow    15   pressure-outlet
      underflow   16   pressure-outlet
      parede      17   wall

   Setup Conditions

      entrada1

         Condition                                        Value
         -------------------------------------------------------
         Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)   0
```

```
   Turbulent Specification Method                3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)              1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)            1
   Turbulent Intensity (%)                       4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                    1
   Hydraulic Diameter (m)                        0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                     10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   is zone used in mixing-plane model?           no

entrada2

   Condition                                     Value
   -----------------------------------------------------
   Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)    0
   Turbulent Specification Method                3
   Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)              1
   Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)            1
   Turbulent Intensity (%)                       4.9999999
   Turbulent Length Scale (m)                    1
   Hydraulic Diameter (m)                        0.016
   Turbulent Viscosity Ratio                     10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   UU Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   VV Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   WW Reynolds Stresses (m2/s2)                  1
   UV Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   VW Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   UW Reynolds Stresses (m2/s2)                  0
   is zone used in mixing-plane model?           no

overflow

   Condition                                      Value
   ------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                        0
   Backflow Direction Specification Method        2
   Turbulent Specification Method                 3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)      1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)    1
   Backflow Turbulent Intensity (%)               4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)            1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)                0.01
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio             10
   Reynolds-Stress Specification Method           0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)          1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)          0
   is zone used in mixing-plane model?            no
```

```
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

underflow

   Condition                                     Value
   -------------------------------------------------------
   Gauge Pressure (pascal)                       0
   Backflow Direction Specification Method       2
   Turbulent Specification Method                3
   Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)     1
   Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)   1
   Backflow Turbulent Intensity (%)              4.9999999
   Backflow Turbulent Length Scale (m)           1
   Backflow Hydraulic Diameter (m)               0.015
   Backflow Turbulent Viscosity Ratio            10
   Reynolds-Stress Specification Method          0
   Backflow UU Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow VV Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow WW Reynolds Stresses (m2/s2)         1
   Backflow UV Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow VW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   Backflow UW Reynolds Stresses (m2/s2)         0
   is zone used in mixing-plane model?           no
   Radial Equilibrium Pressure Distribution      no

parede

   Condition                                                Value
   ---------------------------------------------------------------
   Enable shell conduction?                                 no
   Wall Motion                                              0
   Shear Boundary Condition                                 0
   Define wall motion relative to adjacent cell zone?       yes
   Apply a rotational velocity to this wall?                no
   Velocity Magnitude (m/s)                                 0
   X-Component of Wall Translation                          1
   Y-Component of Wall Translation                          0
   Z-Component of Wall Translation                          0
   Define wall velocity components?                         no
   X-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Y-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Z-Component of Wall Translation (m/s)                    0
   Wall Roughness Height (m)                                0
   Wall Roughness Constant                                  0.5
   Rotation Speed (rad/s)                                   0
   X-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   Z-Position of Rotation-Axis Origin (m)                   0
   X-Component of Rotation-Axis Direction                   0
   Y-Component of Rotation-Axis Direction                   0
   Z-Component of Rotation-Axis Direction                   1
   X-component of shear stress (pascal)                     0
   Y-component of shear stress (pascal)                     0
   Z-component of shear stress (pascal)                     0
   Fslip constant                                           0
   Eslip constant                                           0
   Specularity Coefficient                                  0
   Enable Thermal Stabilization?                            no
```

```
         Scale Factor                                          0
         Stabilization Method                                  1

Solver Settings
---------------

   Equations

      Equation            Solved
      -------------------------
      Flow                yes
      Volume Fraction     yes
      Turbulence          yes
      Reynolds Stresses   yes

   Numerics

      Numeric                          Enabled
      ---------------------------------------
      Absolute Velocity Formulation    yes

   Unsteady Calculation Parameters


      ---------------------------------------
      Time Step (s)                    0.00013
      Max. Iterations Per Time Step    10

   Relaxation

      Variable                     Relaxation Factor
      ----------------------------------------------
      Pressure                     0.3
      Density                      1
      Body Forces                  1
      Momentum                     0.7
      Volume Fraction              0.5
      Turbulent Kinetic Energy     0.8
      Turbulent Dissipation Rate   0.8
      Turbulent Viscosity          1
      Reynolds Stresses            0.5

   Linear Solver

                                   Solver     Termination   Residual
Reduction
      Variable                     Type       Criterion     Tolerance
      ------------------------------------------------------------------
-------
      Pressure                     V-Cycle    0.1
      X-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Y-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Z-Momentum                   Flexible   0.1           0.7
      Volume Fraction              Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Kinetic Energy     Flexible   0.1           0.7
      Turbulent Dissipation Rate   Flexible   0.1           0.7
      Reynolds Stresses            Flexible   0.1           0.7
```

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	Phase Coupled SIMPLE

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Momentum	Second Order Upwind
Volume Fraction	QUICK
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Reynolds Stresses	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000