PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS
ESCOLA DE QUÍMICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias

João Victor Barbosa Alves

Orientador:
Ricardo de Andrade Medronho, PhD

Janeiro, 2012

Alves, João Victor Barbosa.

Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias / João Victor Barbosa Alves. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.
XVIII, 90 p.; il.

(Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2012.

Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.

1. Hidrociclone. 2. Fluidodinâmica Computacional. 3. CFD. 4. Águas Oleosas. 5. Dissertação.

(Pós-Graduação – UFRJ/EQ/TPQB). 6. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias

João Victor Barbosa Alves

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

Aprovado por:

Prof. Marcos Antonio de Souza Barrozo, D.Sc.

Prof. André Luiz Hemerly Costa, D.Sc.

Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Orientado por:

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Janeiro de 2012

Dedico esta mais nova conquista a todos os meus familiares que sempre me apoiaram e me motivaram a continuar por esta busca incessante por conhecimento e por meus sonhos. A estes que quando caio estão sempre ao meu lado, me estendendo as suas mãos para que eu me levante e tente novamente. Em especial agradeço, à minha mãe Marisa, minha tia Marinalva, às minhas primas Patrícia e Catia, aos meus padrinhos Marilene e Vandair, ao meu irmão e amigo Alex, aos meus amigos Leandro, Denison e Julio, ao Wagner, ao meu grande amor Giselle, que agora é a minha esposa e a dona Lúcia. Dedico também à minha amada avó Odilea, que sempre nos ensinou muito sobre o amor, honestidade, afeto, carinho, união e fé.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas, nos auxiliam muito"

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo amor, apoio, compreensão e por entender as minhas ausências, necessárias para a construção de mais este sonho.

Ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

À PETROBRAS pelo apoio fornecido.

Aos amigos e orientados do LABCFD, por terem tido em mim a confiança para ajudá-los em seus estudos. Em especial à Heloisa, Natália, Flávio, Amanda, Sara, Elie, Diogo, Letícia, Rafael, Rodrigo, Jonas, Tamaris, Alvio, Andrea, Cristiano e Eduardo. Tenham certeza que foram ótimos os momentos passados neste laboratório, com histórias incríveis e boas gargalhadas, que jamais esquecerei. Saibam também que aprendi muito com vocês.

Agradeço em especial ao meu orientador Ricardo de Andrade Medronho por toda a motivação, inspiração, incentivo e conhecimentos divididos. Por entender toda a minha “teimosia”. Pelos desafios a mim impostos quanto à orientação de inúmeros alunos, aulas e relatórios. E por ter acreditado em mim profissionalmente.

Resumo da Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Ciências (M.Sc.)

HIDROCICLONE PARA A SEPARAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL DE ÁGUA EM REFINARIAS

João Victor Barbosa Alves
Janeiro 2012

Orientador: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

O presente trabalho teve por objetivo otimizar, com o auxílio de CFD e técnicas de planejamento de experimentos, as proporções geométricas de um hidrociclone para minimizar a fração volumétrica de óleo na corrente diluída, com altos valores de eficiência de separação água/óleo de águas oleosas oriundas de refinaria. O sistema estudado é multifásico, composto por pequenas gotas de óleo residual oriundas dos processos de separação, tais como vasos separadores. Pretende-se que este hidrociclone venha a ser mais uma ferramenta utilizada no processo de tratamento de águas oleosas para as refinarias. A simulação numérica foi validada com os resultados experimentais de dois hidrociclones, com geometrias diferentes obtidos na literatura, os quais tiveram boa concordância quanto ao perfil de velocidades e queda de pressão. Nas simulações numéricas empregou-se o programa de CFD Ansys 13.0. A malha hexaédrica utilizada foi construída no ICEM e obtida com base em teste de independência de malha. A solução numérica do problema utilizou o programa Ansys Fluent, através das abordagens Lagrangeana e Euleriana e RSM como modelo de turbulência. Os efeitos de quebra e coalescência foram desprezados neste estudo pelo sistema ser diluído. Com o planejamento de experimentos foi possível se obter equações das principais características de desempenho do hidrociclone, eficiência granulométrica, razão de fluidos, eficiência granulométrica reduzida, queda de pressão, fração volumétrica de óleo na saída concentrada e a fração volumétrica de óleo na saída diluída, em função dos diâmetros do diluído e do concentrado. Estas equações mostraram, através da ANOVA, significância estatística. Três distribuições de tamanhos de gotas de óleo (mediana das distribuições de 28, 45 e 130 μm) foram utilizadas para verificar o desempenho do hidrociclone otimizado, produzindo eficiências totais de separação de 45%, 83% e 99%, respectivamente. A concentração de óleo na saída de diluído foi de 58 ppm, para uma alimentação com 5000 ppm. Apesar da alta eficiência obtida, testou-se um arranjo de hidrociclones em série que forneceu uma eficiência total reduzida do conjunto de 99,5% e concentração de óleo na saída de diluído de 43 ppm. Estes resultados mostram que o hidrociclone estudado possui um bom potencial para a separação de dispersões óleo/água.

Palavras-chave: Hidrociclone. Fluidodinâmica Computacional. CFD. Águas Oleosas.

Abstract of the Master Dissertation presented to Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - EQ/UFRJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HYDROCYCLONE FOR THE SEPARATION OF RESIDUAL WATER IN OIL REFINERY

João Victor Barbosa Alves
January 2012

Supervisor: Ricardo de Andrade Medronho, PhD

This study aimed to optimize, with the aid of CFD and design of experiments, the geometric proportions of a hydrocyclone to minimize the oil volume fraction in a diluted stream of oily waters originated in oil refineries. The multiphase system studied is composed of small drops of oil in water coming from the separation processes, such as separator vessels. This hydrocyclone is intended to be another tool to be used in the treatment of oily water from oil refineries. The numerical simulations were validated against experimental results of two hydrocyclones of different geometries found in the literature. The simulated results showed good agreement to the velocity profile and pressure drop. The CFD program used in this work was the Ansys 13.0. The meshes were composed by hexahedron elements, built using the ICEM program. For the numerical solutions, the Ansys Fluent was employed, using a Lagrangian - Eulerian approach and a RSM turbulence model. The effects of breakage and coalescence have been neglected in this study due to the low oil concentration. Through design of experiments analysis, it was possible to obtain equations for the main performance characteristics of the hydrocyclone, grade efficiency, overflow split ratio, reduced grade efficiency, pressure drop, overflow oil volume fraction and underflow oil volume fraction, as a function of underflow and overflow diameters. These equations showed statistical significance, using ANOVA. Three oil droplet size distributions (median of distributions: 28, 45 and 130 mm) were used to verify the performance of the optimized hydrocyclone. The total separation efficiencies obtained were of 45%, 83% and 99%, respectively. The oil concentration in the underflow (diluted stream) was 58 ppm for a feed with 5000 ppm of oil. Despite the high efficiency obtained, an arrangement of two hydrocyclones in series provided an overall reduced efficiency of 99,5% and an oil concentration in the underflow of 43 ppm. These results show that the optimized hydrocyclone has a good potential for oily water treatment.

Key words: Hydrocyclone. Computational Fluid Dynamics. CFD. Oily Waters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO 2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1. HIDROCICLONES 3
2.2. HIDROCICLONES UTILIZADOS PARA SEPARAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO 4
2.3. PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE NA SEPARAÇÃO ÓLEO-ÁGUA. 6
2.4. DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DE PARTÍCULAS. 8
2.5. RAZÃO DE FLUIDO 9
2.6. EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA (G) 9
2.7. EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA REDUZIDA (G') 10
2.8. EFICIÊNCIA TOTAL OU GLOBAL (E_T) 11
2.9. EFICIÊNCIA TOTAL REDUZIDA (E'_T) 12
2.10. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA NAS SAÍDAS 12
3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) 14
3.1. INTRODUÇÃO 14
3.2. ETAPAS DE UMA SIMULAÇÃO EM CFD 15
3.3. MODELOS MATEMÁTICOS 16
3.3.1. CONSERVAÇÃO DA MASSA (EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE) 16
3.3.2. CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO (EQUAÇÃO DO MOVIMENTO) 17
3.3.3. ABORDAGEM EULERIANA-EULERIANA 18
3.3.4. ABORDAGEM EULERIANA-LAGRANGEANA 18
3.3.5. TURBULÊNCIA 19
3.4. MALHA 23
4. MATERIAIS E MÉTODOS 26
4.1. PROGRAMAS E PODER COMPUTACIONAL 26
4.2. VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA 26
4.3. GEOMETRIA 27
4.3.1. HIDROCICLONE UTILIZADO POR MARINS *ET AL.* (2010) 28
4.3.2. HIDROCICLONE UTILIZADO POR ZHOU *ET AL.*(2010) 29
4.4. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS – MODELO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA 29
4.5. MALHAS 31
4.5.1. MALHA PARA O HIDROCICLONE EMPREGADO POR MARINS *ET AL. (2010)* 33
4.5.2. MALHA PARA O HIDROCICLONE EMPREGADO POR ZHOU *ET AL.* (2010) 33
4.6. CONDIÇÕES DE CONTORNO 34

4.6.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O HIDROCICLONE EMPREGADO POR MARINS *ET AL.* (2010) 36
4.6.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O HIDROCICLONE EMPREGADO POR ZHOU *ET AL.* (2010) 37
4.6.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA OS HIDROCICLONES EMPREGADOS NO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS 39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 41
5.1. TESTE DE MALHA PARA OS HIDROCICLONES DA VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA 41
5.2. RESULTADOS GERAIS 42
5.2.1. HIDROCICLONE EMPREGADO POR MARINS *ET AL.* (2010) 42
5.2.2. HIDROCICLONE EMPREGADO POR ZHOU *ET AL.* (2010) 47
5.3. EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO 50
5.3.1. EFICIÊNCIAS PARA O HIDROCICLONE EMPREGADO POR MARINS *ET AL.* (2010) .. 51
5.3.2. EFICIÊNCIAS PARA O HIDROCICLONE EMPREGADO POR ZHOU *ET AL.* (2010) 56
5.4. RESULTADO DO TESTE DE MALHA PARA O PONTO CENTRAL DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS 59
5.5. RESULTADOS DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS 64
5.5.1. HIDROCICLONE OTIMIZADO 68
5.6. VELOCIDADES TANGENCIAIS PARA OS HIDROCICLONES OTIMIZADOS 70
5.7. EFICIÊNCIAS PARA OS HIDROCICLONES ESCOLHIDOS NO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS 71
5.7.1. EFICIÊNCIAS OBTIDAS COM A ABORDAGEM LAGRANGEANA PARA O EXPERIMENTO 4 71
5.7.2. EFICIÊNCIAS OBTIDAS COM A ABORDAGEM EULERIANA PARA O EXPERIMENTO 4. 73
5.7.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS EFICIÊNCIAS TOTAIS OBTIDAS COM A ABORDAGEM LAGRANGEANA E EULERIANA PARA O EXPERIMENTO 4. 74
5.7.4. EFICIÊNCIAS OBTIDAS COM A ABORDAGEM LAGRANGEANA PARA O EXPERIMENTO 8 75
5.7.5. EFICIÊNCIAS OBTIDAS COM A ABORDAGEM EULERIANA PARA O EXPERIMENTO 8 77
5.7.6. COMPARAÇÃO ENTRE AS EFICIÊNCIAS TOTAIS OBTIDAS COM A ABORDAGEM LAGRANGEANA E EULERIANA PARA O EXPERIMENTO 8. 79
5.7.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS HIDROCICLONES 4 E 8 OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM EULERIANA 80
5.8. EFICIÊNCIA DOS HIDROCICLONES OTIMIZADOS EM SÉRIE 81
6. CONCLUSÕES 85
7. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES 86
8. BIBLIOGRAFIA 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões do hidrociclone empregado por Marins *et al.* (2010). 28

Tabela 2: Proporções do hidrociclone empregado por Zhou *et al*. (2010). 29

Tabela 3: Dimensões do hidrociclone base, ponto central do planejamento de experimentos. 30

Tabela 4: Dimensões geradas com o planejamento central através do modelo de superfície de resposta com DCCR em variáveis reais e codificadas. 31

Tabela 5: Condições de contorno e propriedades utilizadas nas simulações com abordagem Euleriana utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho de Marins *et al.* (2010)..... 36

Tabela 6: Modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho do Marins *et al.* (2010). 37

Tabela 7: Condições de contorno e propriedades utilizadas nas simulações do modelo Euleriano utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho do Zhou *et al*. (2010). 38

Tabela 8: Modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho do Zhou *et al*. (2010). 38

Tabela 9: Condições de contorno e propriedades utilizadas nas simulações com abordagem Euleriana utilizadas nas simulações do planejamento de experimentos..... 39

Tabela 10: Modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação do hidrociclone do planejamento de experimentos. 39

Tabela 11: Resultados do teste de malha para o hidrociclone de Marins *et al*. (2010). 42

Tabela 12: Comparação dos valores experimentais obtidos por Marins *et al*. (2010) com os da simulação para a pressão na entrada (P_e) e para a razão entre as quedas de pressão (RQP). ... 45

Tabela 13: Expoente n da curva de eficiência granulométrica reduzida (Equação 6) e o diâmetro de corte reduzido d'_{50} obtidas com as abordagens Lagrangeana e Euleriana. 53

Tabela 14: Parâmetros das distribuições de tamanhos de gotas empregadas neste trabalho.... 55

Tabela 15: Eficiências totais reduzidas obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas ao se alimentar o hidrociclone Marins *et al.* (2010) com vários tamanhos de gotas (E'_{TG}) empregando as abordagens lagrangeana e euleriana e com a distribuição de tamanhos (E'_{Ty}). 56

Tabela 16: Eficiências totais reduzidas obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas ao se alimentar o hidrociclone de Zhou *et al.* (2010) com vários tamanhos de gotas (E'_{TG}) e com as distribuições de tamanhos (E'_{Ty}), ambas as abordagens lagrangeana. 59

Tabela 17: Quantidade de elementos para as principais regiões geométricas do hidrociclone ponto central para as três malhas utilizadas no teste de independência de malha. 60

Tabela 18: Resultados do teste de malha para o hidrociclone ponto central do planejamento de experimentos, para os três tamanhos de malha. 62

Tabela 19: Resultado do planejamento de experimentos para as diversas geometrias simuladas com diâmetro de gota de óleo igual a 28 μm. 64

Tabela 20: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a eficiência granulométrica G. 65

Tabela 21: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a razão de fluido R_f. 65

Tabela 22: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a eficiência granulométrica reduzida G'. 66

Tabela 23: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a queda de pressão ΔP. 66

Tabela 24: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a fração volumétrica de óleo na corrente concentrada fvc. 66

Tabela 25: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a fração volumétrica de óleo na corrente diluída fvd. 66

Tabela 26: Coeficientes da Equação 55 para G, Rf, G', ΔP, fvc e fvd do planejamento de experimentos como função de Do e Du. 67

Tabela 27: Valores dos diâmetros de diluído D_o e concentrado D_u com a otimização do planejamento de experimento com DCCR e utilizando como funções objetivo fvc e fvd. 69

Tabela 28: Valores obtidos para as principais variáveis com CFD e com as equações do planejamento de experimentos para gota de óleo com diâmetro de 28 μm. 69

Tabela 29: Parâmetros da curva de eficiência granulométrica reduzida para as abordagens Lagrangeana e Euleriana obtidos com o hidrociclone do experimento 4. 75

Tabela 30: Eficiências obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas (fina, média e grossa) com o hidrociclone do experimento 4. 75

Tabela 31: Parâmetros da curva de eficiência granulométrica reduzida para as abordagens Lagrangeana e Euleriana obtidos com o hidrociclone do experimento 8. 79

Tabela 32: Eficiências obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas (fina, média e grossa) com o hidrociclone do experimento 8. 79

Tabela 33: Valores de eficiência total e de fração volumétrica de óleo nas saídas concentrada e diluída para os dois hidrociclones, com base nos valores obtidos com a abordagem Euleriana para a distribuição grossa. 80

Tabela 34: Fração cumulativa das partículas na alimentação ($y_{e|d}$) e no diluído ($y_{d|d}$) do hidrociclone 4. 83

Tabela 35: Valores de eficiência granulométrica reduzida do hidrociclone 8 no arranjo em série, eficiência total reduzida do conjunto e fração volumétrica na saída diluída do conjunto. 84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Princípio de funcionamento de um hidrociclone (adaptado de Husveg, 2007). 1

Figura 2: Exemplo de curva de eficiência granulométrica, com R_f = 0,35. 10

Figura 3: Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida e do diâmetro de corte reduzido (d'_{50})..... 11

Figura 4: Velocidade instantânea *u*, velocidade média *U* e flutuação *u'* (Bird *et al*., 2004).... 19

Figura 5: Malha estruturada com elementos hexaédricos. 24

Figura 6: Malha não-estruturada com elementos tetraédricos. 25

Figura 7: Malha Híbrida contendo elementos hexaédricos próximos à parede e tetraédricos na região central. 25

Figura 8: Vista esquemática de um hidrociclone com dupla entrada retangular e duas regiões cônicas. 27

Figura 9: Vista esquemática de um hidrociclone clássico e suas variáveis geométricas. 28

Figura 10: Distribuição dos experimentos gerados com o planejamento central através do modelo de superfície de resposta com DCCR. 31

Figura 11: Malha do hidrociclone empregado por Marins *et al*. (2010): (a) vista do refino da malha na zona central, (b) vista do refino no concentrado, (c) Vista superior, (d) vista em perspectiva. 33

Figura 12: Malha do hidrociclone empregado por Zhou *et al*. (2010): (a) vista do refino da malha na zona central, (b) vista do refino no concentrado, (c) Vista superior, (d) vista em perspectiva. 34

Figura 13: Comparação entre os perfis de velocidades tangenciais para as 4 diferentes malhas testadas para o hidrociclone de Marins *et al.* (2010), medidas a 180 mm abaixo do topo externo do tubo de concentrado. 41

Figura 14: Comparação entre os perfis de velocidade tangencial experimental e simulado: (a) Posição 180 mm. (b) Posição 200 mm. 42

Figura 15: Comparação entre os perfis de velocidade tangencial experimental e do simulado: (a) Posição 220 mm. (b) Posição 320 mm. 43

Figura 16: Comparação entre os perfis de velocidade tangencial experimental e do simulado: (a) Posição 440 mm. (b) Posição 600 mm. 43

Figura 17: Linhas de corrente (caminho percorrido pela fase contínua). 44

Figura 18: Perfil de velocidades tangencias do fluido. 44

Figura 19: Perfil de pressões no hidrociclone empregado por Marins *et al*. (2010). 45

Figura 20: Fração volumétrica de óleo no plano vertical para o hidrociclone de Marins *et al.* (2010). 46

Figura 21: Vetores velocidade na saída superior do hidrociclone de Marins *et al.* (2010). 46

Figura 22: Posição das linhas de medição, via PDA, dos perfis de velocidades tangenciais obtidas por Zhou *et al*. (2010). 47

Figura 23: Comparação entre os dados experimentais de Zhou *et al*. (2010) e os da simulação numérica do presente trabalho, em Z=0 mm e para 48

Figura 24: Comparação entre os dados experimentais de Zhou *et al*. (2010) e os da simulação numérica do presente trabalho, em Z=30 mm e para 48

Figura 25: Vórtices externo descendente e interno ascendente no interior do hidrociclone, obtidos com simulação numérica. 49

Figura 26: Perfis de velocidades tangenciais (a) e de pressões (b). 50

Figura 27: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida a partir dos dados obtidos com o hidrociclone do Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem lagrangeana. 51

Figura 28: Eficiência granulométrica (a) e a eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem lagrangeana. 52

Figura 29: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida a partir dos dados obtidos com o hidrociclone de Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem euleriana. 53

Figura 30: Eficiências granulométrica (a) e granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone de Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem euleriana. 54

Figura 31: Distribuições de tamanhos de gotas empregadas neste trabalho.....55

Figura 32: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida a partir dos dados obtidos com o hidrociclone do Marins et al. (2010), utilizando a abordagem lagrangeana. 57

Figura 33: Curvas de eficiência granulométrica (a) e de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do Zhou *et al.* (2010), utilizando a abordagem Lagrangeana. 58

Figura 34: Detalhes da malha com 754.396 elementos (M1) do hidrociclone ponto central do planejamento de experimentos. 61

Figura 35: Comparação entre os perfis de velocidades tangenciais nas diferentes malha, medidos a 17 mm (a), 100 mm (b), 200 mm (c), 300 mm (d) e a 400 mm (e) abaixo do topo da região cilíndrica do hidrociclone. 63

Figura 36: Respostas do planejamento de experimento através da análise das superfícies de respostas com dois fatores. (a) G, (b) R_f, (c) G', (d) ΔP, (e) fvc e (f) fvd. 68

Figura 37: Comparação entre os perfis de velocidades tangenciais dos hidrociclones dos experimentos 4 e 8, medidos a 17 mm (a), 100 mm (b), 200 mm (c), 300 mm (d) e 400 mm (e) abaixo do teto do hidrociclone. 71

Figura 38: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 4, utilizando a abordagem Lagrangeana. 72

Figura 39: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 4, utilizando a abordagem Lagrangeana..... 73

Figura 40: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 4 utilizando a abordagem Euleriana..... 73

Figura 41: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 4, utilizando a abordagem Euleriana. 74

Figura 42: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 8 utilizando a abordagem lagrangeana..... 76

Figura 43: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 8, utilizando a abordagem lagrangeana..... 77

Figura 44: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 8, utilizando a abordagem euleriana. 78

Figura 45: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 8, utilizando a abordagem euleriana. 79

Figura 46: Arranjo em série dos hidrociclones dos experimentos 4 e 8 do planejamento. 82

LISTA DE SÍMBOLOS

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

C_D	Coeficiente de arraste
d	Diâmetro de partícula ou gota de óleo (L)
d_{50}	Diâmetro de corte (L)
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido (L)
D_c	Diâmetro do hidrociclone (L)
D_i	Diâmetro do duto de alimentação (L)
$d_{máx}$	Diâmetro da maior partícula existente na distribuição (L)
$d_{mín}$	Diâmetro da menor partícula existente na distribuição (L)
D_o	Diâmetro do concentrado(*overflow*) (L)
D_u	Diâmetro do diluído (*underflow*) (L)
E_T	Eficiência total
E'_T	Eficiência total reduzida
f_{vc}	Fração volumétrica de óleo na saída concentrada
f_{vd}	Fração volumétrica de óleo na saída diluída
f_{ve}	Fração volumétrica de óleo na entrada
$\boldsymbol{F_i}$	Forças de inércia por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
$\boldsymbol{F_D}$	Força de arrasto ($M\ L\ T^{-2}$)
$\boldsymbol{F_o}$	Outras forças (sustentação, browniana, etc.) ($M\ L\ T^{-2}$)
$\boldsymbol{F_p}$	Forças de pressão por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
$\boldsymbol{F_v}$	Forças viscosas por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
$\boldsymbol{F_g}$	Forças de campo por unidade de volume ($M\ T^{-2}\ L^{-2}$)
$\boldsymbol{F_x}$	Força de aceleração adicional ($M\ L\ T^{-2}$)
g	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
m_p	Massa da partícula (M)
M	Variável instantânea qualquer
$\bar{M}$	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_c	Pressão no concentrado ($M\ L^{-1}\ T^{-2}$)

P_d	Pressão no diluído (M L^{-1} T^{-2})
Q_c	Vazão volumétrica de óleo na saída concentrada (L^3 T^{-1})
Q_d	Vazão volumétrica de óleo na saída diluída (L^3 T^{-1})
Q_e	Vazão volumétrica de óleo na entrada (L^3 T^{-1})
Q_{fc}	Vazão volumétrica de água na saída concentrada (L^3 T^{-1})
Q_{fd}	Vazão volumétrica de água na saída diluída (L^3 T^{-1})
Q_{fe}	Vazão volumétrica de água na entrada (L^3 T^{-1})
Re_p	Número de Reynolds da partícula
R_f	Razão de fluido
RQP	Razão entre quedas de pressão
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})
$\boldsymbol{v}$	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_c	Vazão mássica de óleo no concentrado (M T^{-1})
W_e	Vazão mássica de óleo na entrada (M T^{-1})
$W_{c\|d}$	Vazão mássica da gota de óleo de dado diâmetro no concentrado (M T^{-1})
$W_{e\|d}$	Vazão mássica da gota de óleo de dado diâmetro na entrada (M T^{-1})
W_{fc}	Vazão mássica de água no concentrado (*overflow*) (M T^{-1})
W_{fe}	Vazão mássica de água na entrada (M T^{-1})
y	Distribuição cumulativa menor que dado d na alimentação, em fração ponderal
$y_d\|_d$	Fração cumulativa menor que dado d no diluído, em fração ponderal
$y_e\|_d$	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})
$\boldsymbol{\tau}$	Tensor tensão (M L^{-1} T^{-2})
ϕ	Esfericidade da partícula

1. INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos de construção simples, por não utilizarem partes móveis internas como as centrífugas. São caracterizados pelo baixo custo de fabricação, manutenção e operação além de necessitarem de espaço reduzido na planta (Medronho, 1984).

O campo de aplicação dos hidrociclones é bastante vasto. Estes equipamentos são utilizados para separações sólido-líquido como concentrador, classificador ou limpador, em separações sólido-sólido, em separações líquido-líquido e em sistemas gás-líquido, para remoção de gases dissolvidos (Castilho e Medronho, 2000 e Heiskanen, 1993). Atualmente algumas aplicações para separação de células animais também são encontradas na literatura (Castilho e Medronho, 2002, Lubberstedt *et al.*, 2000 e Jockwer *et al.*, 2001).

Quanto ao comportamento do fluido, este é caracterizado por um movimento espiralado externo descendente e um interno ascendente. O escoamento em espiral gera um campo centrífugo no interior do equipamento que, graças à diferença de densidade entre as duas fases, promove a separação da fase dispersa, como apresentado na Figura 1. Quando empregado no tratamento de águas oleosas, a fase dispersa, menos densa, migra para o eixo central do hidrociclone e sai mais concentrada através da saída superior, chamado de concentrado (*overflow*). A fase mais densa sai, junto com as menores gotas de óleo, através da saída inferior, chamado de diluído (*underflow*), sendo a velocidade tangencial a principal responsável pela separação (Zhou *et al.*, 2010).

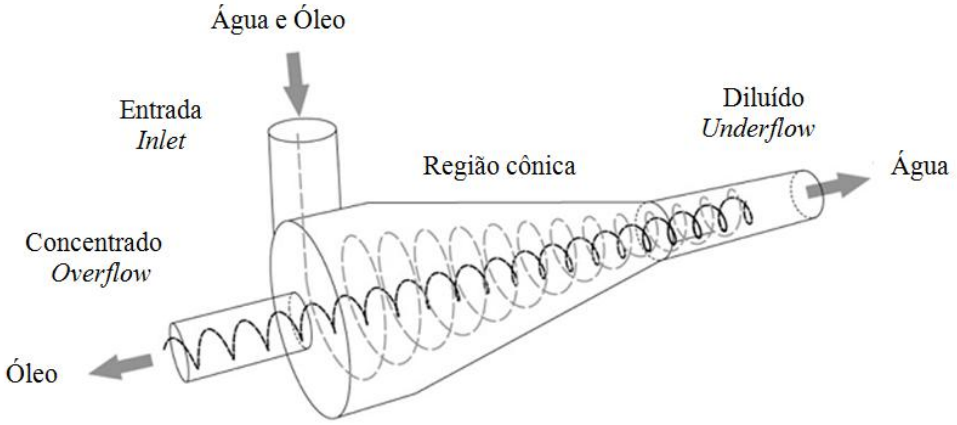


Figura 1: Princípio de funcionamento de um hidrociclone (adaptado de Husveg, 2007).

O desempenho de um hidrociclone é, principalmente, influenciado pela geometria do equipamento, diferença de densidades das fases, pelas condições de operação como vazão da entrada, concentração e distribuição de diâmetros da fase dispersa além da pressão nas saídas.

Com o avanço da capacidade de processamento dos computadores e avanços nos algoritmos e técnicas numéricas, as ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) estão sendo cada vez mais empregadas na resolução de problemas envolvendo escoamento de fluidos em condições complexas. Muitas vezes os problemas de engenharia se limitavam à resolução de condições mais simples para obtenção de soluções analíticas ou adotando muitas simplificações para ser possível a sua resolução. Embora a simulação numérica ainda não substitua completamente os experimentos, ela reduz os custos experimentais para investigações de variáveis de projeto e sua otimização, além de permitir estudos para melhoria das condições operacionais.

1.1. Objetivos do trabalho

O presente trabalho teve como objetivo otimizar, com o auxílio de CFD e técnicas de planejamento de experimentos, as proporções geométricas de um hidrociclone para minimizar a fração volumétrica de óleo na corrente diluída, com altos valores de eficiência de separação água/óleo de águas oleosas oriundas de refinaria.

O sistema estudado é multifásico, composto por pequenas gotas de óleo residual oriundas dos processos de separação, tais como vasos separadores. Pretende-se que este hidrociclone venha a ser mais uma ferramenta utilizada no processo de tratamento de águas oleosas para as refinarias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Hidrociclones

Segundo Svarovsky (1984) o primeiro registro de patente de um hidrociclone data de 1891. No entanto este equipamento começa a despertar o interesse da indústria somente em meados da década de 40.

Inicialmente os hidrociclones foram utilizados no beneficiamento de minérios. Porém, atualmente este equipamento é empregado em diversos campos da indústria sempre que há a necessidade de um processo de separação de partículas dispersas em um líquido.

Quanto às principais características dos hidrociclones podemos citar algumas vantagens e desvantagens (Medronho, 1984 e Svarovsky, 1984):

Vantagens:

- são de fácil construção, instalação, manutenção e estrutura de fixação;
- apresentam baixo custo operacional devido à ausência de partes móveis, sendo necessário apenas o bombeamento do fluido, que em alguns casos nem necessita de bomba dedicada;
-ocupam pouco espaço quando comparado a outros separadores, sendo ideal para aplicações em plataformas de exploração e de explotação de petróleo;
- fornecem baixos tempos de residência e, com isso, rápidos tempos de resposta em relação a sistemas de controle, ou seja, apresentam baixos tempos mortos;
- suportam drásticas condições de operação quanto à pressão e vazão;
- apresentam grande versatilidade quanto às suas aplicações, podendo ser empregados na separação sólido/líquido, sólido/sólido, gás/líquido e líquido/líquido.

Desvantagens:

- eles são mais susceptíveis à abrasão do que outros equipamentos de separação, tais como sedimentadores, centrífugas e filtros, devido às altas tensões de cisalhamento;
- pouca flexibilidade quanto à mudanças de vazão e distribuição na alimentação, dificultando a utilização de um equipamento projetado para uma condição tenha bom desempenho em outra;

2.2. Hidrociclones utilizados para separação líquido-líquido

Os hidrociclones vêm sendo utilizados a mais de meio século industrialmente. Porém, somente no início da década de 80, com o trabalho pioneiro de Colman e Thew (1980), é que estes separadores começaram a ser utilizados para separação de suspensões óleo-água. Diversos trabalhos vêm sendo publicados sobre a relação entre o desempenho de hidrociclones e suas variáveis geométricas (Meldrun, 1987; Belaidi e Thew, 2003) e condições de operação e controle (Heyes *et al.*, 1985; Meldrun, 1987; Bennett e Williams, 2004; Husveg *et al.* 2007). Atualmente, muitos artigos utilizam a fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo de hidrociclones (Schütz *et al.*, 2009; Ataíde *et al.*, 2010; Noroozi e Hashemabadi, 2011) e outros utilizam equipamentos de alta tecnologia para fazer medições experimentais, com sistemas de câmeras de alta resolução, do perfil de velocidade e concentração.Estes equipamentos utilizam técnicas como, por exemplo, a velocimetria por imagem de partículas (PIV - *Particle Image Velocimetry*), a análise dinâmica de partículas (PDA - *Particle Dynamics Analyser*) e a velocimetria de *Laser Doppler* (LDA - *Laser-Doppler Anemometry* ou LDV - *Laser-Doppler Velocimetry*) (Bai *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2010; Marins *et al.*, 2010).

Heyes *et al.* (1985) estudaram o desempenho de hidrociclones de 35 mm e 60 mm, produzidos por BWM (Austrália), para separação de água oleosa em plataformas de petróleo. Os pesquisadores adotaram um hidrociclone com duas seções angulares com uma única entrada circular e operando com queda de pressão diferentes nas saídas (35 mm). Foram conduzidos experimentos em cinco plataformas de petróleo. Para as condições de operação de três das cinco plataformas, foram obtidas concentrações menores que 30 ppm. Em uma delas, foram obtidas concentrações abaixo de 120 ppm com um arranjo em série. Porém, para todas essas, foram admitidas concentrações muito diluídas na entrada, menores que 700 ppm. Já na quinta plataforma, a concentração da entrada foi de 3700 ppm e a concentração de saída obtida foi de 60 ppm. Este último experimento foi conduzido com equipamentos em série.

Meldrun (1987) também conduziu testes com os hidrociclones de 35 mm e 60 mm, produzidos por BWM (Austrália). Porém, neste estudo também foi aumentado o tamanho da entrada do equipamento de 35 mm. Todos os experimentos operaram com quedas de pressão diferentes nas saídas. Para a operação do hidrociclone de 35 mm contendo 40 ppm,

em média, na entrada foram obtidas concentrações entre 5 e 10 ppm na saída diluída. Para os hidrociclones que operaram com a entrada maior houve grandes variações de concentração de óleo na saída de água. Porém, observa-se que para os maiores valores de concentração na entrada deste hidrociclone (1,6-8,3%), operando com uma razão de fluido entre 10 e 20%, foram obtidas concentrações de óleo na saída inferior menores que 10ppm. Neste estudo também foram geradas curvas que relacionam a eficiência com a vazão e com a razão de fluidos e de pressão com a vazão.

Husveg *et al* (2007) estudaram o desempenho de um hidrociclone para separação óleo/água com a variação da vazão da alimentação. A geometria do separador apresenta um diâmetro da seção cilíndrica de 40 mm, entrada circular tangencial ao corpo cilíndrico, região cônica de 15° seguida de uma outra região com 1,5°, diâmetro da saída superior de 1mm e saída inferior com 10mm. Neste estudo os autores apresentam variações da vazão da alimentação como função linear crescente, linear decrescente e senoidal. Devido à dependência linear da queda de pressão com a razão de fluido os autores utilizaram a razão entre as quedas de pressão (RQP) como parâmetro para manter a eficiência controlada e constante.

Schütz *et al*. (2009) investigaram, numericamente, os efeitos de quebra e coalescência durante a separação liquido-liquido com modelo populacional. Estes efeitos foram avaliados para duas geometrias de hidrociclones diferentes, com uma e duas regiões cônicas, para uma e duas entradas e com vazões diferentes. Os autores verificaram que o hidrociclone com duas regiões cônicas apresentaram menor gradiente de velocidade. Assim como os equipamentos com duas entradas mostraram uma redução do cisalhamento na região cilíndrica do equipamento.

Ataíde *et al*. (2010) compararam os resultados de perfil de velocidade via simulação utilizando CFD com os resultados experimentais obtidos por Zhou *et al.*(2010). Neste trabalho, os autores encontraram resultados concordantes para velocidade tangencial, radial e suas flutuações.

Noroozi e Hashemabadi (2011) pesquisaram os efeitos da modificação do formato da região cilíndrica de um hidrociclone na eficiência, utilizando CFD. Foram geradas quatro geometrias diferentes, a primeira, geometria base, possui duas entradas, duas regiões cônicas e com a câmara de entrada cilíndrica. As outras geometrias geradas foram com a

câmara de entrada côncava, convexa e a última sem região cilíndrica. Os experimentos mostraram que o equipamento mais eficiente foi o com a câmara de entrada côncava seguido do cônico. O pior resultado foi o equipamento com câmara convexa.

Bai *et al.* (2009) estudaram o perfil de velocidades axial e tangencial e suas flutuações com um hidrociclone de 35 mm de diâmetro, entrada circular, com vortex finder e ângulo de 6°. Para as medições de velocidade foi utilizada a técnica de LDA.

Zhou *et al*. (2010) investigaram o perfil de velocidade e a distribuição de óleo utilizando um hidrociclone de 50 mm de diâmetro da região cilíndrica, com uma saída superior de 8 mm, saída inferior de 19 mm, entrada de 13mm e com ângulo da seção cônica de 5,5°. Este estudo foi conduzido sem a presença de núcleo de ar. Tanto as medições de concentração de óleo quanto as de velocidade foram obtidas com um PDA.

Marins *et al.* (2010) estudaram o perfil de velocidades axial, radial e tangencial e suas flutuações em um hidrociclone de 70 mm de diâmetro, duas entradas retangulares e com ângulos de 15° e 1°. Para as medições de velocidade foram utilizadas PIV e LDA.

Verifica-se na literatura a grande dificuldade de obtenção de dados experimentais para validar os modelos escolhidos. Pois, para isso é desejável dados de perfil de velocidade, distribuição granulométrica na entrada, eficiência granulométrica das partículas nas saídas, dados de razão de fluido, vazão da alimentação e pressão nas saídas.

2.3. Principais fatores que influenciam no desempenho de um hidrociclone na separação óleo-água.

Segundo Silva (1989), no passado, diversas pesquisas foram realizadas com o intuito de prever o desempenho de hidrociclones através de funções que descrevem o comportamento da eficiência de separação, utilizando variáveis operacionais e parâmetros geométricos do equipamento (Bradley, 1965, Gerrard e Liddle, 1976, Plitt, 1971 e 1976, Lynch e Rao, 1975 e Medronho, 1984). Porém, estes estudos se limitam a resultados com partículas sólidas e às faixas de operação e características geométricas do hidrociclone empregado naqueles estudos.

Nos dias de hoje, com o avanço do poder computacional e modelagens numéricas e fenomenológicas, as simulações em CFD vem sendo utilizadas para prever o desempenho de

hidrociclones assim como ajudar a entender, mais detalhadamente, o comportamento do escoamento.

Segundo Meldrun (1987), os fatores operacionais que mais afetam o desempenho de hidrociclones são:

$\Delta\rho$: A diferença de densidade impacta diretamente na eficiência de separação, pois quanto maior esta diferença maior é a facilidade de separação das fases. Comumente para sistemas envolvendo separação líquido-líquido, com baixa $\Delta\rho$, devem ser utilizadas geometrias com maior tempo de residência.

d: Quanto maior o diâmetro das partículas ou gotas mais fácil é a separação. As partículas com maiores diâmetro, para um sistema óleo-água, tende a caminhar mais rapidamente para o centro do equipamento deixando-o pela saída superior. Já as partículas menores tendem a caminhar por mais tempo na fase contínua, facilitando a sua saída pela região inferior.

T: A temperatura afeta a densidade e viscosidade. Porém, mas fortemente esta última, que com a sua diminuição com o aumento da temperatura facilita a mobilidade da fase dispersa melhorando o desempenho.

Q: O aumento da vazão da alimentação promove um crescimento na intensidade do campo centrífugo e consequentemente da eficiência de separação.

Uma das variáveis que define o poder de separação de um hidrociclone é o d'_{50}, que é o diâmetro que gera uma eficiência granulométrica reduzida de 50%. Para sistemas liquido-liquido, o diâmetro das partículas pode diminuir ou aumentar, dependendo das condições de operação, devido aos fenômenos de quebra e coalescência, respectivamente.

A relação de eficiência e vazão mencionadas por Meldrun (1987) e Heyes *et al.* (1985) está limitada pela “vazão crítica”, que é o valor no qual se iniciam os efeitos de quebra.

Uma boa forma de saber o ponto de operação para a vazão, no processo de separação óleo-água com hidrociclone, é aumentar a vazão até encontrar o platô de eficiência. Este ponto antecede a região de declínio de eficiência . Ou seja, a região de eficiência constante com a vazão é a faixa de operação (Husveg *et al.*,2007 e Bennett e Williams, 2004). Após este

ponto verifica-se uma queda na eficiência ocasionada pela diminuição do diâmetro das gotas devido ao aumento da tensão cisalhante (Heyes *et al.*, 1985 e Meldrun, 1987).

O desempenho de um hidrociclone é afetado pelas variáveis geométricas da seguinte forma (adaptado de Svarovsky, 1984):

Aumento da capacidade - aumentar o diâmetro do hidrociclone, o diâmetro da entrada, o diâmetro da saída de diluído para separação líquido-líquido, o comprimento total e reduzir o comprimento do *vortex finder* (prolongamento interno do tudo de saída superior);

Reduzir o diâmetro de corte - reduzir o diâmetro do hidrociclone, o diâmetro da entrada, o diâmetro da saída de diluído, o ângulo da região cônica, o comprimento do *vortex finder* e aumentar o comprimento total do equipamento;

Aumentar a razão de fluido - aumentar o diâmetro de saída de concentrado e reduzir o diâmetro de saída do diluído;

Aumentar a queda de pressão - diminuir o diâmetro das saídas concentrada e diluída e aumentar o diâmetro da entrada.

2.4. Distribuição de tamanhos de partículas.

Para descrever a distribuição tamanhos de partículas é comum utilizarmos a distribuição cumulativa menor que dado tamanho. Dentre os modelos utilizados para descrever a distribuição de diâmetros das partículas em uma amostra (RRB, GGS, Weilbull e Sigmóide) o que foi adotado neste trabalho foi o de Rosin-Rammler-Bennett (RRB). Esta formulação foi escolhida por possuir poucos parâmetros, fácil linearização, ótima concordância com os dados experimentais utilizados no presente trabalho e por estar inserida no programa utilizado.

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

Onde,

y = distribuição cumulativa menor que dado tamanho;

d = diâmetro da partícula ou gota de óleo;

m e k = parâmetros do modelo RRB.

Os parâmetros da equação acima são obtidos pela linearização da Equação 1, conforme mostrado na equação abaixo.

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

2.5. Razão de fluido

Ao se utilizar hidrociclones no processo de separação líquido-líquido, onde a fase contínua é mais densa que a fase dispersa, observa-se que as partículas deixam o equipamento pela saída superior. No entanto, uma fração da fase contínua também sai do hidrociclone pela mesma região. À razão entre a quantidade de fluido que entra pelo duto de alimentação e a quantidade que sai pelo concentrado damos o nome de razão de fluido, como mostra a Equação 3.

$$R_f = \frac{W_{fc}}{W_{fe}} \tag{3}$$

Onde:

R_f = Razão de fluido;

W_{fc}= Vazão mássica de água no concentrado;

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

2.6. Eficiência Granulométrica (G)

A eficiência granulométrica é a razão entre a vazão mássica das gotas de óleo de um dado diâmetro na saída concentrada pela mesma condição na entrada, sendo apresentada na Equação 4.

Quando calculamos a eficiência granulométrica para diversos tamanhos de gotículas ou partículas podemos montar a curva de eficiência granulométrica, como mostra a Figura 2.

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

Onde:

G = Eficiência granulométrica da gota de óleo de dado diâmetro;

$W_c|_d$ = Vazão mássica da gota de óleo de dado diâmetro no concentrado;

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

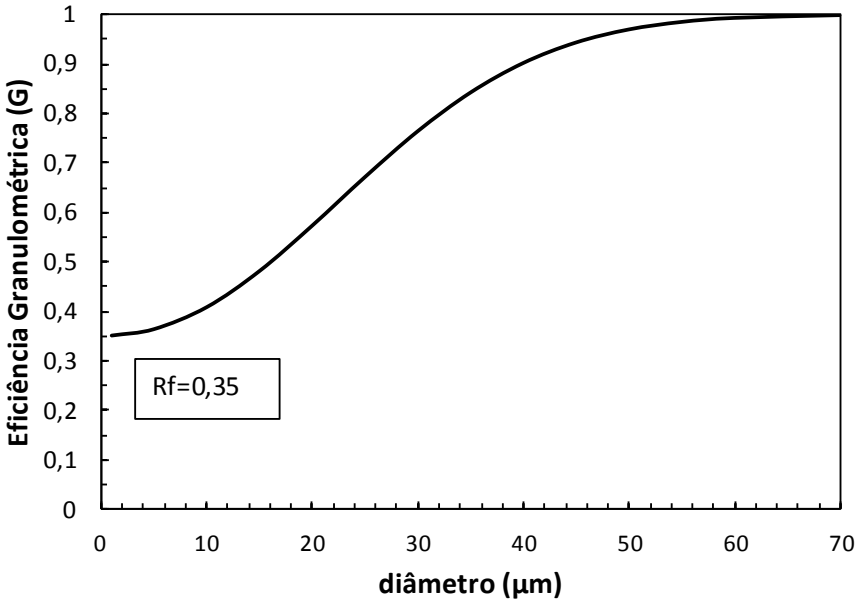


Figura 2: Exemplo de curva de eficiência granulométrica, com R_f = 0,35.

2.7. Eficiência Granulométrica Reduzida (G')

A eficiência granulométrica reduzida considera apenas a quantidade de óleo que sai do equipamento por efeito da separação centrífuga, sendo apresentada na Equação 5. Com isso, desconta-se a quantidade retirada apenas por efeito de divisão de correntes, que ocorre naturalmente por existirem duas saídas. Ou seja, mesmo que o hidrociclone não esteja separando nada, haverá sempre uma eficiência granulométrica, para dado d, igual à R_f.

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

A Figura 3 mostra a curva de G', que sempre inicia na origem, e o diâmetro da partícula cuja eficiência granulométrica reduzida é igual a 0,5, comumente chamado de diâmetro de corte reduzido.

Plitt (1971) propôs a Equação (6) para descrever o comportamento de G' em função dos diâmetros.

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

Onde:

G'= Eficiência granulométrica reduzida;

d'_{50}= diâmetro de corte reduzido;

n= parâmetro do modelo de eficiência granulométrica reduzida.

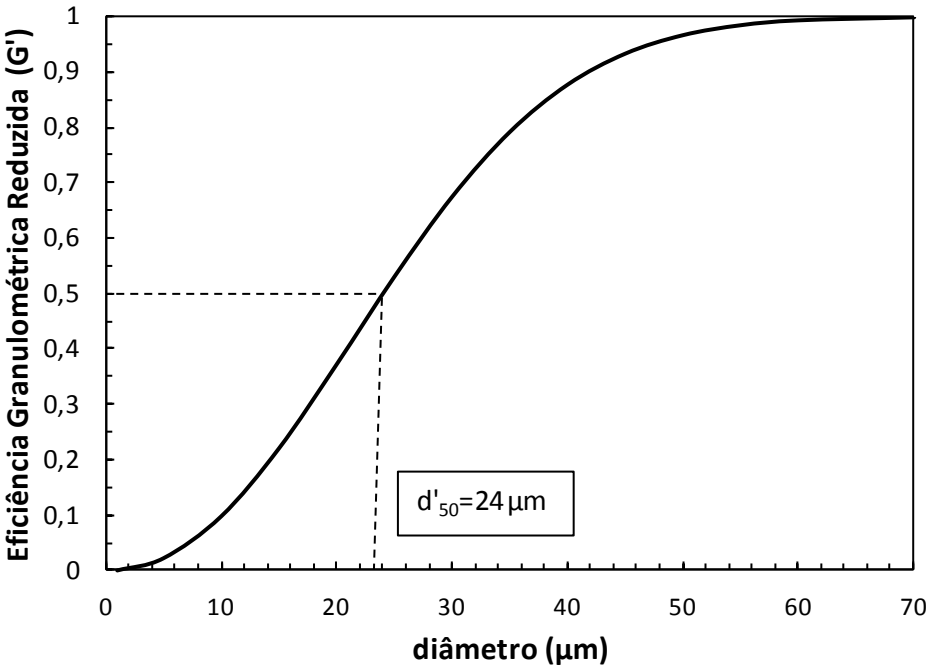


Figura 3: Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida e do diâmetro de corte reduzido (d'_{50})

Através da linearização da Equação (6) é gerada a Equação (7), de onde se obtém o parâmetro n.

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

2.8. Eficiência Total ou Global (E_T)

A eficiência total é obtida facilmente pela razão entre vazão de óleo no concentrado e na alimentação, como apresentada na Equação 8. Esta eficiência é global, levando em consideração todos os diâmetros contidos na distribuição de tamanhos da alimentação.

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

Onde:

E_T = Eficiência total;

W_c = Vazão mássica de óleo no concentrado;

W_e = Vazão mássica de óleo na entrada.

2.9. Eficiência Total Reduzida (E'_T)

Podemos calcular a eficiência total reduzida de duas formas diferentes. A primeira é semelhante ao cálculo da G', ou seja, desconta-se o valor da R_f pelos mesmos motivos apresentados, como apresentada na Equação 9.

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

A segunda forma (Equação 11) é obtida através da integração da curva de eficiência granulométrica reduzida (Equação 10).

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

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

2.10. Fração volumétrica nas saídas

A fração volumétrica nas saídas é calculada pela relação entre a vazão de óleo e a vazão total, conforme apresentado na Equação 12 e Equação 13.

$$f_{vc} = \frac{Q_c}{Q_{fc} + Q_c} \tag{12}$$

$$f_{vd} = \frac{Q_d}{Q_{fd} + Q_d} \tag{13}$$

Onde:

f_{vc}= fração volumétrica de óleo na saída concentrada;

Q_c= vazão volumétrica de óleo na saída concentrada;

Q_{fc}= vazão volumétrica de água na saída concentrada;

f_{vd}= fração volumétrica de óleo na saída diluída;

Q_d= vazão volumétrica de óleo na saída diluída;

Q_{fd}= fração volumétrica de água na saída diluída.

3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

3.1. INTRODUÇÃO

A fluidodinâmica computacional (CFD, de *Computational fluid dynamics*), também chamada de dinâmica dos fluidos computacional, é o estudo dos fenômenos de transporte que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor, transporte de massa e reações químicas, utilizando métodos matemáticos, numéricos e computacionais.

O rápido avanço da capacidade computacional vem permitindo a utilização desta ferramenta em casos bastante complexos, de interesse não apenas acadêmico, mas também industrial. Este avanço vem permitindo, cada vez mais, a utilização de modelos mais custosos computacionalmente, tanto de natureza numérica quanto fenomenológica.

Projetos envolvendo o uso de solução CFD, em momento algum retiram a importância da análise teórica e muito menos da necessidade de realização de procedimentos experimentais. A análise teórica é importante para se saber os modelos que serão adotados, assim como, as hipóteses simplificadoras utilizadas para a resolução do problema numérico. Uma solução analítica simplificada pode ser empregada como condição inicial para a resolução de problemas mais complexos. Já os resultados experimentais servem tanto para avaliar a adequação dos resultados aos modelos numéricos (validação física), quanto para a elaboração de novos modelos. Logo, embora as simulações numéricas apresentem constantes aperfeiçoamentos estas não substituem os estudos experimentais.

A fluidodinâmica computacional vem se mostrando uma importante ferramenta e a sua crescente aplicação acadêmica e industrial pode ser justificada pelas seguintes razões:

- estudos que envolvem riscos quanto à realização experimental tais como altas temperaturas, pressões e materiais tóxicos;
- quando a montagem de uma planta experimental ou modelos em escala se tornam muito caros ou de difícil elaboração, como túneis de vento e estudos de vazamento de produtos tóxicos em plataformas de petróleo, plantas químicas ou nucleares;
- as simulações numéricas oferecem mais detalhes que experimentos reais, pois o número de pontos de medição das simulações numéricas está associado aos pontos da malha, enquanto que os experimentais necessitariam de vários medidores.
- avanço contínuo no poder computacional e na assimilação de novos métodos disponibilizados na literatura;

- minimização de custos em relação a experimentos convencionais, principalmente para aplicações acadêmicas onde os pacotes comerciais são de menor custo;
- melhora para o ensino de engenharia, pois permite que uma grande quantidade de alunos tenha contato com experimentos computacionais que seriam de difícil demonstração durante as aulas;
- melhora na fabricação de equipamentos e processos de separação por permitir mais facilmente o entendimento do fenômeno interno, ou seja, verifica-se melhor o comportamento do fluido e dos processos envolvidos;
- facilidade no processo de otimização de equipamentos, pois algumas vezes a construção do equipamento é muito cara e de difícil adaptação para o estudo de variáveis geométricas ou condições de processo.

É válido lembrar que as simulações envolvendo CFD ainda possuem limitações em diversas áreas como turbulência, radiação, combustão, escoamentos multifásicos e os que envolvem mudanças de fase, dentre outros. Por isso, é de grande importância a utilização de resultados experimentais para a validação dos modelos para os casos estudados.

3.2. ETAPAS DE UMA SIMULAÇÃO EM CFD

Ao se iniciar um projeto de CFD, deve-se avaliar o problema para se saber quais são as variáveis mais importantes no processo e quais podem ser simplificadas ou até mesmo descartadas frente a outras envolvidas. Nesta etapa, determina-se quais grandezas físicas atuam e como elas afetam o problema.

O problema físico deve ser modelado matematicamente, sendo expresso na forma das leis de conservação de momento, massa e energia. Esses modelos irão explicar o sistema estudado, além de prever seu comportamento em diferentes situações. Após a modelagem matemática deve-se definir a região de aplicação e validade das equações, isto é, deve-se estabelecer o domínio.

Para tratar o modelo computacionalmente, é necessário expressar de forma adequada as equações e a região (volume de controle) em que elas são válidas. Como não é possível obter soluções numéricas sobre uma região contínua devido aos infinitos pontos da mesma, inicialmente o domínio é discretizado, isto é, este é dividido em um número finito

de pontos (nós) onde as equações são calculadas. Somente nesses pontos as soluções serão obtidas (Fortuna, 2000).

Assim como o domínio precisa ser discretizado, as equações também precisam de uma transformação equivalente. Sendo assim, as equações deixam de ser resolvidas através de equações diferenciais, substituindo-se as derivadas por expressões algébricas, já que o domínio passou a ser discreto (Schäfer, 2006).

Segundo Figueredo-Cardero (2010), a modelagem matemática de um problema utilizando CFD possui as seguintes etapas:

- elaboração da geometria que representa o domínio que será estudado;
- confecção da malha para discretizar o domínio contínuo em elementos;
- avaliação crítica dos fenômenos envolvidos no caso estudado e implementação, ou escolha, dos modelos que o descrevem matematicamente;
- solução, por método iterativo, das equações algébricas geradas;
- avaliação e análise crítica dos resultados;

São também necessários a discretização das equações envolvidas, a reavaliação dos modelos e teste de independência da malha.

3.3. Modelos Matemáticos

3.3.1. Conservação da Massa (Equação da Continuidade)

Segundo Bird *et al.* (2004), a equação da conservação de massa, também conhecida como equação da continuidade, é desenvolvida fazendo-se um balanço de massa sobre um elemento fixo interno ao volume de controle diferencial por onde escoa o fluido.

$$\begin{Bmatrix} \textbf{Taxa de} \\ \textbf{acumulo} \\ \textbf{de massa} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \textbf{Taxa de} \\ \textbf{entrada} \\ \textbf{de massa} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \textbf{Taxa} \\ \textbf{de saída} \\ \textbf{de massa} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \textbf{massa} \\ \textbf{gerada} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \textbf{massa} \\ \textbf{consumida} \end{Bmatrix}$$

Como para este problema se considera que não ocorrem reações químicas ou nucleares o balanço fica apenas com o temo de acúmulo e os termos convectivos:

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{Taxa\ de} \\ \boldsymbol{acumulo} \\ \boldsymbol{de\ massa} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{Taxa\ de} \\ \boldsymbol{entrada} \\ \boldsymbol{de\ massa} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \boldsymbol{Taxa} \\ \boldsymbol{de\ saída} \\ \boldsymbol{de\ massa} \end{Bmatrix}$$

O que nos permite escrever a equação da conservação de massa em coordenada cartesiana com as derivadas parciais (Equação 14) e em notação vetorial (Equação 15) da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \tag{14}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \rho \boldsymbol{v} = 0 \tag{15}$$

Para fluidos incompressíveis, a Equação 15 assume a forma:

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{16}$$

3.3.2. Conservação da Quantidade de Movimento (Equação do Movimento)

A equação da conservação da quantidade de movimento, também conhecida como equação do movimento, é obtida através do somatório das forças que atuam em um elemento de volume do volume de controle.

$$\boldsymbol{F_i} = \boldsymbol{F_p} + \boldsymbol{F_v} + \boldsymbol{F_g} \tag{17}$$

Onde:

$\boldsymbol{F_i}$= forças de inércia por unidade de volume;

$\boldsymbol{F_p}$=forças de pressão por unidade de volume;

$\boldsymbol{F_v}$=forças viscosas por unidade de volume e

$\boldsymbol{F_g}$=forças de campo por unidade de volume.

Essas forças assumem as seguintes formas:

$$\boldsymbol{F_i} = \frac{D\rho \boldsymbol{v}}{Dt} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{F_p} = -\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{F_v} = -\boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{\tau} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{F_g} = \rho \boldsymbol{g} \tag{21}$$

Onde:

$\boldsymbol{\tau}$= tensor tensão;

ρ= densidade do fluido;

$\boldsymbol{v}$= vetor velocidade;

P= pressão;

$\boldsymbol{g}$=aceleração da gravidade.

A substituição das Equações 18, 19, 20 e 21 na Equação 17 fornece:

$$\frac{D\rho\boldsymbol{v}}{Dt} = -\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P} - \boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{\tau} + \rho\boldsymbol{g} \tag{22}$$

Simplificando-se a Equação 22 para fluido newtoniano incompressível e com viscosidade constante obtém-se a equação de Navier-Stokes (Equação 23):

$$\boldsymbol{\rho}\frac{D\boldsymbol{v}}{Dt} = -\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P} + \mu\nabla^2\boldsymbol{v} + \rho\boldsymbol{g} \tag{23}$$

3.3.3. ABORDAGEM EULERIANA-EULERIANA

Para problemas multifásicos utilizando a abordagem Euleriana-Euleriana, ou simplesmente 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, 2009). Desta forma, se pode afirmar que esta modelagem é robusta, porém é mais custosa computacionalmente.

3.3.4. ABORDAGEM EULERIANA-LAGRANGEANA

Segundo Silva (2008), cada partícula (ou grupo de partículas) é simulada individualmente com base na segunda lei de Newton para o movimento e no cálculo das forças atuantes sobre a mesma, considerando as interações com ofluido ou outras partículas (colisões).

A trajetória da partícula é calculada baseada no balanço de forças na partícula e influenciado pelo escoamento da fase fluida, tais como o campo de escoamento e a turbulência.

Para utilizar esta formulação, é necessário que a fase particulada seja diluída (Shojaeefard *et al.*, 2006).

As equações a seguir representam o balanço das forças que atuam sobre a partícula, sendo escrita em notação vetorial (Ansys 13.0 Help, 2010).

$$m_p \frac{d\boldsymbol{v_p}}{dt} = \boldsymbol{F_P} - \boldsymbol{F_E} + \boldsymbol{F_D} + \boldsymbol{F_o} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{F_P} - \boldsymbol{F_E} = V(\rho_p - \rho)\boldsymbol{b} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{F_D} = \frac{A}{2}\rho\|\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v_p}\|C_D(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v_p}) \tag{26}$$

$$C_D = C_D(Re_p, \phi) \tag{27}$$

Onde:

m e V = massa e volume da partícula, respectivamente;

$\boldsymbol{F_P} - \boldsymbol{F_E}$= peso menos empuxo;

$\boldsymbol{F_D}$= força de arraste;

$\boldsymbol{F_o}$= outras forças (sustentação, browniana, etc.);

C_D= coeficiente de arraste.

Re_p= número de Reynolds da partícula;

ϕ= esfericidade da partícula

3.3.5. TURBULÊNCIA

Segundo Bird *et al*. (2004), ao se medir a velocidade de um fluido que escoa no regime turbulento em um dado ponto e em função do tempo, obtém-se uma oscilação caótica na medida, conforme apresentado na Figura 4.

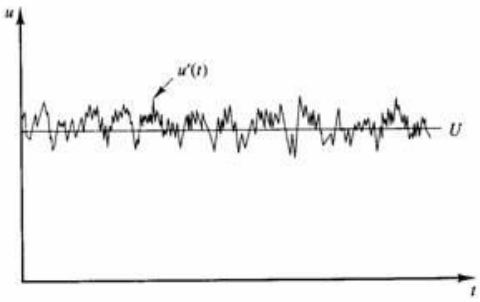


Figura 4: Velocidade instantânea *u*, velocidade média *U* e flutuação *u'* (Bird *et al*., 2004).

O escoamento turbulento é sempre tridimensional e transiente, caracterizando-se pela presença de vórtices com uma larga faixa de escalas de comprimentos, que requerem níveis de discretização espacial e temporal extremamente pequenos para as suas corretas caracterizações (Freire *et al*., 1998).

Em problemas que envolvem a presença da turbulência, uma variável tem a sua medida instantânea composta pela soma de duas componentes. A primeira representa a média temporal e a segunda representa a flutuação turbulenta, conforme apresentado na Equação 28, onde *M* é uma variável qualquer.

$$M(t) = \bar{M} + M' \tag{28}$$

Segundo Freire *et al*. (1998), a utilização da média temporal funciona como um filtro que remove as flutuações. Esta consideração permite o uso de malhas bem menos refinadas e, com isso, menor custo computacional.

Prandtl escolheu a energia cinética turbulenta por unidade de massa, k, baseada nas flutuações do vetor velocidade, como a base da escala de velocidade (Equação 29).

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i' u_i'} = \frac{1}{2}\left(\overline{v_x{}'^2} + \overline{v_y{}'^2} + \overline{v_z}\right) \tag{29}$$

A aplicação da média temporal na equação de Navier-Stokes instantânea (Equação 30) gera a Equação 31, ambas escritas com notação indicial.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(u_i u_j\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right], \tag{30}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{u_i}\,\overline{u_j}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \overline{u_i' u_j'}\right]. \tag{31}$$

Devido ao termo adicional que surgiu na Equação 31 ($-\overline{u_i' u_j'}$), conhecido como tensor de Reynolds, a resolução desta equação requer equações adicionais. Este problema é conhecido com o problema do fechamento da turbulência (SU, 2007).

Para resolver este problema dispõe-se, basicamente, de duas formas diferentes (Freire *et al*., 1998). A primeira consiste em utilizar o conceito de viscosidade turbulenta. Já a outra propõe a criação de uma equação de transporte para o tensor de Reynolds, conhecido como o modelo dos tensores de Reynolds (RSM, *Reynolds stress model* na língua inglesa).

O modelo k-ε e as suas variantes são os mais utilizados na solução de problemas de interesse industrial. Este modelo, na sua forma padrão, possui duas equações, uma para a energia cinética turbulenta, k, e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta, ε. O problema de fechamento é resolvido relacionando o tensor de Reynolds com a energia cinética turbulenta através da Equação 33, criando posteriormente as equações de transporte para k e ε.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i' u_j'} = 2k \tag{33}$$

As principais equações e relações deste modelo, na sua forma padrão, são mostradas a seguir, conforme apresentado por Wilcox (1994).

Viscosidade cinemática turbulenta

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{34}$$

Energia cinética turbulenta

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{u}_j k\right) = \frac{\tau_{ii}}{\rho}\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{35}$$

Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\frac{\tau_{ii}}{\rho}\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{36}$$

Constantes de fechamento

$$C_{\varepsilon 1} = 1{,}44;\ C_{\varepsilon 2} = 1{,}92;\ C_\mu = 0{,}09;\ \sigma_k = 1{,}1;\ \sigma_\varepsilon = 1{,}3; \tag{37}$$

Relações auxiliares

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad \text{e} \quad l = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \tag{38}$$

Segundo SU (2007), os modelos dos tensores de Reynolds devem ser utilizados para a modelagem de problemas caracterizados por anisotropia na turbulência. Este tipo de problema são encontrados, por exemplo, quando o escoamento possui forte curvatura, em escoamentos helicoidas e com forte aceleração ou desaceleração.

Segundo Silveira Neto (2003), a Equação 39 pode ser reescrita para todas as componentes do tensor de Reynolds.

$$\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} = \begin{bmatrix} u'_x u'_x & u'_x u'_y & u'_x u'_z \\ u'_y u'_x & u'_y u'_y & u'_y u'_z \\ u'_z u'_x & u'_z u'_y & u'_z u'_z \end{bmatrix} \tag{39}$$

Este modelo se baseia em equações de transporte para definir todos os componententes do tensor de Reynolds e para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε, o que resulta em sete equações de transporte para o fechamento, uma vez que o tensor tensão turbulento é simétrico, $\tau_{ij} = \tau_{ji}$.

As principais equações e relações do modelo dos tensores de Reynolds, na sua forma padrão, são mostradas a seguir conforme apresentado em Ansys 13.0 Help (2010).

Equações de transporte

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u'_i u'_j\right) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \emptyset_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} \tag{40}$$

Convecção

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}\right) \tag{41}$$

Difusão turbulenta

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho u_k \overline{u'_i u'_j u'_k} + p\left(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j\right)\right] \tag{42}$$

Difusão molecular

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\overline{u'_i u'_j}\right)\right] \tag{43}$$

Produção de tensão

$$P_{ij} = -\rho\left(\overline{u'_i u'_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right) \tag{44}$$

Produção de empuxo

$$G_{ij} = -\rho\beta\left(g_i\overline{u'_j\theta} + g_j\overline{u'_i\theta}\right) \tag{45}$$

Pressão-deformação

$$\emptyset_{ij} = \overline{P\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}\right)} \tag{46}$$

Dissipação

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k}\frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \tag{47}$$

Produção por rotação

$$F_{ij} = -2\rho\Omega_k\left(\overline{u'_j u'_m}\varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m}\varepsilon_{jkm}\right) \tag{48}$$

No entanto, os termos $D_{T,ij}$, G_{ij}, $\emptyset_{ij}$ e ε_{ij} precisão ser modelado para o fechamento da equação de RSM, estes termos são definidos nos diferentes modelos de RSM e são encontrados em Ansys 13.0 Help (2010). Os dois modelos adotados neste trabalho foram o de Gibson e Lauder (1978) e Spaziale (1991).

3.4. MALHA

Segundo Silva (2008), a discretização do espaço físico se refere à aproximação de um problema em um domínio contínuo por elementos discretos, construindo a chamada malha computacional.

É necessário dividir o domínio em pequenos elementos, uma vez que a grande maioria dos métodos numéricos de solução de equações de transporte envolve cálculo a nível de subdomínios. Este processo de subdivisão é chamada de geração da malha (*grid* ou *mesh*).

Com isso obtém-se o domínio computacional, que é uma aproximação da geometria computacional.

Durante o processo de cálculo numérico, os resultados calculados nos pequenos subdomínios são transmitidos aos seus vizinhos. Desta forma, é preciso se ter em mente que em regiões contendo grandes gradientes das variáveis é necessário um maior refinamento da malha, ou haverá perda na informação prejudicando a solução numérica.

A distribuição adequada dos pontos no domínio é fundamental para se obter uma solução numérica representativa do escoamento. Segundo Fortuna (2000), quanto maior for o número de pontos discretos, mais fina será a malha e, consequentemente, mais fiel ao modelo será o resultado numérico obtido. Paralelamente, estar-se-á aumentando o esforço computacional e, com isso, as simulações serão mais demoradas.

Para se avaliar se a malha empregada em dado estudo está subdimensionada ou superdimensionada, é necessário realizar-se um teste de independência de malha. Este teste consiste em se modificar o tamanho da malha até que as variáveis de interesse (velocidade, concentração, temperatura, pressão, etc.) não mais se alterem com o número de elementos.

As malhas podem ser estruturadas, não-estruturadas e híbridas.

As malhas estruturadas apresentam uma regularidade na distribuição espacial de seus pontos. Desconsiderando o contorno, malhas desse tipo possuem sempre o mesmo número de vizinhos. São compostas por elementos quadriláteros e/ou triangulares, em geometrias 2D, e elementos hexaédricos (Figura 5), tetraédricos e/ou prismáticos, em geometrias 3D.

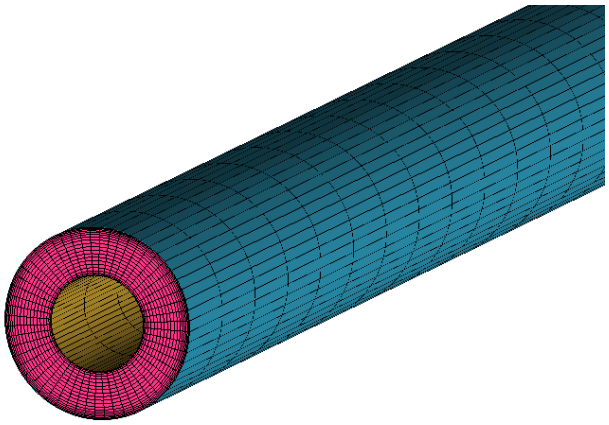


Figura 5: Malha estruturada com elementos hexaédricos.

Diferentemente das malhas estruturadas, as células que fazem parte de uma malha não-estruturada não contêm o mesmo número de vizinhos. Além disso, as células podem assumir

diferentes formatos como triângulos, tetraedros, prismas, hexaedros, etc. A geração de malhas desse tipo são bem vantajosas para a discretização de geometrias complexas, devido à sua fácil adaptação à geometria.

Na Figura 6, é apresentada uma malha não estruturada confeccionada com elementos tetraédricos.

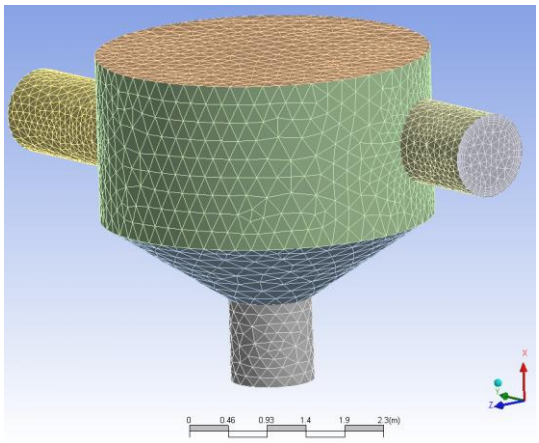


Figura 6: Malha não-estruturada com elementos tetraédricos.

Para dados problemas, pode-se necessitar de malhas mistas, contendo os dois tipos de malhas mencionadas anteriormente. Este tipo de malha é conhecido como malha híbrida (Figura 7).

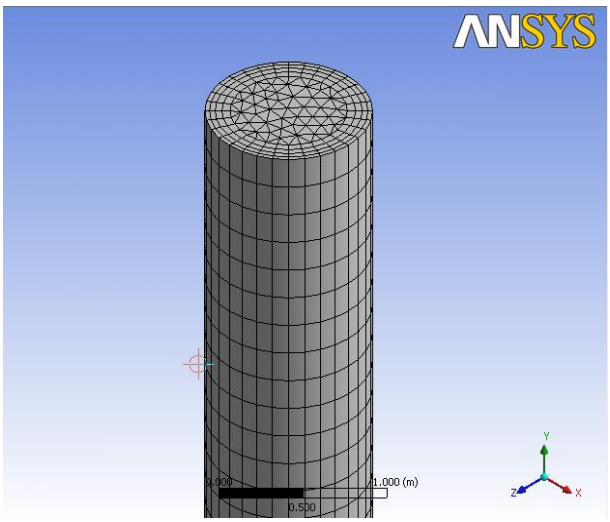


Figura 7: Malha Híbrida contendo elementos hexaédricos próximos à parede e tetraédricos na região central.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Programas e Poder Computacional

Os hidrociclones foram avaliados através de simulações numéricas empregando o programa de CFD Ansys 12.1 e 13.0. O equipamento utilizado para os cálculos numéricos foi um *cluster* da empresa SGI, constituída de 20 nós duplos contendo 40 processadores Intel Xeon quad-core com 2.33 GHz, 8 GB de memória RAM e 250 GB de memória física. Este equipamento contém ainda um *head node* com 2 processadores Intel Xeon quad-core de 2,33 GHz e, 8 GB de memória RAM, e 146 SAS HD. Com isso, tem-se um total de 168 cores e 168 GB de memória RAM. Este equipamento conta com um *storage* de 8 TB de memória física, que tem a função de armazenar as simulações realizadas, e fazer cópia de segurança dos principais arquivos do sistema.

Durante as simulações foram utilizados no mínimo 8 processadores e no máximo 24, tendo as simulações demorado de 9 a 3 dias respectivamente

O programa *Design Expert*, versão 6.0, da *Stat-Easy*, foi utilizado para avaliar estatisticamente os resultados obtidos com o planejamento de experimentos, assim como a visualização das superfícies de resposta e otimização.

4.2. Validação da Simulação Numérica

Para validação dos resultados das simulações em CFD é necessário confrontar os resultados obtidos numericamente com resultados experimentais. Esta necessidade existe devido ao fato das simulações numéricas poderem apresentar falsos resultados, sendo que estes podem ser resultantes da má escolha dos modelos, do pouco refino de malha, de condições de contorno inadequadas, de modelo de turbulência inadequado, de natureza numérica, dentre outros.

Para garantir a utilização de modelagem adequada antes de iniciar o planejamento de experimentos realizou-se uma etapa de validação. Desta forma, buscou-se na literatura artigos com configuração e geometria próximas às utilizadas neste projeto e que possuíssem dados de perfil de velocidades tangenciais e condições de contorno bem definidas. Estes parâmetros são fundamentais para caracterizar o escoamento.

O artigo escolhido com geometria próxima ao hidrociclone de Bradley foi o de Zhou *et al.* (2010). Já para a geometria de Thew, o artigo utilizado foi de Marins *et al.* (2010).

Marins *et al.* (2010) realizaram testes experimentais para analisar o escoamento em um hidrociclone projetado para separação líquido-líquido, operando em fluxo monofásico. Marins obteve os perfis de velocidade através das técnicas Velocimetria de Laser Doppler (LDA, *Laser-Doppler Anemometry* na língua inglesa) e Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV, *Particle Image Velocimetry* na língua inglesa), técnicas que utilizam princípios óticos de medição a laser.

Zhou *et al.* (2010) estudaram experimentalmente o perfil de velocidades e a distribuição de óleo em um hidrociclone de 50 mm de diâmetro, usando Analisador dinâmico de partículas (PDA, *Particle Dynamics Analyser,* na língua inglesa), que também utiliza laser nas medições.

4.3. Geometria

A geometria de hidrociclones consiste de, basicamente, um corpo cilíndrico ligado a uma região cônica e que contém, no primeiro, um duto de alimentação tangencial. Na parte superior deste equipamento há um tubo de saída concentrada (*overflow*), que possui uma extensão para a parte cilíndrica conhecida como *vortex finder,* e na parte inferior um tubo de saída diluída (*underflow)*. Algumas variações nesta geometria também são possíveis como duto retangular na entrada, dupla alimentação, dois ângulos na região cônica, saída do diluído com um tubo reto, ausência de *vortex finder,* dentre outras menos comuns.

Nas Figura 8 e Figura 9 são apresentadas duas geometrias básicas com suas respectivas variáveis geométricas.

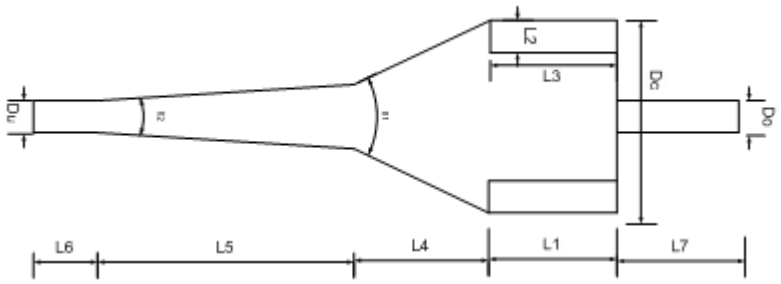


Figura 8: Vista esquemática de um hidrociclone com dupla entrada retangular e duas regiões cônicas.

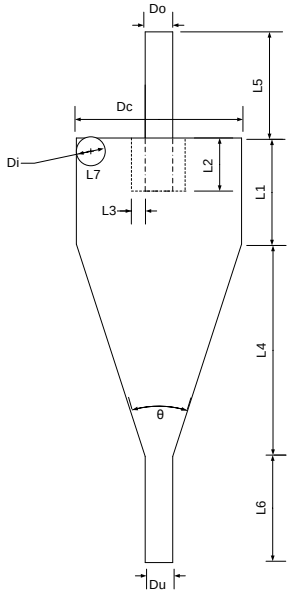


Figura 9: Vista esquemática de um hidrociclone clássico e suas variáveis geométricas.

4.3.1. Hidrociclone Utilizado por Marins *et al.* (2010)

A geometria do hidrociclone utilizado por Marins *et al.* (2010) tem como principais características a presença de dois dutos retangulares na alimentação, dois ângulos na região cilíndrica, um tubo de extensão da saída inferior e a ausência de *vortex finder*.

As dimensões geométricas do hidrociclone de Marins *et al.* (2010) encontram-se na Tabela 1. As regiões geométricas podem ser vistas na Figura 8.

Tabela 1. Dimensões do hidrociclone empregado por Marins *et al.* (2010).

Variável	Dimensões (mm)
Diâmetro do cilindro (Dc)	70
Diâmetro do concentrado (Do)	10
Diâmetro do diluído (Du)	26,3
Comprimento da seção cilíndrica (L1)	47,6
Largura do duto de alimentação (L2)	5,0
Altura do duto de alimentação (L3)	47,6
Comprimento da primeira seção cônica (L4)	124,0
Comprimento da segunda seção cônica (L5)	686,4
Comprimento do tubo de saída do diluído (L6)	63,6
Comprimento do tubo de saída do concentrado (L7)	70
Ângulo da primeira seção cônica (θ1)	15°
Ângulo da segunda seção cônica (θ2)	1°

4.3.2. Hidrociclone Utilizado por Zhou *et al*.(2010)

Na Figura 9 são apresentadas as regiões principais do hidrociclone utilizado no estudo de Zhou *et al.* (2010), que é o mesmo do trabalho de Young *et al.* (1994). Como é possível constatar na tabela abaixo, este hidrociclone não possui *vortex finder*, possui apenas uma única entrada circular e região cilíndrica.

Tabela 2: Proporções do hidrociclone empregado por Zhou *et al*. (2010).

Variável	Dimensões (mm)
Diâmetro do cilindro (Dc)	50,0
Diâmetro do duto de alimentação (Di)	13,0
Diâmetro do concentrado (Do)	8,0
Diâmetro do diluído (Du)	19,0
Comprimento da seção cilíndrica (L1)	50,0
Comprimento do *vortex finder* (L2)	0,0
Espessura da parede (L3)	0,0
Comprimento da seção cônica (L4)	322,0
Comprimento do tubo de concentrado(L5)	100,0[1]
Comprimento do tubo de diluído (L6)	100,0[2]
Comprimento do tubo de entrada (L7)	100,0[1]
Ângulo da seção cônica (θ) em (°)	5,5

[1] Os valores dos tubos de entrada e saída do hidrociclone foram definidos como duas vezes o valor do Dc.

[2] No artigo o comprimento do tubo de underflow utilizado foi de 900 mm. Este valor, porém, foi considerado demasiadamente grande e foi modificado o mesmo comprimento do tubo de concentrado.

4.4. Planejamento de Experimentos – Modelo de Superfície de Resposta.

Uma das grandes vantagens do uso da técnica de planejamento de experimentos é a diminuição da quantidade de testes experimentais necessários para a pesquisa. Outra vantagem é a redução do empirismo envolvido no processo de modificação das variáveis utilizadas, tentativa e erro. Quando não se adota uma estratégia experimental, juntamente com a grande quantidade de experimentos adotados com tentativa e erro, encontra-se dificuldades no tratamento dos dados. Sem uma avaliação estatística adequada, se torna difícil saber a influência de cada variável na resposta.

A metodologia do planejamento experimental, associada à análise de superfícies de resposta, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações

seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve a técnica de tentativa e erro (Box *et al.,* 1978 *apud* Rodrigues e Lemma, 2009).

Segundo Rodrigues e Lemma (2009), devido à pequena quantidade de experimentos envolvidos em estudos com 2 ou 3 variáveis, não se deve realizar um fatorial fracionado. Recomenda-se um delineamento composto central rotacional (DCCR).

A vantagem da utilização do DCCR frente a um planejamento fatorial é que este fica limitado a nos informar a influência das variáveis na resposta, ou seja, a importância de cada uma. Porém, o DCCR vai além, sendo capaz de nos fornecer também os efeitos de interação entre as variáveis e nos permite obter um modelo preditivo das respostas estudadas, possibilitando a realização da otimização.

O planejamento de experimentos empregado adotou o método de superfície de resposta com DCCR, um ponto central e dois fatores. Foi empregado apenas um ponto central sem repetições, pois se trata de experimentos numéricos e, por isso, a repetição fornece o mesmo resultado. Utilizou-se a eficiência granulométrica reduzida para partículas com 28 µm de diâmetro, a razão de fluido, as concentrações nas saídas de concentrado e diluído e a queda de pressão como respostas. Os parâmetros variados no estudo foram o diâmetro da saída de concentrado Do e de diluído Du, que são os principais fatores que podem influenciar na variação das respostas estudadas.

A geometria base dos hidrociclones estudados apresenta uma entrada circular, vortex finder e uma região cônica. A vista esquemática deste equipamento é apresentada na Figura 9. Já as suas dimensões podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões do hidrociclone base, ponto central do planejamento de experimentos.

Variável	**Dimensões (mm)**
Diâmetro do cilindro (Dc)	40,0
Diâmetro do duto de alimentação (Di)	5,6
Comprimento da seção cilíndrica (L1)	20,0
Comprimento do *vortex finder* (L2)	13,2
Espessura da parede (L3)	0,5
Comprimento da seção cônica (L4)	366,46
Comprimento do tubo de concentrado (L5)	20,0
Comprimento do tubo de diluído (L6)	20,0
Comprimento do tubo de entrada (L7)	30,0
Ângulo da seção cônica (θ) em (°)	5,0

A faixa de diâmetros das saídas empregada na composição das geometrias foi $2{,}50 < Do < 3{,}84\ \mathrm{mm}\ e\ 4{,}54 < Du < 6{,}34\ \mathrm{mm}$. Os 9 experimentos obtidos no planejamento experimental são apresentados na Tabela 4 e na Figura 10, juntamente com o comprimento da seção cônica (L4), pois este varia com o D_u.

Tabela 4: Dimensões geradas com o planejamento central através do modelo de superfície de resposta com DCCR em variáveis reais e codificadas.

Experimento	D_o (mm)	D_u (mm)	D_o (codificado)	D_u (codificado)	L4 (mm)
1	3,17	5,29	0,00	0,00	397,55
2	3,17	4,23	0,00	-1,41	409,63
3	3,17	6,34	0,00	1,41	385,47
4	2,70	6,03	-1,00	1,00	389,02
5	2,50	5,29	-1,41	0,00	397,55
6	3,64	6,03	1,00	1,00	389,02
7	3,84	5,29	1,41	0,00	397,55
8	3,64	4,54	1,00	-1,00	406,08
9	2,70	4,54	-1,00	-1,00	406,08

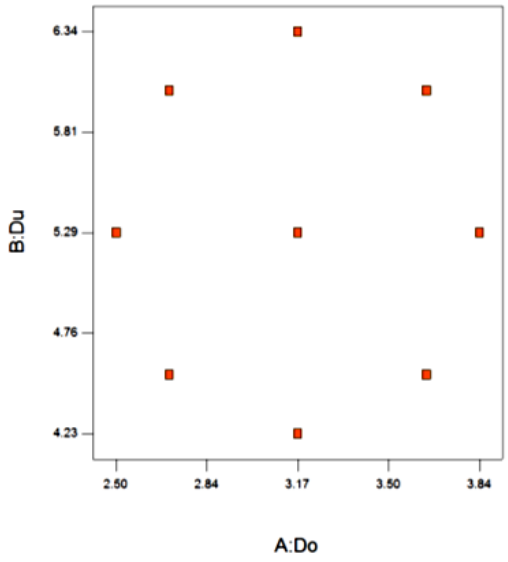


Figura 10: Distribuição dos experimentos gerados com o planejamento central através do modelo de superfície de resposta com DCCR.

4.5. Malhas

Foi utilizado o programa ICEM da ANSYS para criar a malha hexaédrica, estruturada em blocos, para as simulações computacionais. Este tipo de malha foi utilizado por ter uma série de vantagens quanto à sua utilização, como alinhamento da face dos elementos com a

direção do escoamento, maior controle na confecção dos elementos, diminuição do número total de elementos na malha comparado com elementos tetraédricos, redução de dispersão numérica, entre outros.

A malha gerada possui refinamento na região central, com o intuito de capturar melhor os gradientes de velocidade próximos desta região, gerada pela formação do vórtice interno. A outra zona de refinamento ocorre nas paredes, para capturar o perfil de velocidade nas regiões de parede, influenciada também pela condição de aderência.

As demais regiões são modificadas para garantir suavidade e coerência nos tamanhos de elementos, sendo desta forma possível garantir os critérios de qualidade para as diferentes malhas. Estes parâmetros se baseiam basicamente nos seguintes parâmetros de qualidade de malhas:

***-Quality* >0,3**

O critério *Quality* é determinado como o mínimo entre os critérios *Determinant*, *Max Orthogls* e *Max Warpgls* normalizados.

Determinant: é a razão entre o menor determinante da matriz Jacobiana dividido pelo maior determinante da matriz Jacobiana. Nesta opção, o determinante em cada vertice do hexaedro é encontrado;

Max Ortho: este critério calcula o desvio máximo dos ângulos internos de 90 graus para cada elemento;

Max Warp: determina a deformação da face de um quadrilátero.

-Volume change<5

É a divisão do volume do maior vizinho de um elemento volumétrico pelo seu próprio valor.

-Min angle>30

Calcula valor do mínimo ângulo interno de cada elemento. O intervalo padrão é de 0-90 graus.

-Aspect ratio (max ratio no ICEM) <100

Calcula a razão entre os comprimentos de quaisquer duas arestas que são adjacentes à um vértice em um elemento.

4.5.1. Malha para o Hidrociclone Empregado por Marins *et al. (2010)*

A malha criada para este hidrociclone possui refinamento nas regiões de maiores gradientes de velocidade que são as regiões próximas à parede e na região central. A malha empregada contém 1.057.604 elementos e 1.038.866 nós (Figura 11).

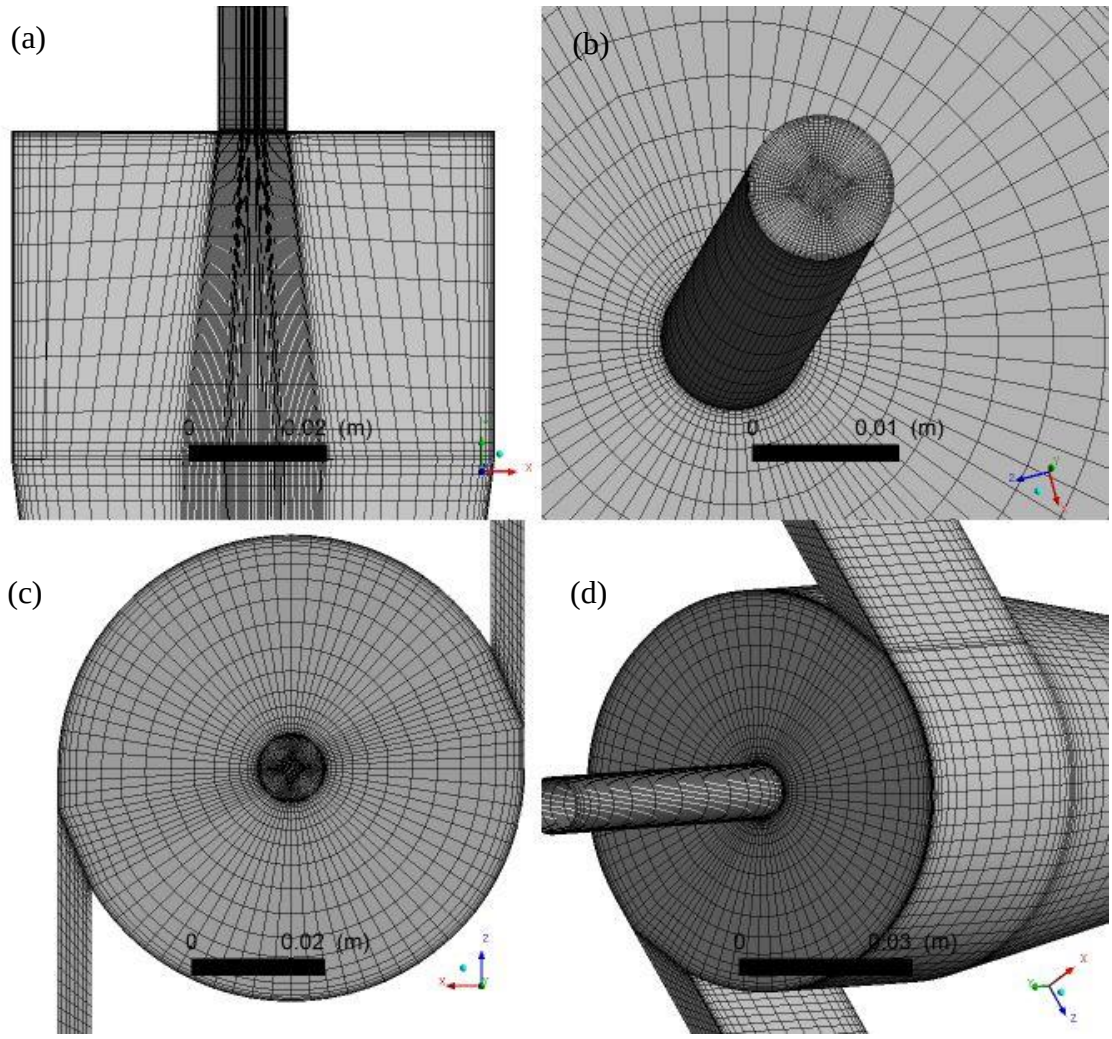


Figura 11: Malha do hidrociclone empregado por Marins *et al*. (2010): (a) vista do refino da malha na zona central, (b) vista do refino no concentrado, (c) Vista superior, (d) vista em perspectiva.

4.5.2. Malha para o Hidrociclone Empregado por Zhou *et al.* (2010)

A malha criada para o equipamento da validação, Figura 12, segue o mesmo refinamento nas regiões centrais e parede da malha anteriormente mencionada. O número de elementos desta malha foi igual a 698.196.

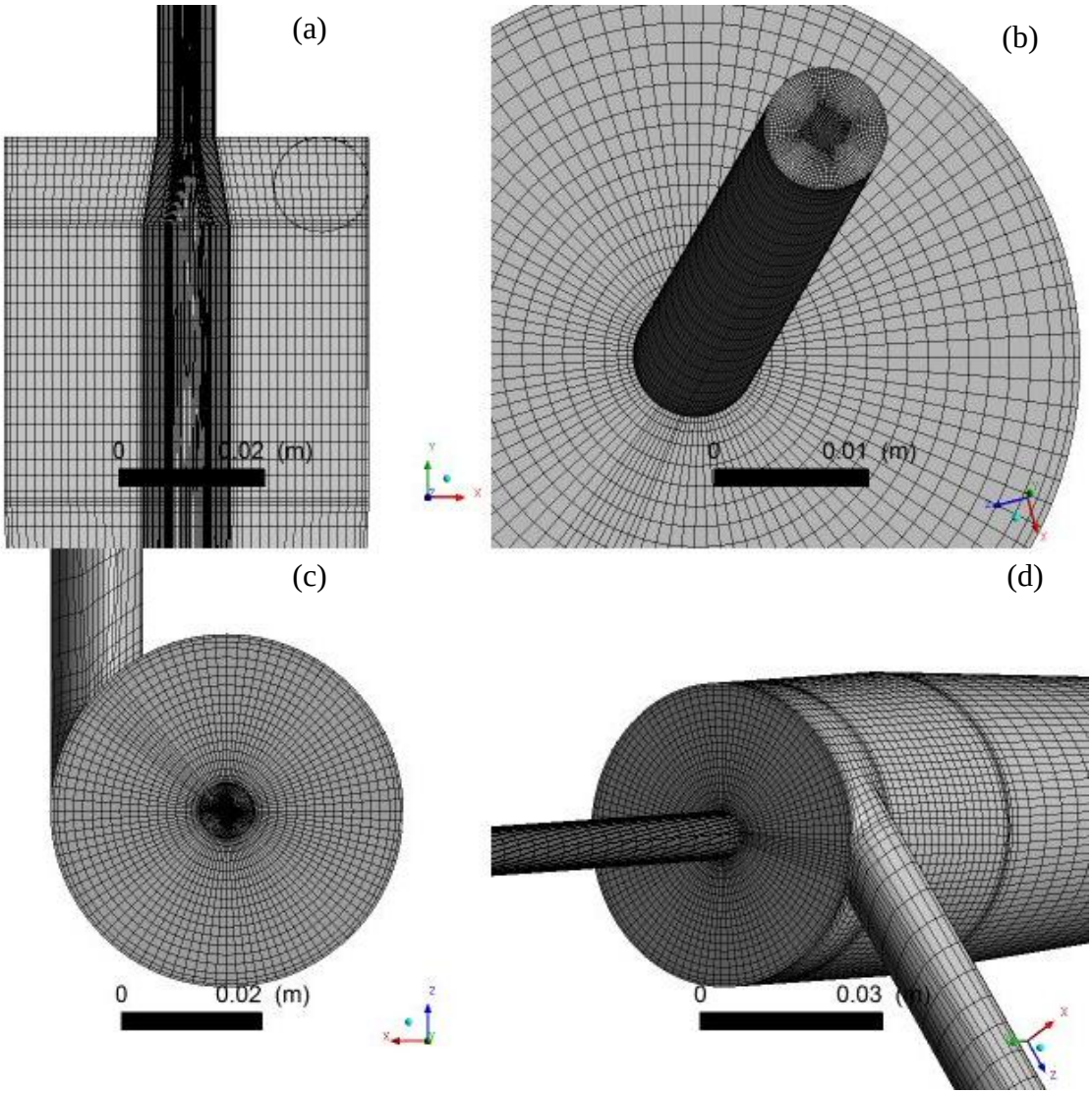


Figura 12: Malha do hidrociclone empregado por Zhou *et al*. (2010): (a) vista do refino da malha na zona central, (b) vista do refino no concentrado, (c) Vista superior, (d) vista em perspectiva.

4.6. Condições de contorno

As regiões dos hidrociclones para definição das condições de contorno foram definidas como entrada, concentrado (*overflow*), diluído (*underflow*) e paredes. A condição de contorno selecionada para a entrada foi velocidade do fluido, *velocity inlet* no Fluent. Já para as saídas foi utilizada a pressão na saída, *pressure outlet*, no Fluent. Nas paredes, foi utilizada a condição de aderência.

Ao se utilizar *pressure outlet* como condição de contorno no FLUENT, o fluido tem a possibilidade de entrar ou sair do volume de controle de acordo com as condições do escoamento naquela região.

O critério de convergência utilizado para as simulações foi o balanço de massa atingir resíduos menores que 0,5%.

As simulações que são conduzidas em regime transiente necessitam de informações adicionais. Um dos fatores mais importantes para este tipo de simulação é a discretização do tempo, que é dado pelo valor do passo de tempo. Aguirre e Damian (2008) apresentaram uma relação empírica para o valor de passo de tempo máximo a ser utilizado em simulações transientes para ciclones e hidrociclones (Equação 49). Outra forma de determinar o passo de tempo é através do número de Courant, onde é possível obter o valor do passo de tempo informando o valor desejado deste número, geralmente igual a 1,0 (Equação 50).

Como a Equação 49 é uma relação empírica esta não necessariamente garante um número de Courant igual a um.

$$\Delta t_{max} = \frac{min(D_o; D_u)}{10\ v_{entrada}} \tag{49}$$

$$Courant = \frac{v_x\ \Delta t}{\Delta x} \tag{50}$$

O tempo total de simulação, ou número de iterações, é o que definirá o término da simulação transiente. É recomendado que o este tempo total (Equação 51) seja aproximadamente igual a três vezes o tempo de residência (Equação 52). Já o número máximo de iterações por passo de tempo é a quantidade de iterações necessária para se atingir a convergência em cada passo de tempo, em geral fica em torno de dez iterações. Sendo desejável que não necessite de atingir as dez iterações para a convergência.

$$\Delta t_{total} = 3\Delta t_{residência} \tag{51}$$

$$\Delta t_{residência} = \frac{V_{hidrociclone}}{Q_{fe}} \tag{52}$$

O número total de iterações será o quociente entre o tempo total da simulação e o valor do passo de tempo (Equação 53).

$$N^{\underline{o}}iterações = \frac{\Delta t_{total}}{\Delta t_{max}} \tag{53}$$

4.6.1. Condições de Contorno para o Hidrociclone Empregado por Marins *et al.* (2010)

O hidrociclone do trabalho do Marins *et al.* (2010) não opera com a mesma pressão nas saídas. Este equipamento utiliza o que é conhecido como razão entre quedas de pressão RQP (Equação 54). Por isso, na composição das condições de contorno das saídas foi necessário informar a pressão nas respectivas correntes.

$$RQP = \frac{(P_e) - (P_c)}{(P_e) - (P_d)} \tag{54}$$

Onde:

P_e = pressão na entrada;

P_c = pressão no concentrado (saída superior);

P_d = pressão no diluído (saída inferior).

Na Tabela 5 são apresentadas as condições de contorno e as propriedades físicas dos fluidos empregados.

Tabela 5: Condições de contorno e propriedades utilizadas nas simulações com abordagem Euleriana utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho de Marins *et al.* (2010).

Parâmetro	**Valor**
Vazão Volumétrica	6,3 m^3/h
Velocidade na entrada	3,67 m/s
Fase aquosa	contínua
Fração volumétrica de água na entrada	0,999
Densidade da água	998,2 kg/m^3
Viscosidade da água	1,003 cP
Fase oleosa	dispersa
Fração volumétrica de óleo na entrada	0,001
Densidade do óleo	860 kg/m^3
Viscosidade do óleo	13 cP
Resíduo máximo	1,0e-04 s
Pressão de saída do concentrado	1,20 bar
Pressão de saída do diluído	2,05 bar

Os modelos utilizados nas simulações podem ser encontrados na Tabela 6.

Para as simulações numéricas deste hidrociclone observou-se muita oscilação do perfil de velocidades e a razão de fluido quando foi utilizada uma discretização de primeira ordem para os tensores de Reynolds.

Tabela 6: Modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho do Marins *et al.* (2010).

Parâmetro	opção
Modelo multifásico	Euleriano/Lagrangeano
Modelo de turbulência	RSM[2]
Regime	Estacionário (Pseudo-transiente)
Tratamento próximo à parede	*Standard wall functions*
Acoplamento pressão-velocidade	*Multiphase Coupled*
Cmu[1]	0,09
C1-Epsilon[1]	1,44
C2-Epsilon[1]	1,92
C3-Epsilon[1]	1,3
Discretização espacial	
gradiente	*Least squares cell based*
Pressão	*PRESTO!*
Momento	2ª *order upwind*
Fração volumétrica	*quick*
Energia cinética turbulenta	2ª *order upwind*
Taxa de dissipação turbulenta	2ª *order upwind*
Tensores de Reynolds	2ª *order upwind*
Passo de tempo	automático
Nº de iterações	15000

[1]Constantes do modelo de turbulência.
[2]Modelo dos tensores de Reynolds proposto por Gibson e Launder (1978).

4.6.2. Condições de Contorno para o Hidrociclone Empregado por Zhou *et al.* (2010)

Através da vazão de entrada e da razão de fluido (R_f), informados por Zhou *et al.* (2010), pode-se calcular as vazões de saída do hidrociclone. Na Tabela 7 são apresentadas algumas condições utilizadas na simulação e as propriedades físicas dos fluidos empregados. Na Tabela 8 apresentam-se os modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação deste hidrociclone.

Neste trabalho, a simulação do hidrociclone do trabalho de Zhou *et al.* (2010) foi conduzida em regime transiente.

Tabela 7: Condições de contorno e propriedades utilizadas nas simulações do modelo Euleriano utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho do Zhou *et al*. (2010).

Parâmetro	**Informação**
Vazão mássica na entrada	0,5555 kg/s
Vazão mássica no concentrado	0,1111 kg/s
Vazão mássica no diluído	0,4444 kg/s
Fase aquosa	contínua
Fração volumétrica de água na entrada	0,999
Densidade da água	998,2 kg/m3
Viscosidade da água	1,003 cp
Fase oleosa	dispersa
Fração volumétrica de óleo na entrada	0,001
Densidade do óleo	860 kg/m3
Critério de convergência (RMS)	1e-6
Tempo de residência	8,85e-1s
Tempo total de simulação	2,66s

*Gerou um número de Courant médio de 1,7.

Tabela 8: Modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação do hidrociclone do trabalho do Zhou *et al*. (2010).

Parâmetro	**opção**
Modelo multifásico	Lagrangeano
Modelo de turbulência	RSM[2]
Regime	transiente
Tratamento próximo à parede	Standard wall functions
Acoplamento pressão-velocidade	Phase coupled simple
Cmu[1]	0,09
C1-Epsilon[1]	1,44
C2-Epsilon[1]	1,83
C1-SSG-PS[1]	3,4
Discretização espacial	
Gradiente	Least squares cell based
Pressão	PRESTO!
Momento	2ª order upwind
Taxa de dissipação turbulenta	2ª order upwind
RSM	2ª order upwind
Passo de tempo	1E-43
Nº de passos de tempo	13893
Especificação do método de retorno do fluido	From neighboring cell
Regime	Transiente
Máxima iteração/passo de tempo	10

[1]Constantes do modelo de turbulência.
[2]Modelo dos tensores de Reynolds proposto por Speziale *et al.* (1991).
[3] Gerou um número de Courant médio de 1,7.

4.6.3. Condições de Contorno para os Hidrociclones Empregados no Planejamento de Experimentos

Na Tabela 9 são apresentadas as condições de contorno e as propriedades físicas dos fluidos empregados nas simulações do planejamento de experimentos. Os modelos utilizados nestas simulações podem ser encontrados na Tabela 10.

Tabela 9: Condições de contorno e propriedades utilizadas nas simulações com abordagem Euleriana utilizadas nas simulações do planejamento de experimentos.

Parâmetro	Valores
Vazão Volumétrica	0,18kg/s
Velocidade na entrada	7,5 m/s
Fase aquosa	contínua
Fração volumétrica inicial da água	0,995
Densidade da água	996,5 kg/m^3
Viscosidade da água	0,8536 cp
Fase oleosa	dispersa
Fração volumétrica de óleo na entrada	0,005
Densidade do óleo	844,1 kg/m^3
Viscosidade do óleo	12,6 cp
Regime	Pseudo-transiente
Pressão de saída do concentrado	0 Pa
Pressão de saída do diluído	0 Pa

Tabela 10: Modelos empregados nas simulações numéricas utilizadas na validação do hidrociclone do planejamento de experimentos.

Parâmetro	opção
Modelo multifásico	Euleriano/Lagrangeano
Modelo de turbulência	RSM[2]
Regime	Estacionário (Pseudo transiente)
Tratamento próximo à parede	*Standar wall functions*
Acoplamento pressão-velocidade	*Multiphase Coupled*
Cmu[1]	0,09
C1-Epsilon[1]	1,44
C2-Epsilon[1]	1,92
C3-Epsilon[1]	1,3
Discretização espacial	
Gradiente	*Least squares cell based*
Pressão	PRESTO!
Momento	2ª ordem *upwind*
Fração volumétrica	*quick*

Energia cinética turbulenta	2ª ordem *upwind*
Taxa de dissipação turbulenta	2ª ordem *upwind*
Tensores de Reynolds	2ª ordem *upwind*
Passo de tempo	automático
Nº de iterações	30000

[1]Constantes do modelo de turbulência.
[2]Modelo dos tensores de Reynolds proposto por Gibson e Launder (1978).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Teste de Malha para os Hidrociclones da Validação da Simulação Numérica

No teste de malha, o perfil de velocidades tangenciais foi utilizado como resposta (Figura 13), por esta ser a componente mais importante do vetor velocidade, responsável pela intensidade do campo centrífugo. Analisou-se, também, a pressão na entrada do hidrociclone (P_e); a razão de fluido (R_f) e a razão entre as quedas de pressão (RQP), (Tabela 11). De acordo com estes resultados, seria possível usar qualquer uma das malhas. Porém, para a simulação multifásica utilizando a abordagem Euleriana, observou-se que a simulação com a malha 1 (M1) não atingiu o fechamento estabelecido para o balanço de massa (abaixo de 0,5%). Desta forma, decidiu-se empregar a malha 2 (M2) para todas as simulações da validação do hidrociclone de Marins *et al.* (2010).

Através destes resultados, foram utilizados os mesmos conceitos para a criação da malha para o hidrociclone de Zhou *et al.* (2010). A malha criada para este hidrociclone segue os mesmos critérios de refinamento da malha 2 do hidrociclone de Marins *et al.* (2010), porém não foi feito um teste de malha.

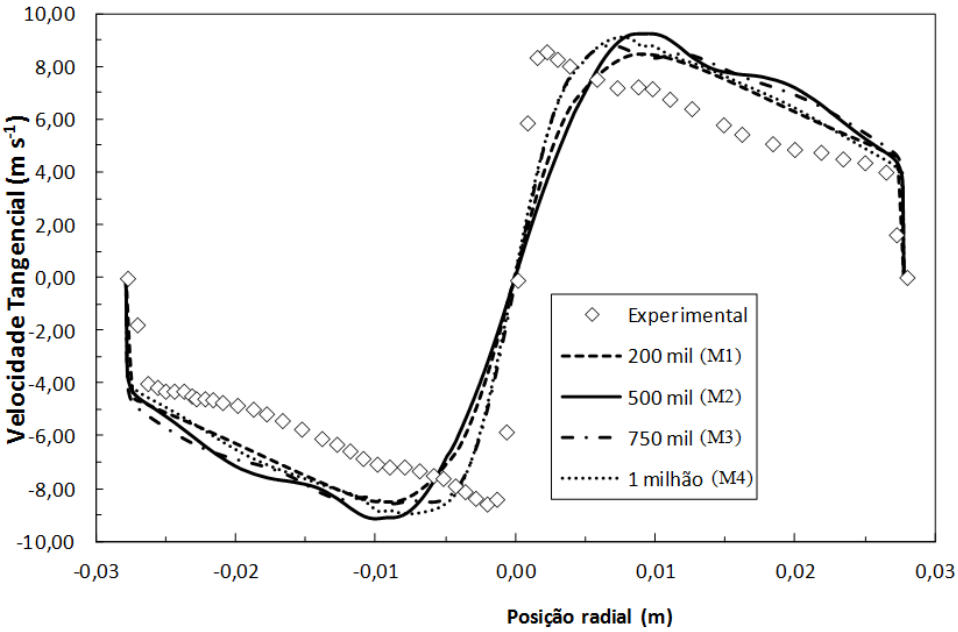


Figura 13: Comparação entre os perfis de velocidades tangenciais para as 4 diferentes malhas testadas para o hidrociclone de Marins *et al.* (2010), medidas a 180 mm abaixo do topo externo do tubo de concentrado.

Tabela 11: Resultados do teste de malha para o hidrociclone de Marins *et al*. (2010).

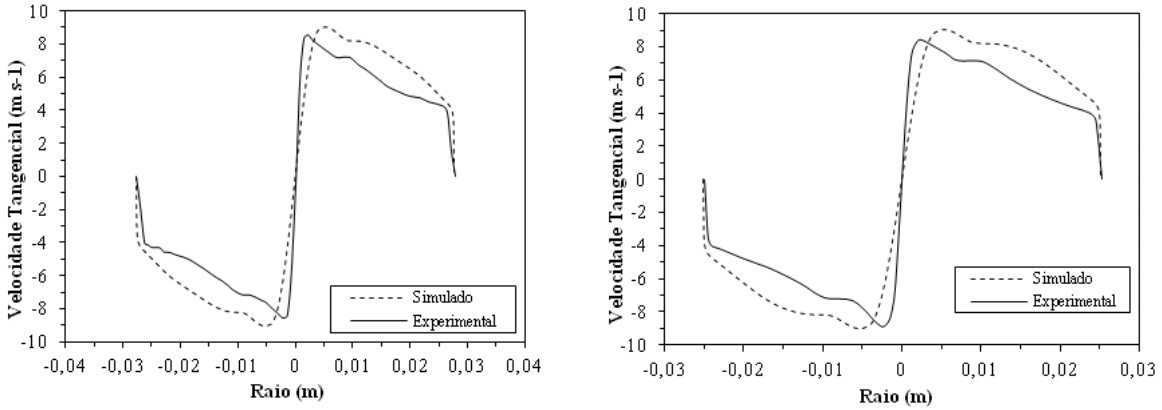
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Elementos	214.500	537.141	738.274	1.038.866
P_e (bar)	2,76	2,92	2,89	2,84
R_f	28,72	30,95	25,76	27,51
RQP	2,20	1,98	2,00	2,07

5.2. Resultados Gerais

O perfil de velocidades tangenciais (Figura 13) mostrou que esta velocidade aumenta de intensidade radialmente no sentido das paredes para o eixo central, atingindo um valor máximo próximo deste eixo. Este comportamento está de acordo com o que é citado na literatura (Svarovsky, 1984 e Heiskanen, 1993).

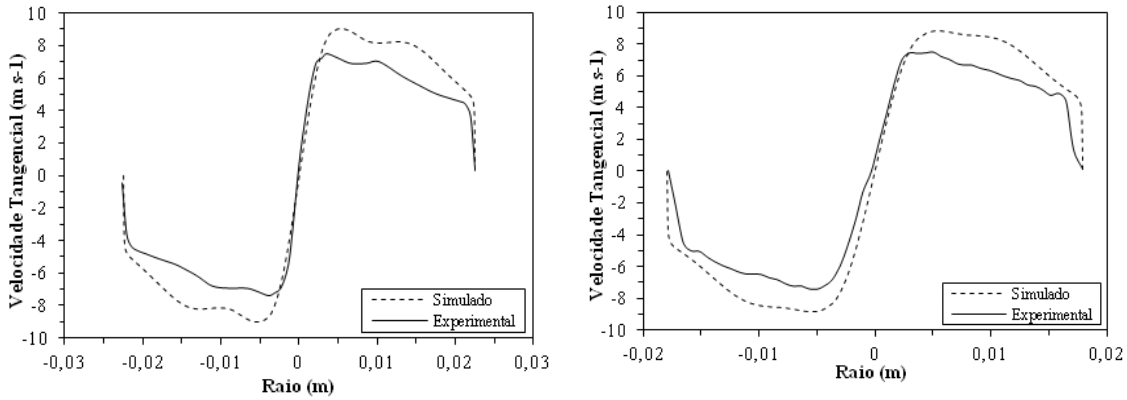
5.2.1. Hidrociclone Empregado por Marins *et al.* (2010)

Marins *et al.* (2010) obtiveram os perfis de velocidade tangencial em seis alturas, 180, 200, 220, 320, 440 e 600 mm, medidas tendo o topo externo do tubo de concentrado como origem. Nas Figura 14, Figura 15 e Figura 16 os perfis experimentais são comparados aos resultados obtidos através da fluidodinâmica computacional. É possível constatar que estes perfis possuem valores concordantes.



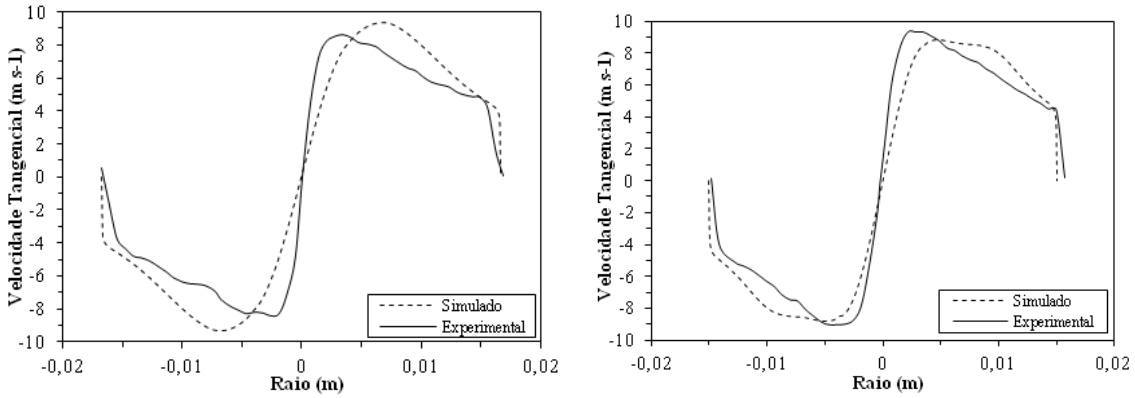
(a) (b)

Figura 14: Comparação entre os perfis de velocidade tangencial experimental e simulado: (a) Posição 180 mm. (b) Posição 200 mm.



(a) (b)

Figura 15: Comparação entre os perfis de velocidade tangencial experimental e do simulado: (a) Posição 220 mm. (b) Posição 320 mm.



(a) (b)

Figura 16: Comparação entre os perfis de velocidade tangencial experimental e do simulado: (a) Posição 440 mm. (b) Posição 600 mm.

A Figura 17 apresenta as linhas de corrente, que mostra os caminhos percorridos pelo fluido no interior do hidrociclone. Nesta figura, é possível visualizar o tradicional caminho espiralado descendente, próximo à parede e o espiralado ascendente, na região central.

A Figura 18 mostra o perfil de velocidades tangenciais em um plano na seção transversal à entrada do equipamento. Conforme também pode ser visualizado nas Figura 14, Figura 15 e Figura 16 o perfil de velocidades tangenciais mostra que a velocidade máxima encontra-se próxima do eixo central.

A boa simetria verificada nos resultados de perfil de velocidades desta geometria deve-se a presença de duas entradas, o que garante uma maior estabilidade hidrodinâmica (Belaidi e Thew, 2003).

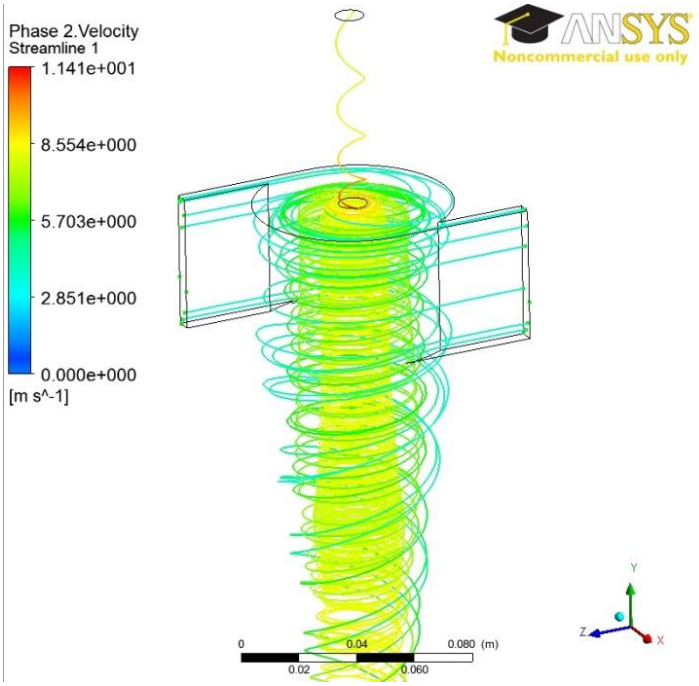


Figura 17: Linhas de corrente (caminho percorrido pela fase contínua).

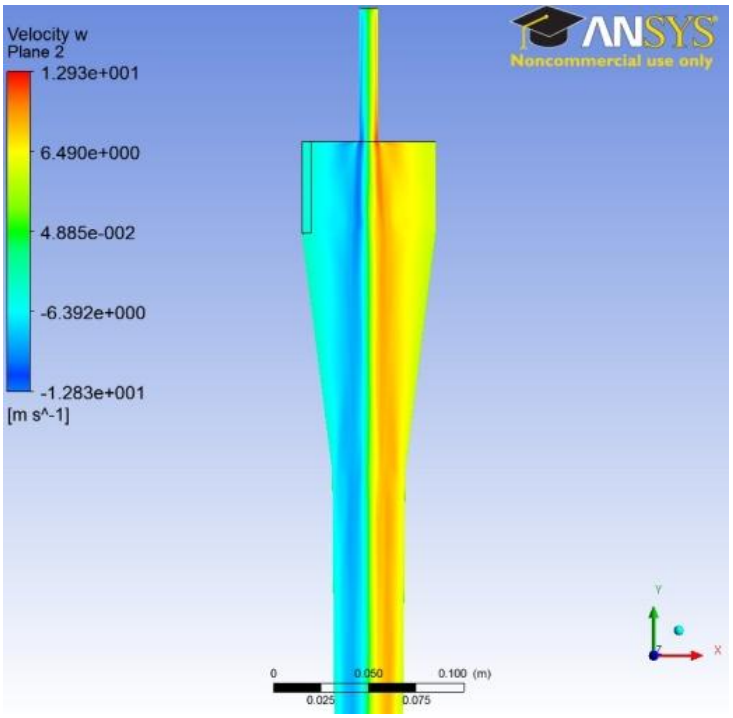


Figura 18: Perfil de velocidades tangencias do fluido.

A Figura 19 mostra o perfil de pressão em um plano na seção transversal no hidrociclone. Pode-se perceber que a pressão interna diminui radialmente alcançando seu menor valor no eixo central

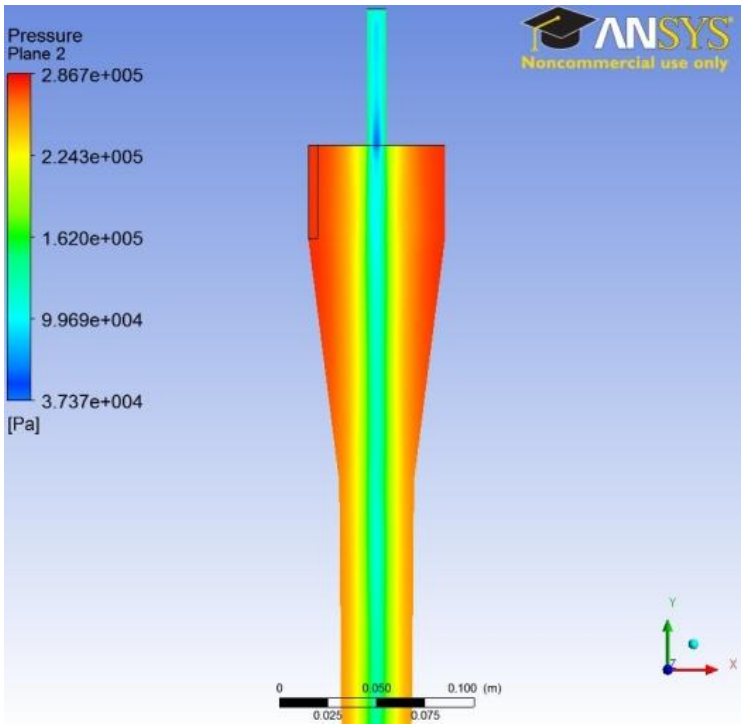


Figura 19: Perfil de pressões no hidrociclone empregado por Marins *et al*. (2010).

Na Tabela 12 é apresentada a comparação entre pressão na entrada e a razão de queda de pressão experimental e as obtidas no presente trabalho. A RQP foi calculada através da Equação 54. Como pode ser verificado, os resultados simulados representam bem os experimentais, o que mostra a adequação da modelagem utilizada.

Tabela 12: Comparação dos valores experimentais obtidos por Marins *et al*. (2010) com os da simulação para a pressão na entrada (P_e) e para a razão entre as quedas de pressão (RQP).

Variável	Experim.	Simulado	Δ (%)
P_e (bar)	3,02	2,92	-3,3
RQP	1,87	1,98	5,9

Com os resultados das simulações multifásicas é possível obter as concentrações do óleo nas saídas e o caminho percorrido por esta fase. Porém, apenas com a abordagem Euleriana é possível obter o perfil de fração volumétrica da fase dispersa no interior do equipamento utilizando o visualizador de resultados da Ansys, Post-CFD, como apresentado na Figura 20. Nesta figura, se observa também que o óleo se encontra mais concentrado da saída superior, indicando que o processo de separação está ocorrendo.

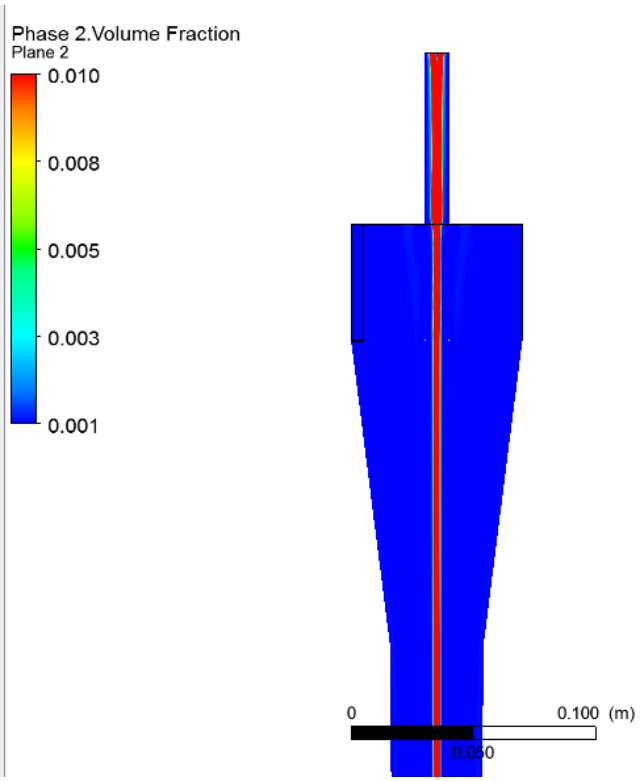


Figura 20: Fração volumétrica de óleo no plano vertical para o hidrociclone de Marins *et al.* (2010).

Outra causa para este acumulo é a baixa velocidade no centro do tubo da saída concentrada. Pois devido ao escoamento rotacional verifica-se que a velocidade é maior nas paredes e menor no centro (Figura 21).

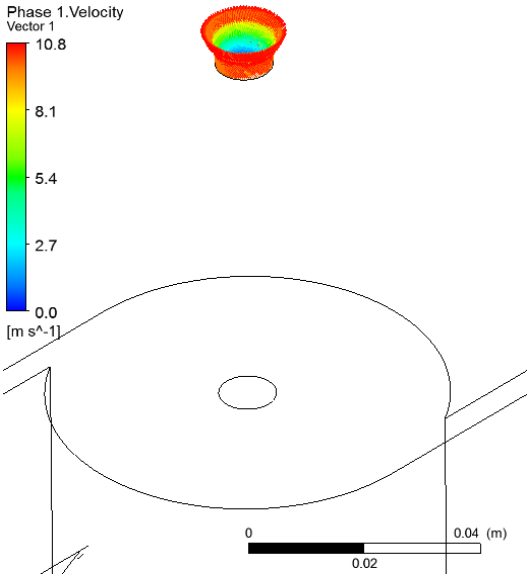


Figura 21: Vetores velocidade na saída superior do hidrociclone de Marins *et al.* (2010).

5.2.2. Hidrociclone Empregado por Zhou *et al.* (2010)

Zhou *et al*. (2010) empregaram um analisador dinâmico de partículas (PDA) para medir o perfil de velocidades tangenciais ao longo do raio do hidrociclone, a uma altura definida pelo eixo central do tubo de alimentação (Z = 0). Estes autores mediram também este mesmo perfil 30 mm abaixo de Z=0 (Z = 30 mm), como mostrado na Figura 22.

A Figura 23 e Figura 24 mostram uma comparação entre os resultados experimentais de Zhou *et al*. (2010), com uma vazão de 2000 l/h, e os obtidos nas simulações do presente trabalho, a diferentes tempos de simulação, para Z = 0 e Z = 30 mm, respectivamente. Como se pode verificar, os perfis simulados para os tempos de 1,3 e 1,7 segundos são coincidentes, o que mostra que o regime permanente foi atingido. Além disso, os resultados experimentais e os da simulação com 1,3 e 1,7 s concordaram entre si, mostrando, uma vez mais, a adequação da modelagem empregada.

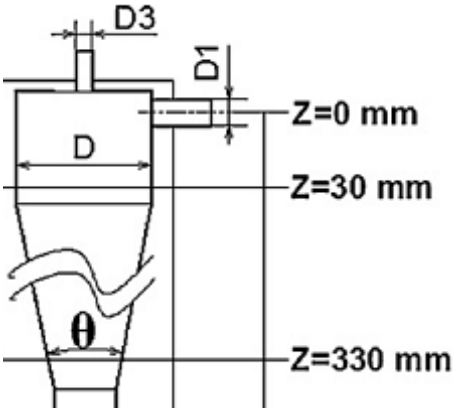


Figura 22: Posição das linhas de medição, via PDA, dos perfis de velocidades tangenciais obtidas por Zhou *et al*. (2010).

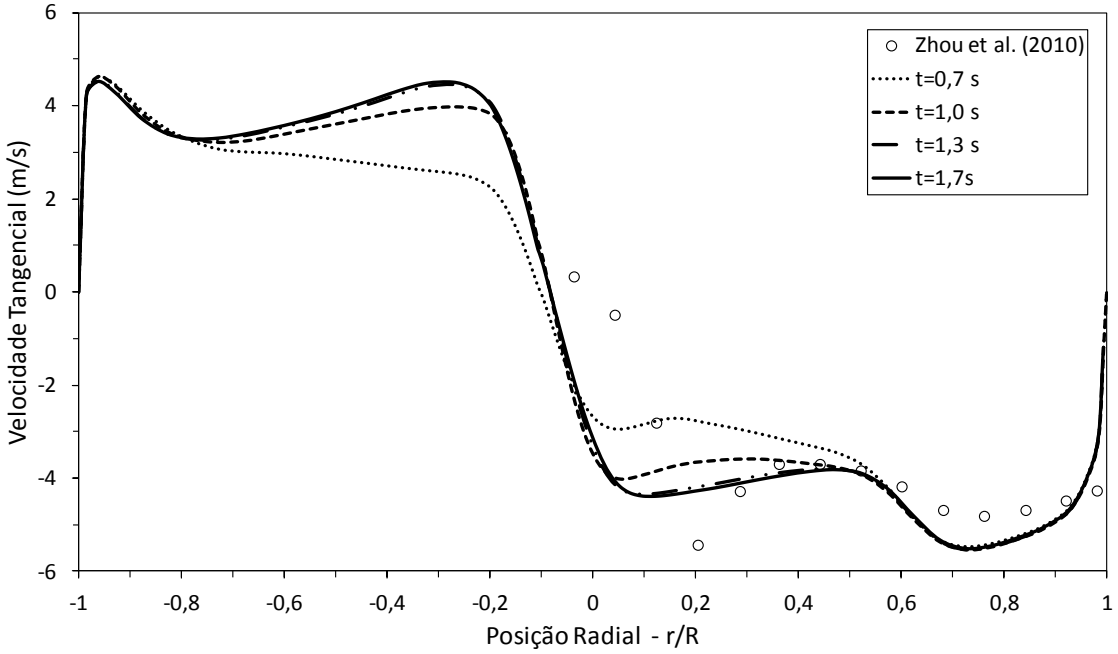


Figura 23: Comparação entre os dados experimentais de Zhou *et al*. (2010) e os da simulação numérica do presente trabalho, em Z=0 mm e para diferentes tempos de simulação.

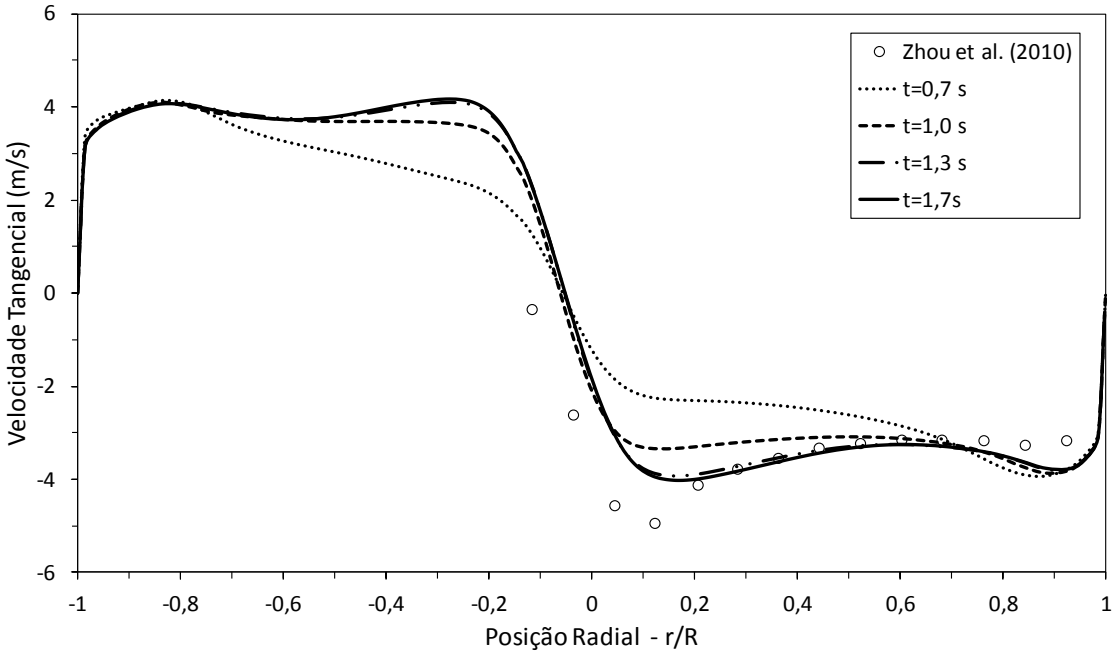


Figura 24: Comparação entre os dados experimentais de Zhou *et al*. (2010) e os da simulação numérica do presente trabalho, em Z=30 mm e para diferentes tempos de simulação.

A Figura 25 mostra as linhas de corrente no hidrociclone, onde é possível observar os vórtices externos descendentes, que tendem a sair pela saída inferior, e os vórtices internos ascendentes, que saem pela saída superior.

Na Figura 26, são apresentados os perfis de velocidades tangenciais e de pressões. Observa-se nesta figura que, diferente do resultado obtido com a simulação numérica para o hidrociclone de Marins *et al*. (2010), estes perfis possuem certa oscilação ao redor do eixo central. A justificativa para este fenômeno é a assimetria no escoamento gerada pelo fato do hidrociclone de Zhou *et* al. (2010) possuir apenas uma entrada.

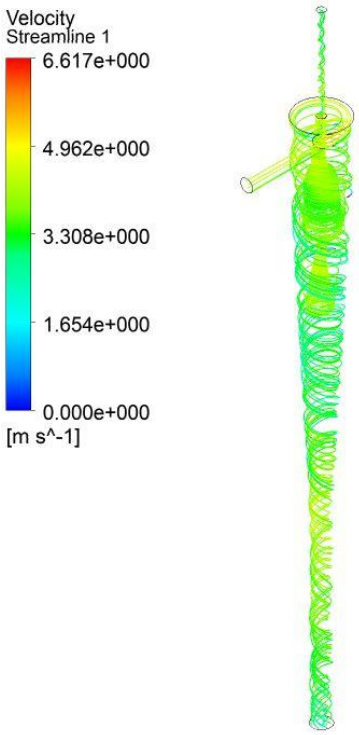
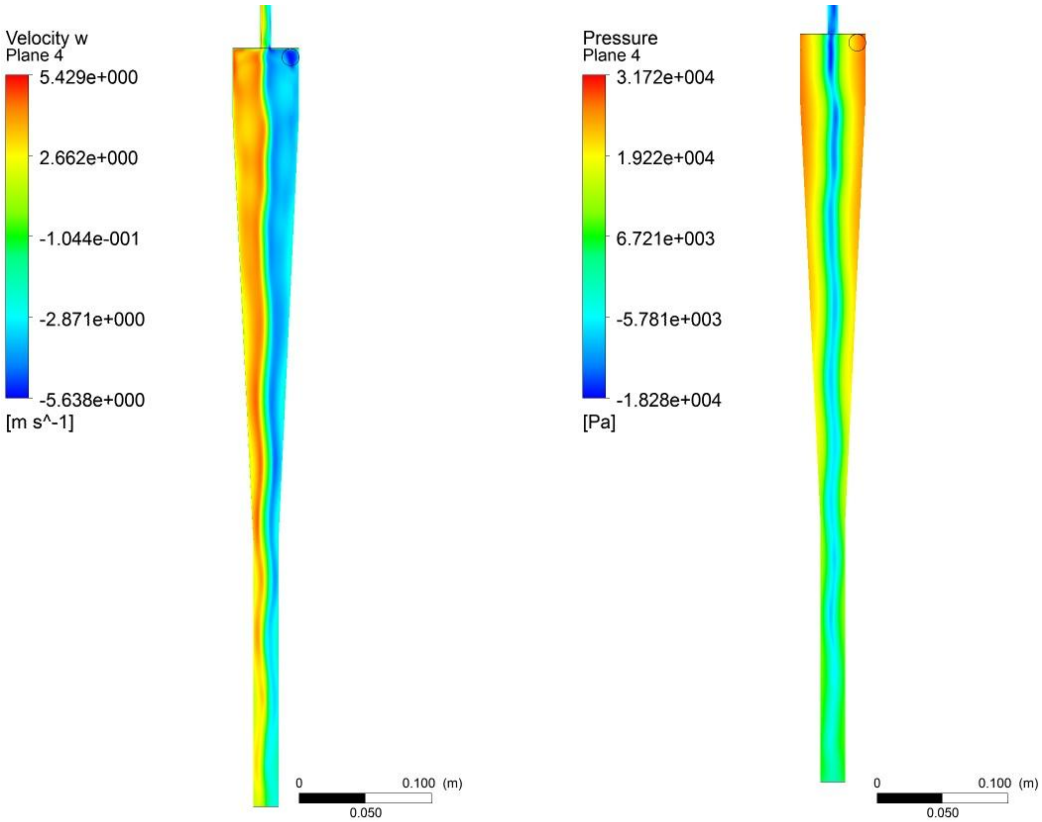


Figura 25: Vórtices externo descendente e interno ascendente no interior do hidrociclone, obtidos com simulação numérica.



(a) (b)

Figura 26: Perfis de velocidades tangenciais (a) e de pressões (b).

Apesar de Zhou *et al*. (2010) não fornecerem o valor de RQP com o qual trabalharam o valor obtido com as simulações numéricas foi de 1,53, valor este que está dentro da faixa de operação usual encontrada na literatura. Belaidi e Thew (2003) empregaram valores de RQP entre 1 a 2,75. No trabalho de Husveg *et al*. (2007), foram avaliados valores de RQP de 0,6 a 1,8 e sua influência na eficiência de separação.

5.3. Eficiência de Separação

A eficiência total reduzida (E'_T) foi obtida de duas formas distintas. Na primeira, alimentou-se a curva de distribuição cumulativa de gotas (Equação 1) diretamente no programa Fluent, obtendo-se a eficiência total (E_T) através da Equação 8 e calculando-se E'_T com a Equação 9. Na segunda, alimentou-se o Fluent várias vezes com um único tamanho de gotas, obtendo-se a eficiência granulométrica G para cada um destes tamanhos (Equação 4), calculando-se, então, E_T através das Equações (5), (6) e (11).

A primeira forma de cálculo de E'_T exige uma abordagem lagrangeana, enquanto que a segunda forma permite ambas as abordagens (lagrangeana e euleriana).

5.3.1. Eficiências para o Hidrociclone Empregado por Marins *et al.* (2010)

A Figura 27 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com abordagem lagrangeana. Com base nesta figura, obtém-se um valor de *n*, na Equação 6, igual a 2,2.

Na Figura 28, tem-se as curvas de eficiência granulométrica (a) e de eficiência granulométrica reduzida (b), de onde se obtém d'_{50} igual a 25 µm. Nesta figura observa-se também que o programa Fluent, utilizando a abordagem lagrangeana para as simulações multifásicas, subestima a eficiência granulométrica para gotas pequenas. Neste trabalho, a razão de fluido R_f empregada foi de 31%. Isto significa que, devido ao efeito da divisão da vazão de entrada em duas correntes, qualquer tamanho de partícula deveria ter uma eficiência granulométrica mínima igual ao R_f. A Figura 28(a) mostra que não foi possível obter-se bons resultados de G para valores inferiores ao diâmetro de corte reduzido (25 µm). Assim, no cálculo do parâmetro n, os três primeiros pontos desta figura foram desprezados.

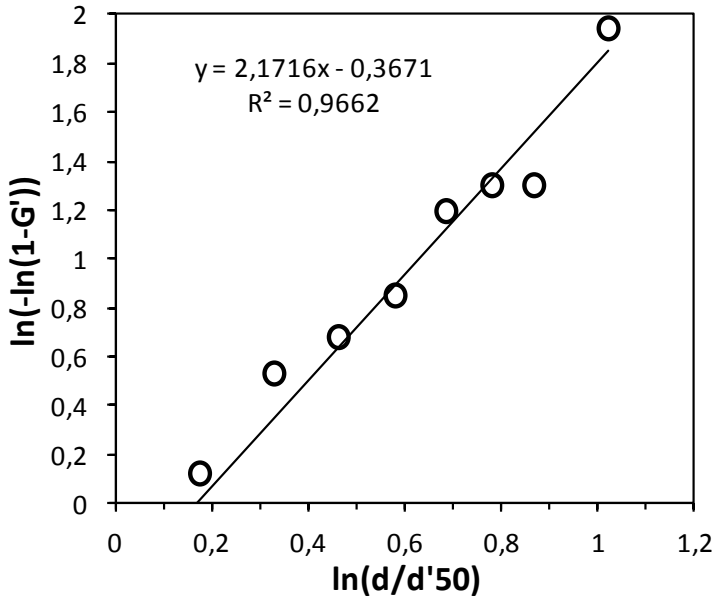


Figura 27: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida a partir dos dados obtidos com o hidrociclone do Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem lagrangeana.

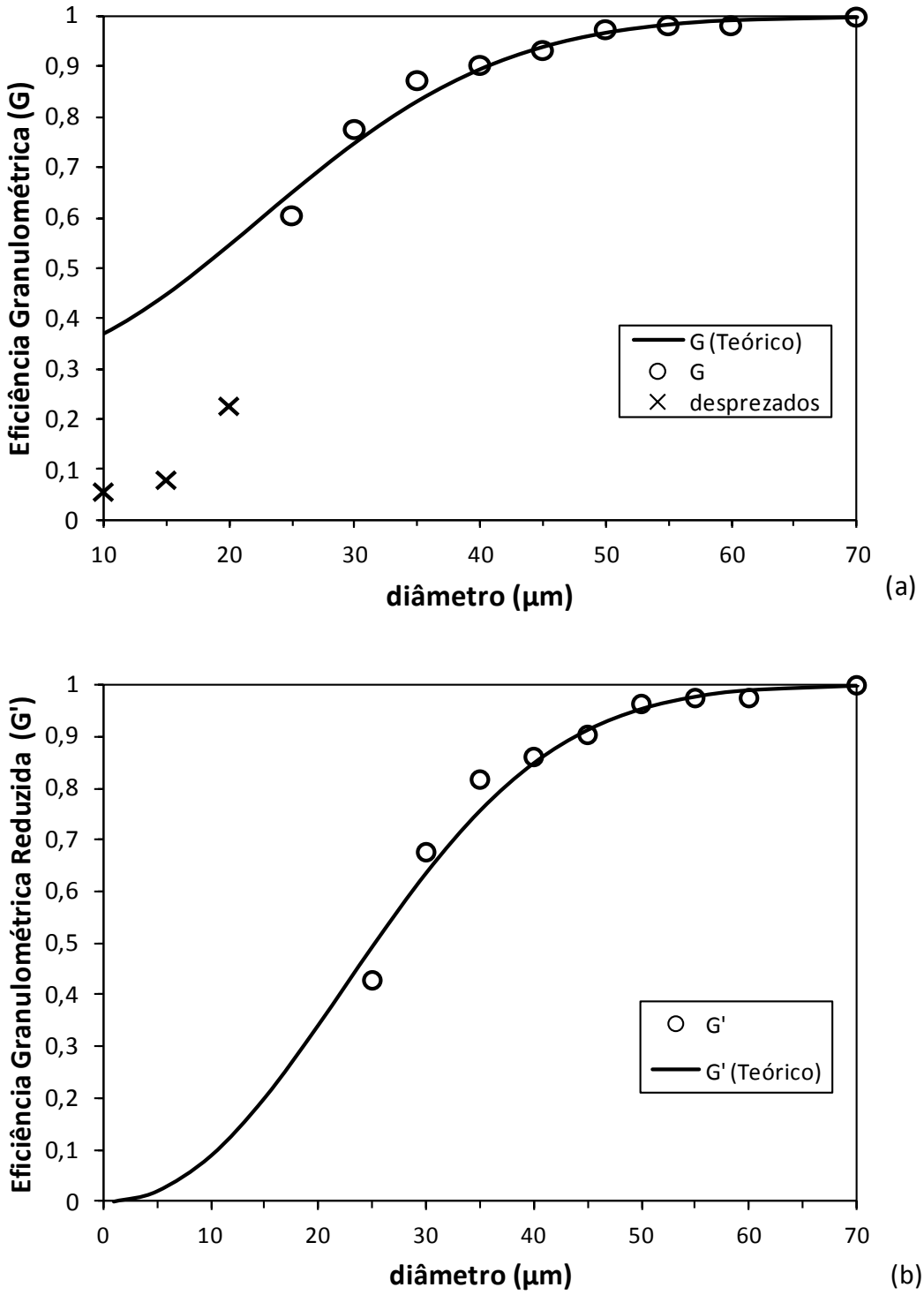


Figura 28: Eficiência granulométrica (a) e a eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem lagrangeana.

A título de comparação, empregou-se também a abordagem Euleriana para a fase particulada. A Figura 29 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com esta abordagem. Desta figura, obtém-se um valor de *n*, na Equação 6, igual a 2,8.

Na Figura 30, tem-se as curvas de eficiência granulométrica (a) e de eficiência granulométrica reduzida (b), de onde se pode obter d'_{50} igual a 22 µm. Como se pode perceber, na abordagem Euleriana, o menor valor de eficiência granulométrica obtido foi, como esperado, igual à razão de fluido R_f (31%).

Um resumo dos valores de n (Equação 6) e d'_{50} é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Expoente n da curva de eficiência granulométrica reduzida (Equação 6) e o diâmetro de corte reduzido d'_{50} obtidas com as abordagens Lagrangeana e Euleriana.

Parâmetros	Langrangeana	Euleriana
n	2,2	2,8
d'_{50}	25	22

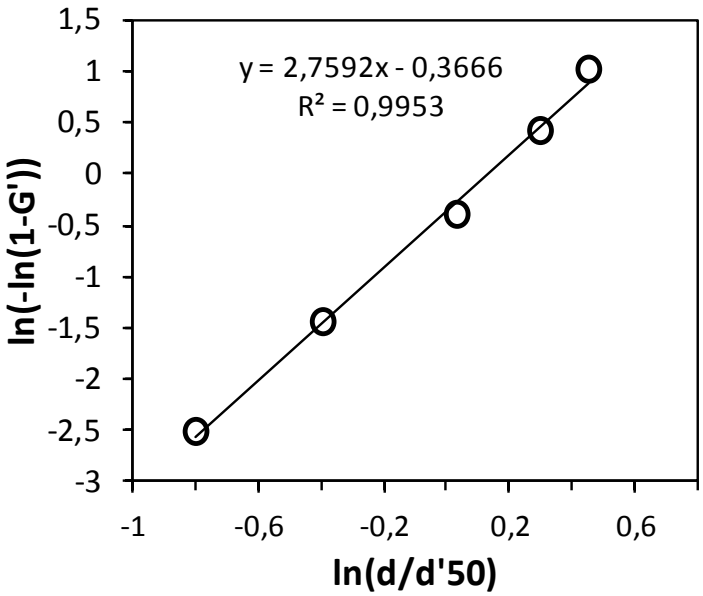
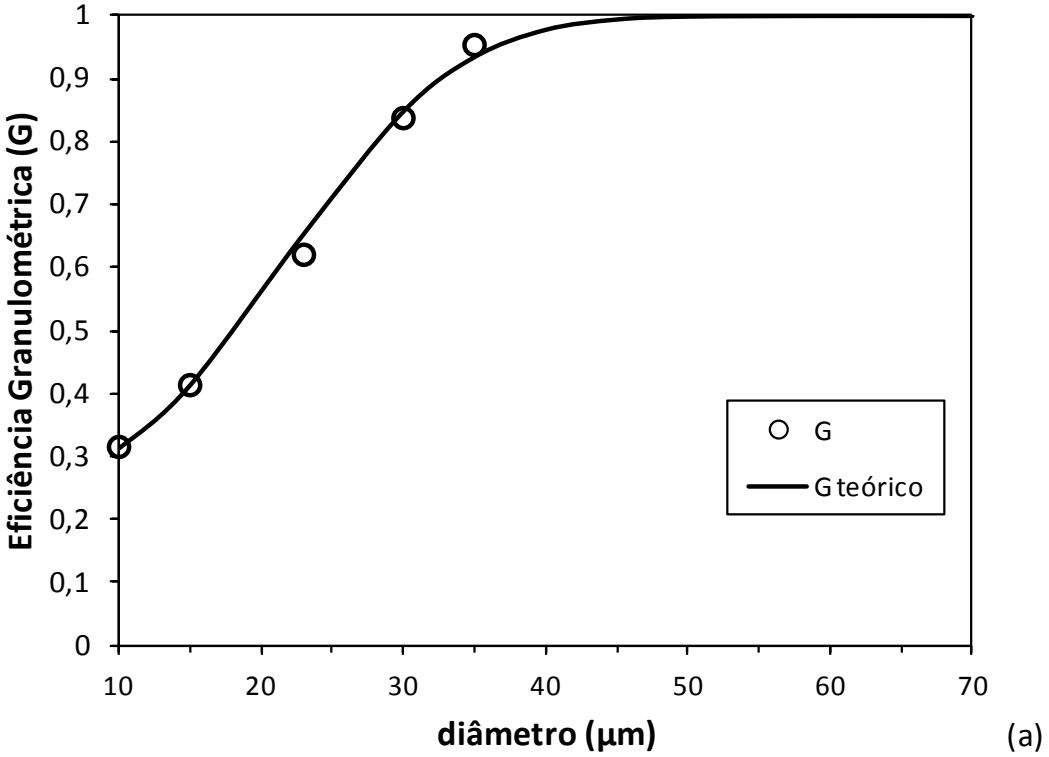
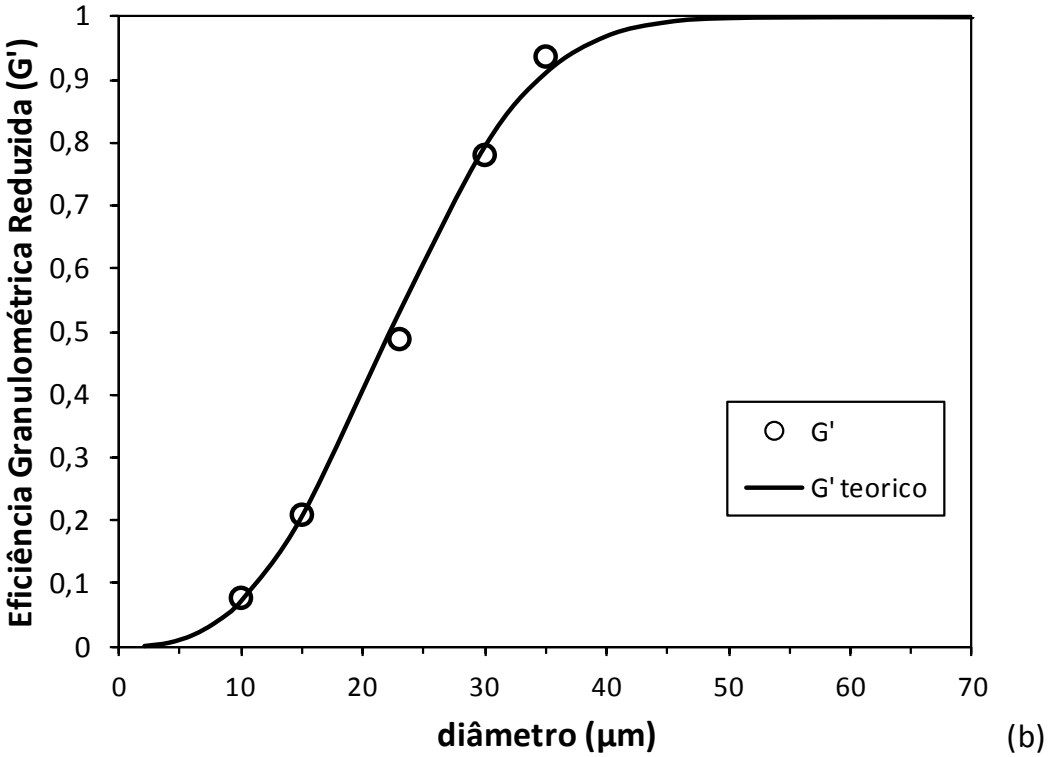


Figura 29: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida a partir dos dados obtidos com o hidrociclone de Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem euleriana.



(a)



(b)

Figura 30: Eficiências granulométrica (a) e granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone de Marins *et al.* (2010), utilizando a abordagem euleriana.

Com o objetivo de estimar-se a eficiência total reduzida que seria produzida pelo hidrociclone de Marins *et al*. (2010), alimentou-se este hidrociclone com algumas

distribuições de tamanhos de gotas de óleo (Colman e Thew (1980); Husveg *et al.* (2007) e Husveg (2011) e distribuição obtida no LADEQ - Laboratórios do Departamento de Engenharia Química da Escola de Química/UFRJ). Estas distribuições de tamanho de gotas foram ajustadas ao modelo RRB (Equação 1). Seus parâmetros podem ser encontrados na Tabela 14, enquanto que seu gráfico é apresentado na Figura 31.

Tabela 14: Parâmetros das distribuições de tamanhos de gotas empregadas neste trabalho.

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

§ = Dados do próprio laboratório do autor deste trabalho.

Com os dados da tabela acima, foram calculadas as eficiências para as três distribuições. O processo de cálculo da eficiência total seguiu as metodologias apresentadas no início do item 5.3 e os resultados são apresentados na Tabela 15.

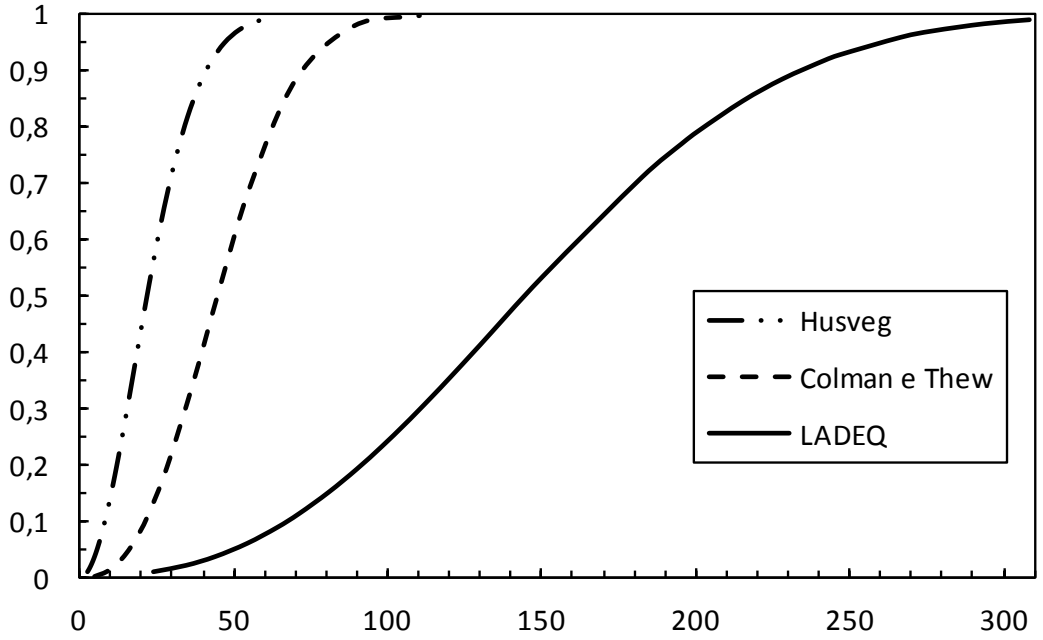


Figura 31: Distribuições de tamanhos de gotas empregadas neste trabalho.

Tabela 15: Eficiências totais reduzidas obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas ao se alimentar o hidrociclone Marins *et al.* (2010) com vários tamanhos de gotas (E'_{TG}) empregando as abordagens lagrangeana e euleriana e com a distribuição de tamanhos (E'_{Ty}).

Distribuição	**Mediana (μm)**	***E'_{TG}* (euleriana)**	***E'_{TG}* (lagrangeana)**	***Δ* (%)***	***E'_{Ty}* (RRB+ lagr.)**	***Δ* (%)***
Fina	21	0,497	0,429	-13,7	0,306	-38,4
Média	45	0,858	0,792	-7,7	0,785	-8,5
Grossa	130	0,991	0,986	-0,5	0,986	-0,5

*Erro percentual tomando-se como base E'_{TG} euleriana.

Os resultados de eficiência obtidos mostram que, para as distribuições cujas medianas eram maiores que o d'_{50} (média e grossa), as duas abordagens utilizadas, lagrangeana e euleriana, apresentaram resultados similares, com erro inferior a 10%. Para a distribuição fina, a abordagem lagrangeana, quando se alimentou o hidrociclone com apenas um tamanho de gota em cada simulação, repetindo-se este procedimento para vários tamanhos de gotas, produziu um resultado aceitável (erro = 13,7%). Entretanto, obteve-se um erro alto (38,4%), para a abordagem lagrangeana, quando se alimentou o Fluent com a distribuição de tamanhos fina. Isto se deve ao fato, como já comentado anteriormente, do Fluent, subestimar a eficiência granulométrica para gotas pequenas, quando empregando a abordagem lagrangeana. Portanto, caso a distribuição de tamanhos contenha um elevado percentual de partículas com diâmetro abaixo de d'_{50}, o programa irá subestimar a eficiência total reduzida (ver Figura 26a).

Com base nos resultados da Tabela 15, passou-se a empregar, neste estudo, apenas a abordagem lagrangeana pelo fato dos resultados das simulações serem obtidos mais rapidamente que através da abordagem euleriana.

5.3.2. Eficiências para o Hidrociclone Empregado por Zhou *et al.* (2010)

As simulações para o hidrociclone de Zhou *et al*. (2010) foram transientes. Como estas simulações são bem demoradas, foi adotada apenas a abordagem Lagrangeana para os cálculos multifásicos.

A Figura 32 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com abordagem Lagrangeana. Nesta figura, se obtém também o valor de *n*, que foi igual a 1,67.

Na Figura 33, pode-se encontrar a curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b), de onde se obtém d'_{50} igual a 30 µm.

Para este hidrociclone também foi constatada a inconsistência física das partículas menores que o diâmetro de corte gerarem eficiências granulométricas menores que R_f, como foi observado com o hidrociclone de Marins *et al.* (2010).

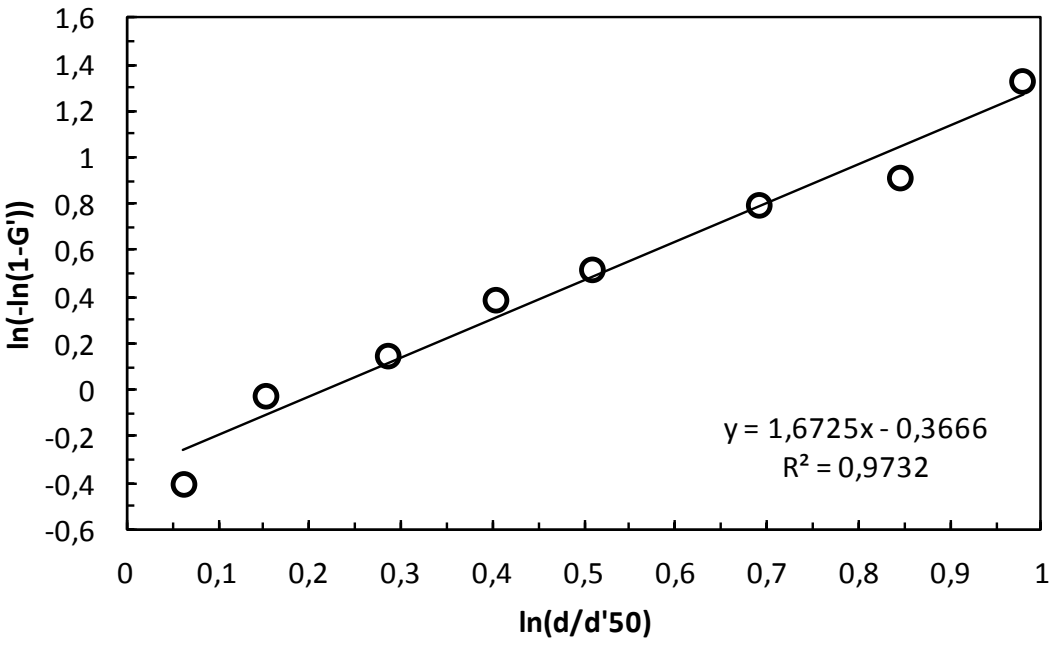


Figura 32: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida a partir dos dados obtidos com o hidrociclone do Marins et al. (2010), utilizando a abordagem lagrangeana.

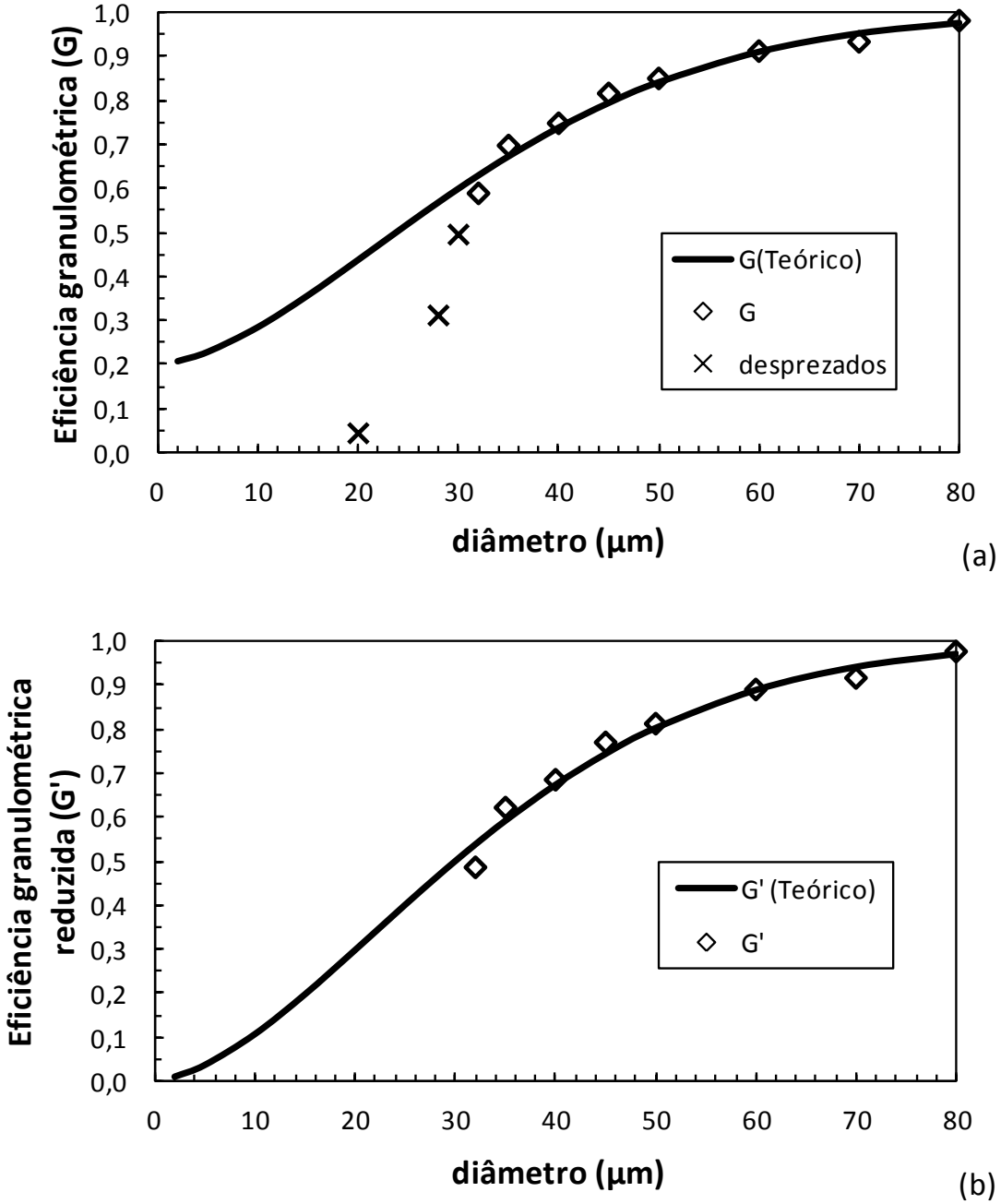


Figura 33: Curvas de eficiência granulométrica (a) e de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do Zhou *et al.* (2010), utilizando a abordagem Lagrangeana.

As mesmas distribuições de tamanhos de gotas utilizadas para os cálculos de eficiência empregados nas simulações do hidrociclone de Marins *et al.* (2010) foram também aplicadas para este hidrociclone (Tabela 16). Através destes dados, foi possível calcular as eficiências para as três distribuições. A primeira eficiência (E_{Ty}) foi calculada utilizando a primeira forma apresentada no item 5.3 e a eficiência E'_{TG} foi obtida utilizando a segunda forma e com os valores de n e d'_{50} apresentados anteriormente.

Tabela 16: Eficiências totais reduzidas obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas ao se alimentar o hidrociclone de Zhou *et al.* (2010) com vários tamanhos de gotas (E'_{TG}) e com as distribuições de tamanhos (E'_{Ty}), ambas as abordagens lagrangeana.

Distribuição	**Mediana da distribuição (μm)**	E'_{TG}	E'_{Ty}	Δ(%)
Fina	21	0,359	0,261	-27,3
Média	45	0,681	0,674	-1,0
Grossa	130	0,970	0,961	-0,9

Os valores de E'_T obtidos com as duas formas empregadas concordam bem para as distribuições média e grossa de tamanhos de gotas, com diferenças da ordem de 1%. Já para a distribuição fina, obteve-se 27% de diferença. Os motivos para esta diferença foram discutidos ao final do item 5.3.1.

Os resultados da Tabela 16 mostram que o hidrociclone empregado por Zhou *et al*. (2010) é adequado apenas para o tratamento de águas oleosas com distribuição de tamanhos relativamente grossa, por exemplo, com mediana superior a 5 vezes o diâmetro de corte reduzido.

5.4. Resultado do Teste de Malha para o Ponto Central do Planejamento de Experimentos

Ao utilizar o planejamento de experimentos como ferramenta, decidiu-se iniciar os experimentos pelo ponto central (experimento 1), pois, desta forma, é possível avaliar os resultados e assim verificar se a simulação fornece bons resultados. Para um estudo em que se deseja obter uma geometria ótima de um hidrociclone é desejável que as condições do ponto central gerem uma resposta em torno de 50% para a eficiência granulométrica G do diâmetro de gota testado. Almeja-se esta condição para que se tenha sensibilidade nas respostas para as demais geometrias, o que não seria obtido se G estivesse muito próximo de 0% ou de 100%.

O teste de malha realizado foi baseado na modificação proporcional do número de elementos nas principais regiões do hidrociclone. As demais regiões foram modificadas para garantir suavidade e coerência nos tamanhos de elementos, sendo desta forma possível garantir os critérios de qualidade para as diferentes malhas, como mencionado no item 3.5.

Na Figura 34, são apresentadas as regiões de refinamento da malha deste hidrociclone e, na Tabela 17, são apresentadas as quantidades de elementos presentes nas principais regiões geométricas.

Tabela 17: Quantidade de elementos para as principais regiões geométricas do hidrociclone ponto central para as três malhas utilizadas no teste de independência de malha.

Geometria	**Dimensões (mm)**	**No. de Elementos**		
		M1	**M2**	**M3**
Diâmetro do concentrado (Do)*	3,17	39	35	31
Diâmetro do diluído (Du) *	5,29	97	87	77
Diâmetro do cilindro (Dc) *	40,0	97	87	77
Diâmetro do duto de alimentação (Di) *	5,6	27	24	21
Comprimento da seção cilíndrica (L1)	20,0	40	34	32
Espessura da parede (L3)	0,5	6	6	5
Comprimento da seção cônica (L4)	366,46	143	128	114
Comprimento do concentrado(L2+L5)	20,0	48	43	38
Comprimento do diluído (L6)	20,0	32	28	25
Comprimento do tubo de entrada (L7)	30,0	23	20	18
N° total de elementos	-	754.396	493.601	350.608

* Quantidade de elementos na linha do diâmetro.

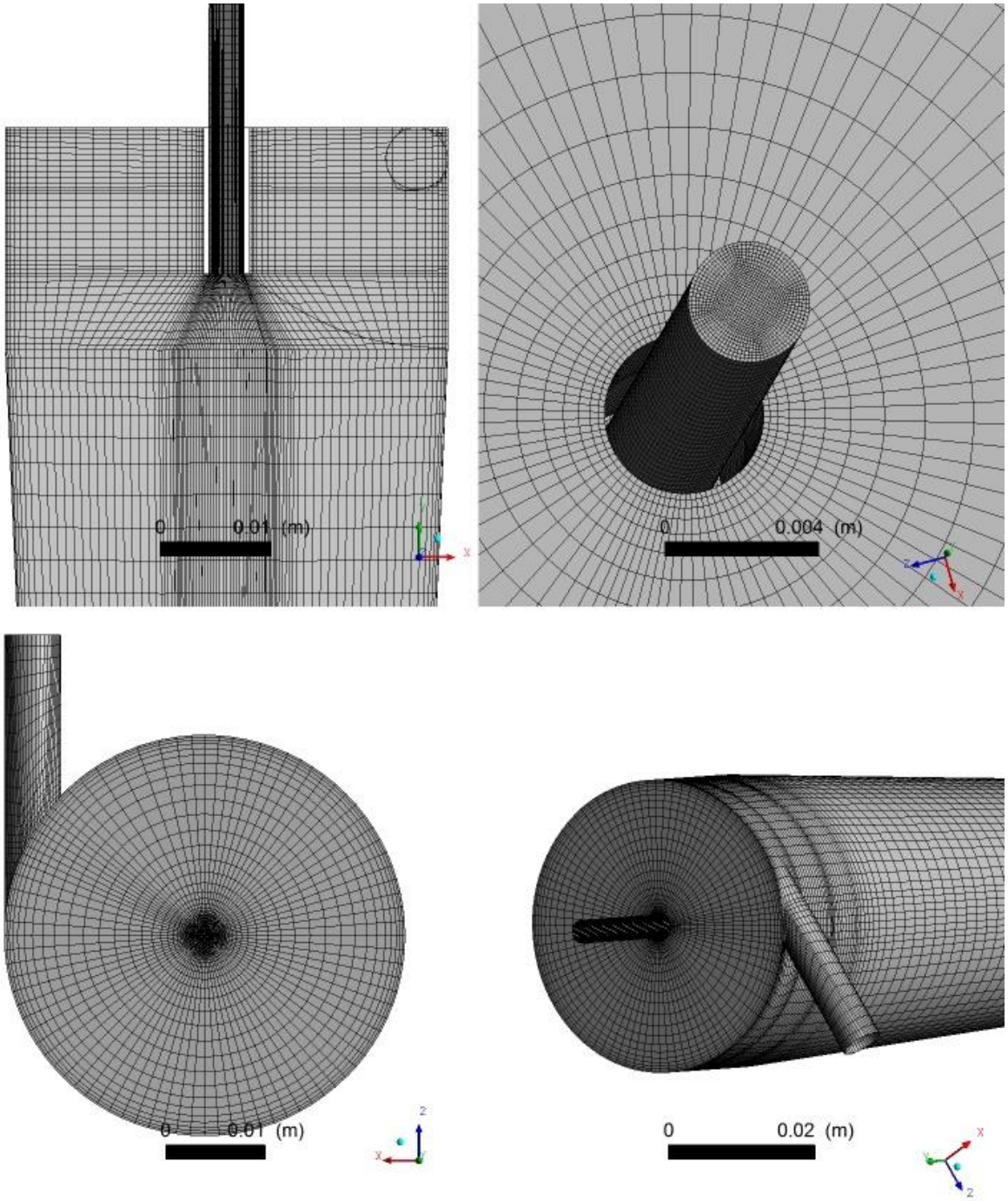


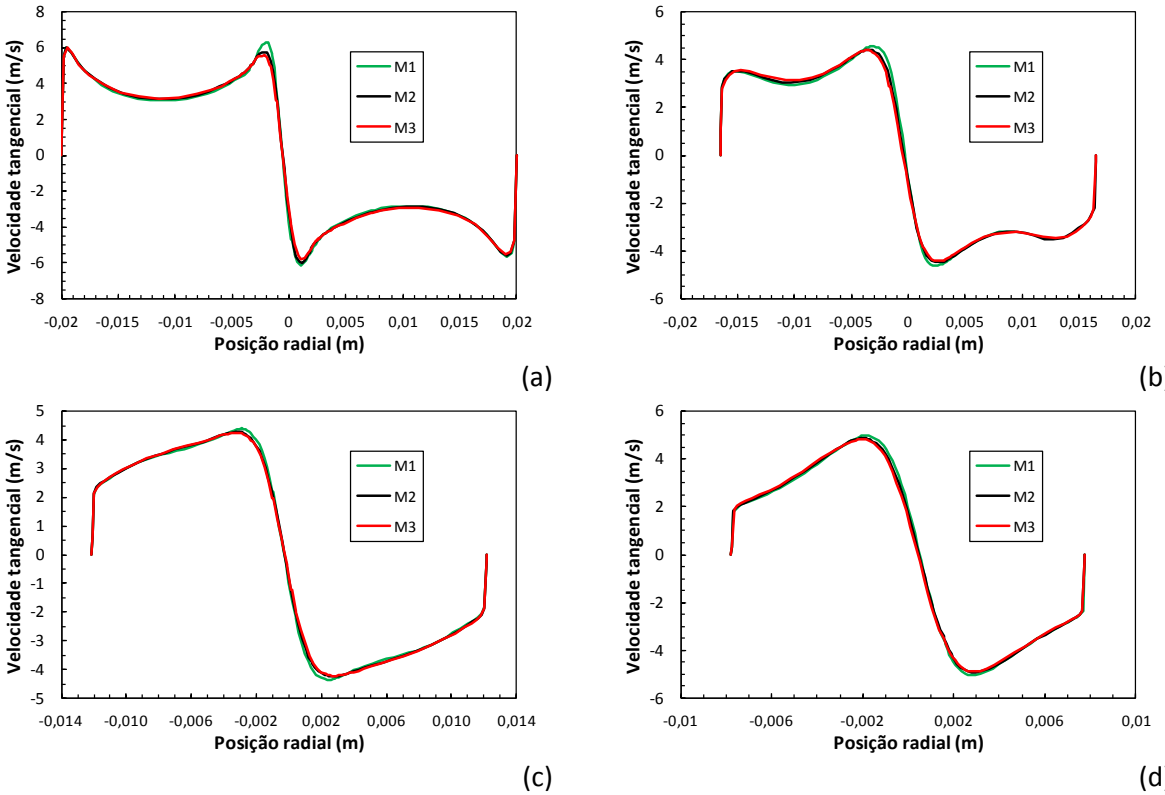
Figura 34: Detalhes da malha com 754.396 elementos (M1) do hidrociclone ponto central do planejamento de experimentos.

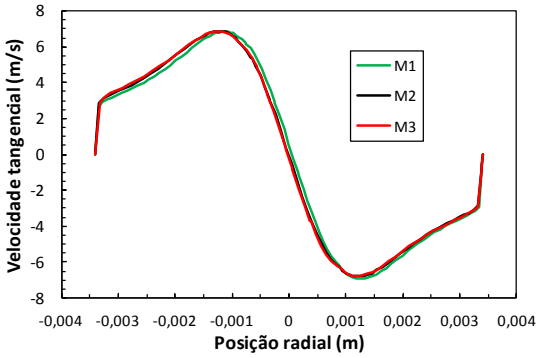
Na Tabela 18 são apresentados os resultados do teste de malha para a geometria do ponto central do planejamento de experimentos para os três tamanhos de malha, simulados com gota de óleo com diâmetro igual a 28 µm.

Tabela 18: Resultados do teste de malha para o hidrociclone ponto central do planejamento de experimentos, para os três tamanhos de malha.

Variável	M1	M2	M3
N° elementos	754.396	493.601	350.608
Rf	0,219	0,226	0,226
G	0,549	0,561	0,554
G’	0,423	0,433	0,424
ΔP (Pa)	8,61E4	8,45E4	8,39E4
fvc	0,0125	0,0124	0,0122
fvd	0,0029	0,0029	0,0029

O perfil de velocidades tangenciais foi obtido em função do diâmetro a diferentes alturas do hidrociclone, tendo como origem o topo da região cilíndrica. Na Figura 35, são apresentados os perfis de velocidades tangenciais das diferentes malhas, medidos a 17 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm e 400 mm abaixo do topo da região cilíndrica.





(e)

Figura 35: Comparação entre os perfis de velocidades tangenciais nas diferentes malha, medidos a 17 mm (a), 100 mm (b), 200 mm (c), 300 mm (d) e a 400 mm (e) abaixo do topo da região cilíndrica do hidrociclone.

Os critérios de seleção da malha ótima utilizados foram o perfil de velocidade tangencial na parte cilíndrica e cônica do hidrociclone, Figura 36, juntamente com os resultados de R_f, G', ΔP, fvd e fvc (Tabela 18). Através destes critérios, verifica-se que as três malhas fornecem resultados com boa concordância. O maior valor de erro relativo entre todas as respostas da Tabela 18, considerando M1 como base, foi inferior a 4%.

Deste modo, se escolheu a malha com 350.608 elementos (M3), pois esta apresenta os mesmos resultados das demais, porém, com um menor esforço computacional.

Para a construção, no ICEM, das demais malhas do planejamento de experimentos foram necessárias algumas pequenas modificações nas quantidades de elementos de dadas arestas dos blocos estruturados, devido aos diferentes valores de diâmetro do concentrado e do diluído. Estas adaptações foram necessárias para manter os valores dos critérios de qualidade utilizados. Além disso, como o hidrociclone possui o ângulo da região cônica fixo, a diminuição do diâmetro do diluído (*underflow*) promove um aumento no comprimento da região cônica do equipamento. Por isso, foram utilizados os dados da Tabela 17 para manter a proporcionalidade da malha.

Muitas vezes, em teste de malha de hidrociclones, é utilizada apenas a velocidade tangencial como resposta, o que não garante, com isso, que se consiga obter a melhor malha. Por isso, é necessário utilizar, sempre que possível, as mesmas condições das simulações no teste de malha. Ou seja, caso se deseje conduzir um estudo multifásico, é importante que o teste de malha seja realizado com esta mesma condição.

5.5. Resultados do Planejamento de Experimentos

Para avaliar o desempenho dos hidrociclones obtidos com o planejamento de experimentos, foram analisados os resultados de eficiência granulométrica reduzida, razão de fluido, queda de pressão (ΔP), fração volumétrica de óleo no concentrado (fvc) e no diluído (fvd). Estas variáveis nos dão informações do funcionamento e do poder de separação do equipamento.

Na Tabela 19, são apresentados os resultados para todas as geometrias estudadas, empregando-se um diâmetro de gota de óleo igual a 28 µm.

Tabela 19: Resultado do planejamento de experimentos para as diversas geometrias simuladas com diâmetro de gota de óleo igual a 28 µm.

Experimento	Do	Du	G	R_f	G'	ΔP (Pa)	fvc	fvd
1	3,17	5,29	0,554	0,226	0,424	8,39E+04	0,0122	0,0029
2	3,17	4,23	0,687	0,310	0,547	1,07E+05	0,0111	0,0022
3	3,17	6,34	0,417	0,142	0,321	6,58E+04	0,0146	0,0034
4	2,70	6,03	0,391	0,126	0,303	7,10E+04	0,0154	0,0035
5	2,50	5,29	0,410	0,144	0,311	8,78E+04	0,0142	0,0035
6	3,64	6,03	0,507	0,203	0,382	6,80E+04	0,0125	0,0031
7	3,84	5,29	0,675	0,308	0,530	7,71E+04	0,0109	0,0023
8	3,64	4,54	0,756	0,357	0,621	9,24E+04	0,0106	0,0019
9	2,70	4,54	0,540	0,211	0,417	1,05E+05	0,0127	0,0029

Analisando-se a Tabela 19, observa-se que o hidrociclone mais eficiente quanto à separação não é, necessariamente, o equipamento que consegue maiores valores de concentração de óleo na saída concentrada. Desta forma, dependendo do objetivo, não significa que o hidrociclone mais eficiente seja o melhor. Ou seja, é possível com uma geometria obter um equipamento que concentre a corrente de saída superior, ou que tenha a corrente de saída inferior mais diluída.

Nesta tabela, pode-se verificar que o experimento número oito é o que obtém maior valor de G' e a corrente diluída mais limpa. Já o experimento número quatro, apesar de ser o menos eficiente, é o que produz a maior concentração de óleo na saída superior.

Nota-se também que G' varia diretamente com a R_f. Mas percebe-se que com o aumento da razão de fluidos, consequentemente, aumenta-se a quantidade de água que deixa o equipamento pela saída superior, tendo como efeito a diluição desta corrente.

Com a utilização do planejamento de experimentos utilizando a análise das superfícies de respostas com dois fatores foi possível a criação de modelos que descrevem o comportamento das respostas como função dos diâmetros do concentrado e diluído.

Na Equação 55 é apresentada, de uma forma geral, a expressão de respostas do planejamento como função dos diâmetros das saídas, ou seja, na forma não codificada.

$$Y = bo + b1.Do + b2.Du + b3.Do.Du + b4.Do^2 + b5.Du^2 \quad (55)$$

Simplificações podem ser feitas na equação completa gerando modelos simplificados. Porém, estes devem ser capazes de manter a qualidade da equação original. Esta estratégia consiste na retirada de parâmetros com baixa ou nenhuma influência estatística, através da análise de variância (Rodrigues e Lema, 2009).

Tabela 20 à Tabela 25, são apresentados os modelos simplificados com os termos estatisticamente significativos para o modelo de cada uma das variáveis. Para a análise de variância (ANOVA) adotou-se uma significância de 5%. Os parâmetros A e B representam respectivamente D_o e D_u.

Tabela 20: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a eficiência granulométrica G.

Parâmetro	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Prob>F
Modelo	0,140958	3	0,046986	605,4945	< 0,0001
A	0,06244	1	0,06244	804,6426	< 0,0001
B	0,076018	1	0,076018	979,624	< 0,0001
AB	0,0025	1	0,0025	32,2167	0,0024
Erro puro	0,000388	5	7,76E-05		
Cor Total	0,141346	8			

Tabela 21: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a razão de fluido R_f.

Parâmetro	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Prob>F
Modelo	0,055453	3	0,018484	5428,471	< 0,0001
A	0,02587	1	0,02587	7597,636	< 0,0001
B	0,028392	1	0,028392	8338,221	< 0,0001
AB	0,00119	1	0,00119	349,555	< 0,0001
Erro puro	1,7E-05	5	3,41E-06		
Cor Total	0,05547	8			

Tabela 22: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a eficiência granulométrica reduzida G'.

Parâmetro	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Prob>F
Modelo	0,104371	3	0,03479	380,2117	< 0,0001
A	0,043914	1	0,043914	479,9177	< 0,0001
B	0,056551	1	0,056551	618,0274	< 0,0001
AB	0,003906	1	0,003906	42,6902	0,0013
Erro puro	0,000458	5	9,15E-05		
Cor Total	0,104828	8			

Tabela 23: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a queda de pressão ΔP.

Parâmetro	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Prob>F
Modelo	1,86E+09	5	3,72E+08	4628,542	< 0,0001
A	1,18E+08	1	1,18E+08	1470,354	< 0,0001
B	1,7E+09	1	1,7E+09	21189,63	< 0,0001
A^2	1891023	1	1891023	23,55182	0,0167
B^2	3973750	1	3973750	49,49123	0,0059
AB	23040000	1	23040000	286,9526	0,0004
Erro puro	240876	3	80292		
Cor Total	1,86E+09	8			

Tabela 24: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a fração volumétrica de óleo na corrente concentrada fvc.

Parâmetro	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Prob>F
Modelo	2,36E-05	5	4,72E-06	288,0389	0,0003
A	1,17E-05	1	1,17E-05	712,8514	0,0001
B	1,14E-05	1	1,14E-05	695,6774	0,0001
A^2	1,16E-07	1	1,16E-07	7,101194	0,0760*
B^2	3,56E-07	1	3,56E-07	21,74741	0,0186
AB	1,6E-07	1	1,6E-07	9,764142	0,0523
Erro puro	4,92E-08	3	1,64E-08		
Cor Total	2,36E-05	8			

*Para este termo adotou-se significância de 10%. Pois deste forma o modelo ficou melhor.

Tabela 25: Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros do modelo de superfície de resposta para a fração volumétrica de óleo na corrente diluída fvd.

Parâmetro	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Prob>F
Modelo	2,82E-06	3	9,39E-07	191,0744	< 0,0001
A	1,2E-06	1	1,2E-06	243,9191	< 0,0001
B	1,53E-06	1	1,53E-06	310,9946	< 0,0001

AB	9E-08	1	9E-08	18,30965	0,0079
Erro puro	2,46E-08	5	4,92E-09		
Cor Total	2,84E-06	8			

Com os dados das tabelas acima, observa-se que todos os modelos e seus termos apresentam significância estatística.

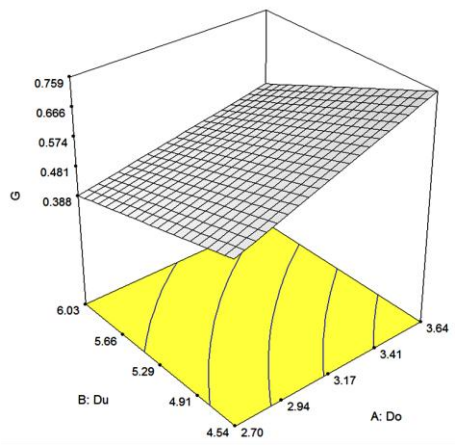
Na Tabela 26 são apresentados os valores dos coeficientes não codificados da Equação 46 para as respostas G, RF, G', ΔP, fvc e fvd.

Tabela 26: Coeficientes da Equação 55 para G, Rf, G', ΔP, fvc e fvd do planejamento de experimentos como função de Do e Du.

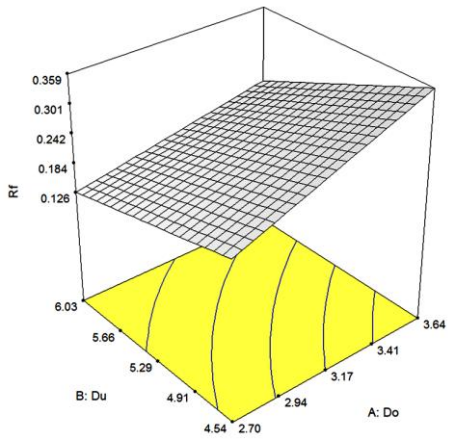
Parâmetros	G	R_f	G'	ΔP (Pa)	fvc	fvd
b_0	-0,53706	-0,55094	-0,95301	349248,3	0,028868	0,00946
b_1	0,560319	0,377982	0,623687	-21223,3	-0,00521	-0,00306
b_2	0,093564	0,074864	0,167589	-63273,5	-0,00325	-0,00076
b_3	-0,07074	-0,04881	-0,08842	-3592,11	0,000891	0,000424
b_4	0	0	0	2100,133	0,000629	0
b_5	0	0	0	6790,691	-0,00057	0
R^2	0,9973	0,9997	0,9956	0,9999	0,9979	0,9914

Na Tabela 26 verificam-se valores de R^2 bem próximos a um, mostrando que os modelos obtidos possuem grande concordância entre os pontos simulados e os previstos com as equações do planejamento experimental.

Os resultados obtidos no planejamento de experimentos para cada uma das respostas, Equação 55 e Tabela 26, são apresentados na Figura 36.



(a)



(b)

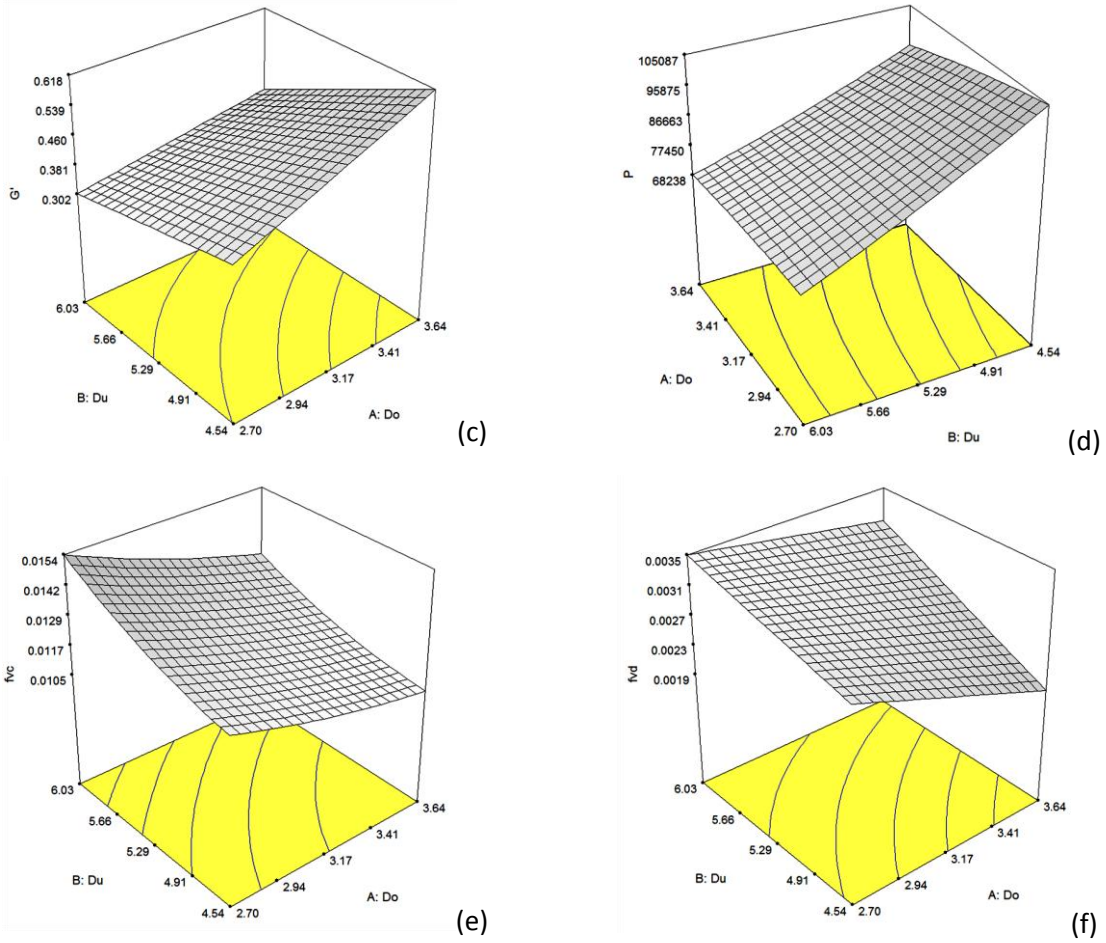


Figura 36: Respostas do planejamento de experimento através da análise das superfícies de respostas com dois fatores. (a) G, (b) R_f, (c) G', (d) ΔP, (e) fvc e (f) fvd.

Na Figura 36 (a) e (b), verifica-se que G e R_f possuem uma dependência direta. Mostrando que, conforme o esperado, quanto maior o diâmetro do concentrado e menor o diâmetro do diluído maiores serão R_f e G.

5.5.1. Hidrociclone Otimizado

A Figura 36 mostra a dificuldade de se definir uma condição ótima de G' através da imposição de restrições a valores da R_f, devido à relação existente entre ambas. Ou seja, uma alta eficiência G' está sempre associada a uma alta razão de fluido R_f e, consequentemente, a uma baixa concentração de óleo no concentrado fvc.

A solução utilizada para resolver o problema da otimização, mencionado acima, foi incluir a fração volumétrica nas saídas concentrada e diluída como resposta do planejamento de experimentos e como função objetivo. Com a Figura 36 (e) e (f) observa-se,

que para a faixa das variáveis estudadas, a concentração do óleo nas saídas superior e inferior são inversamente proporcionais. Na otimização, foram utilizadas, portanto, duas funções objetivo distintas, uma buscando o valor máximo de fvc e outra buscando o valor mínimo de fvd. As restrições utilizadas foram $-1 < D_o < 1$ e $-1 < D_u < 1$, na forma codificada e $2,70 < D_o < 3,64$ e $4,54 < D_u < 6,03$ com os valores reais. Esta faixa foi utilizada para evitar que D_o ou Du assumam distâncias maiores que 0,67 em relação ao ponto central. Pois este é o valor de alfa em variável codificada.

Para as condições mencionadas, as geometrias otimizadas são apresentadas na Tabela 27. Observa-se que os resultados obtidos foram geometrias já presentes no planejamento de experimentos. Na Tabela 28 são apresentados os valores simulados o os valores obtidos com as equações do planejamento.

Tabela 27: Valores dos diâmetros de diluído D_o e concentrado D_u com a otimização do planejamento de experimento com DCCR e utilizando como funções objetivo fvc e fvd.

Função objetivo	fvc	fvd
Alvo	Máximo	Mínimo
D_o	2,70	3,64
D_u	6,03	4,54

Tabela 28: Valores obtidos para as principais variáveis com CFD e com as equações do planejamento de experimentos para gota de óleo com diâmetro de 28 µm.

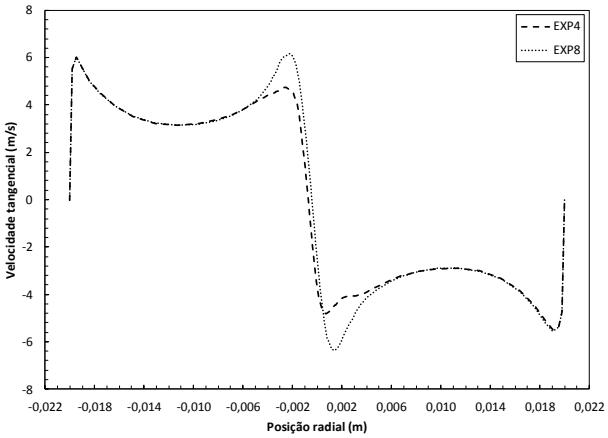
Geometria	**Do**	**Du**	**G**	**R_f**	**G'**	**ΔP (Pa)**	**fvc**	**fvd**
Exp. 4 (CFD)	2,70	6,03	0,391	0,126	0,303	7,10E+04	0,0154	0,0035
Exp. 4 (Planejamento)	2,70	6,03	0,388	0,126	0,302	7,11E+4	0,0153	0,0035
Exp. 8 (CFD)	3,64	4,54	0,756	0,357	0,621	9,24E+04	0,0106	0,0019
Exp. 8 (Planejamento)	3,64	4,54	0,758	0,358	0,617	9,26E+4	0,0106	0,0019

Optou-se, portanto, em se escolher duas geometrias com finalidades distintas. A primeira é a do hidrociclone concentrador de óleo (Exp. 4) e a segunda, do hidrociclone limpador de água (Exp. 8). Como estas duas funções são de interesse da indústria, uma avaliação mais detalhada destas duas geometrias, quanto à eficiência granulométrica reduzida e eficiência total, serão apresentadas no item 5.7.

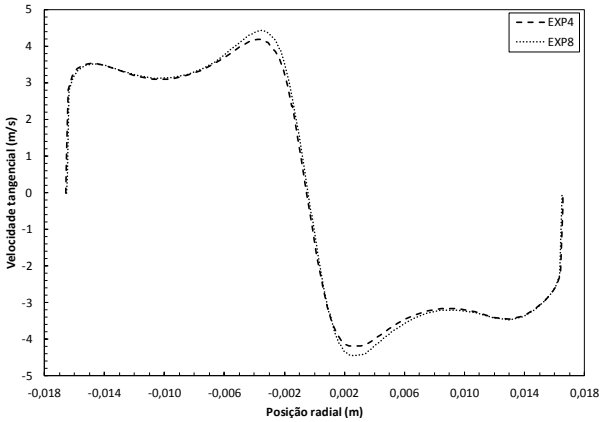
5.6. Velocidades Tangenciais para os Hidrociclones Otimizados

Neste item, serão apresentados apenas os perfis de velocidades tangenciais dos dois hidrociclones otimizados (Exps. 4 e 8). Os demais apresentam perfis intermediários entre estes dois.

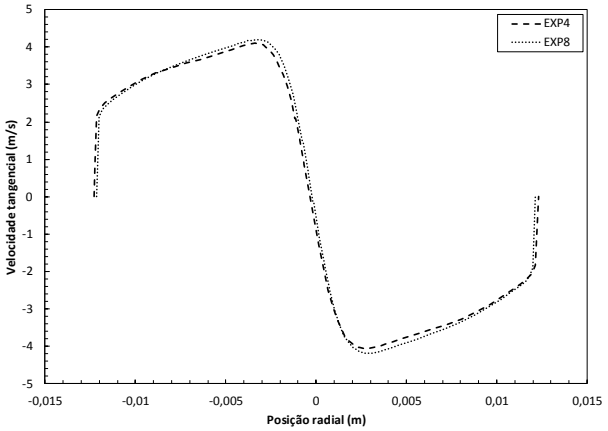
Os resultados de perfis de velocidades tangenciais foram obtidos em algumas alturas dos hidrociclones. Estas posições foram medidas a 17 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm e a 400 mm abaixo do teto do hidrociclone, no plano perpendicular à entrada (Figura 37).



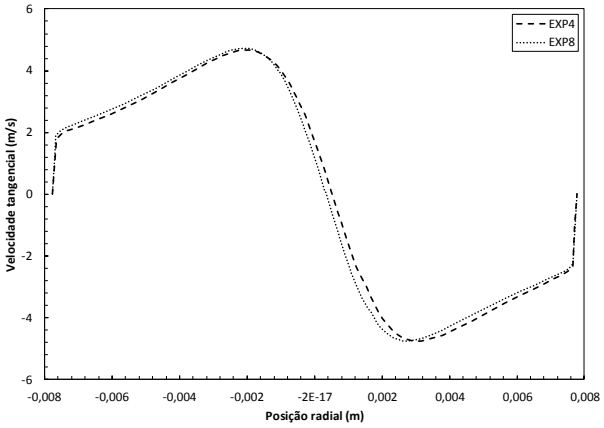
(a)



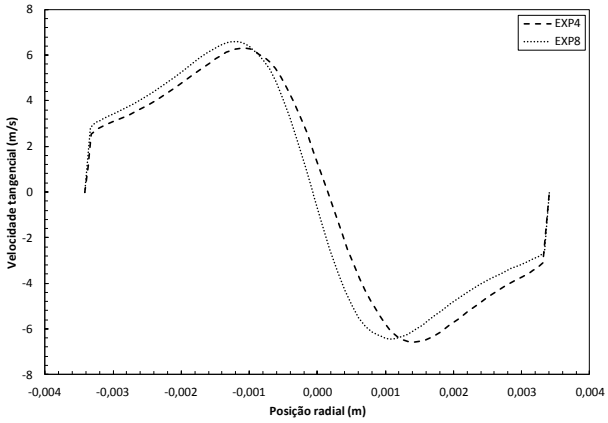
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 37: Comparação entre os perfis de velocidades tangenciais dos hidrociclones dos experimentos 4 e 8, medidos a 17 mm (a), 100 mm (b), 200 mm (c), 300 mm (d) e 400 mm (e) abaixo do teto do hidrociclone.

Verifica-se, nas Figura 37 (a) e (b), uma pequena diferença entre os máximos de velocidade tangencial. Acredita-se que esta diferença possa ser causada pela ação da razão de fluido R_f. Ou seja, quanto maior a razão de fluido maior é o pico de velocidade tangencial na região central. Pode-se perceber também que na região cônica do hidrociclone este efeito não é observado, fazendo com que os perfis sejam praticamente coincidentes. Na última posição medida, a diferença observada se deve, provavelmente, à proximidade do fim da região cônica, sendo influenciada pelo prolongamento do diâmetro do diluído.

5.7. Eficiências para os Hidrociclones Escolhidos no Planejamento de Experimentos

As eficiências aqui obtidas seguiram a mesma metodologia apresentada para os hidrociclones da validação, sendo obtidas alimentando-se os hidrociclones com a distribuição de tamanhos dada pela Equação 1, empregando a abordagem lagrangeana, e alimentando-se com diâmetros individuais, empregando tanto a abordagem lagrangeana quanto a euleriana.

5.7.1. Eficiências Obtidas com a Abordagem Lagrangeana para o Experimento 4

A Figura 38 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com abordagem lagrangeana para a geometria do experimento 4. Nesta figura se obtém também o valor de *n* (Equação 6) igual a 1,5.

A Figura 39 mostra a curva de eficiência granulométrica e a curva de eficiência granulométrica reduzida, de onde se obtém d'_{50} igual a 33 µm.

Para estes hidrociclones também foi observada a má previsão de eficiência gerada com esta abordagem para partículas com diâmetros menores que o d'_{50}.

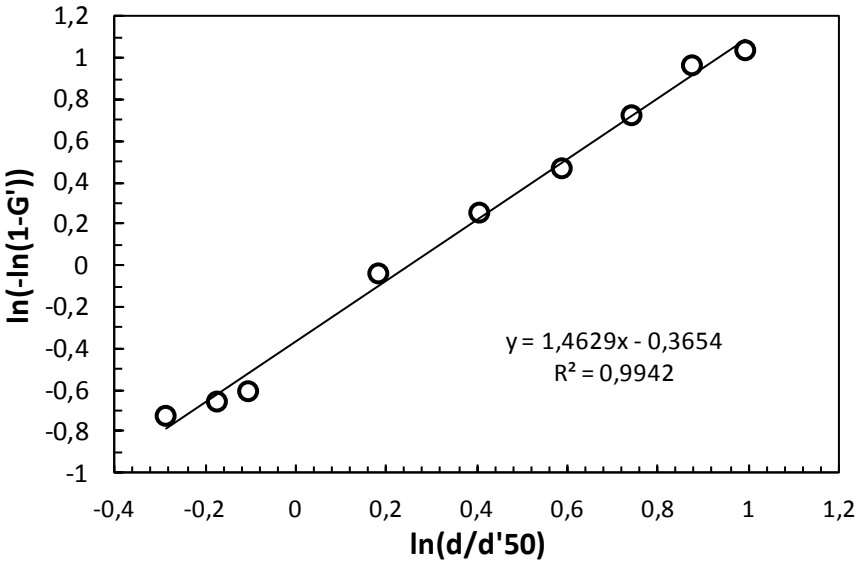
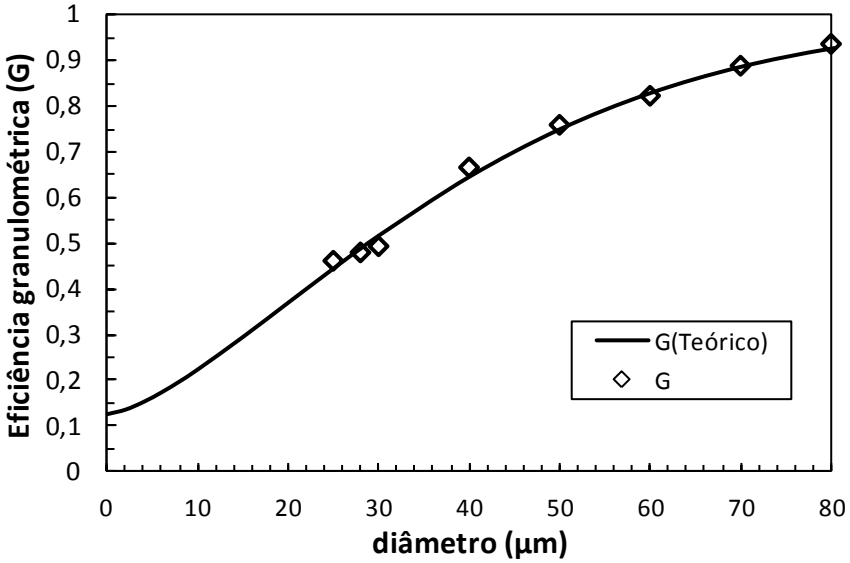


Figura 38: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 4, utilizando a abordagem Lagrangeana.



(a)

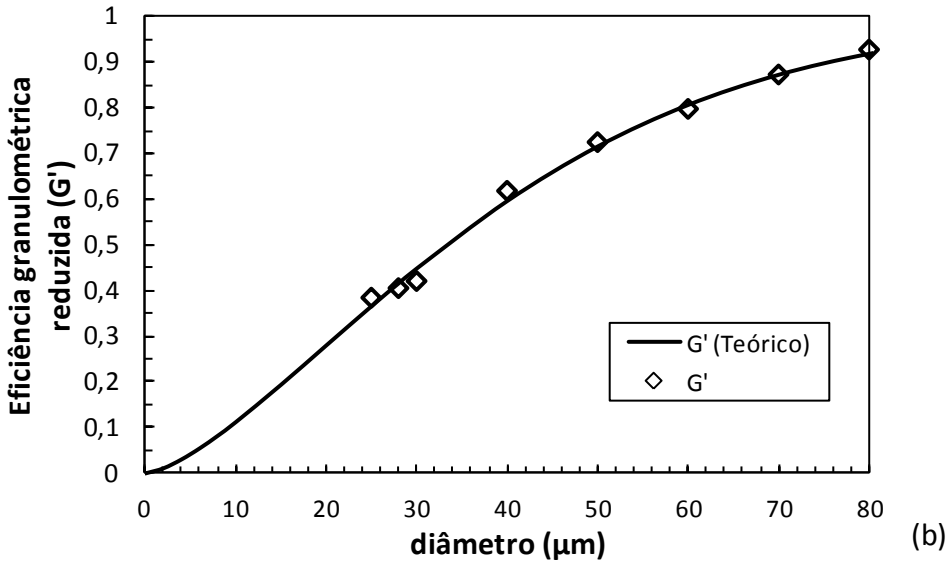


Figura 39: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 4, utilizando a abordagem Lagrangeana.

5.7.2. Eficiências Obtidas com a Abordagem Euleriana para o Experimento 4.

A Figura 40 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com abordagem Euleriana para a geometria do experimento 4. Nesta figura se obtém também o valor de *n* (Equação 6) igual a 2,5.

Na Figura 41, encontra-se a curva de eficiência granulométrica e a curva de eficiência granulométrica reduzida, de onde se pode obter d'_{50} igual a 36 µm.

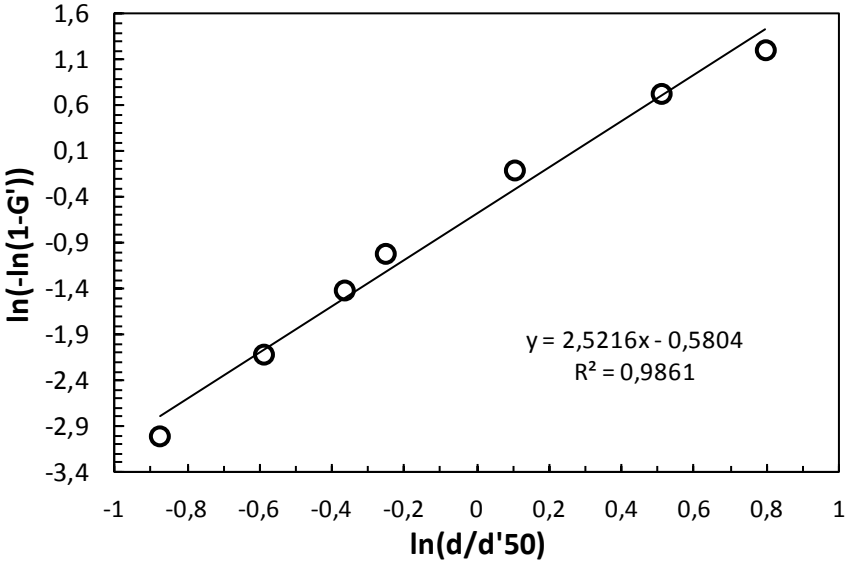


Figura 40: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 4 utilizando a abordagem Euleriana.

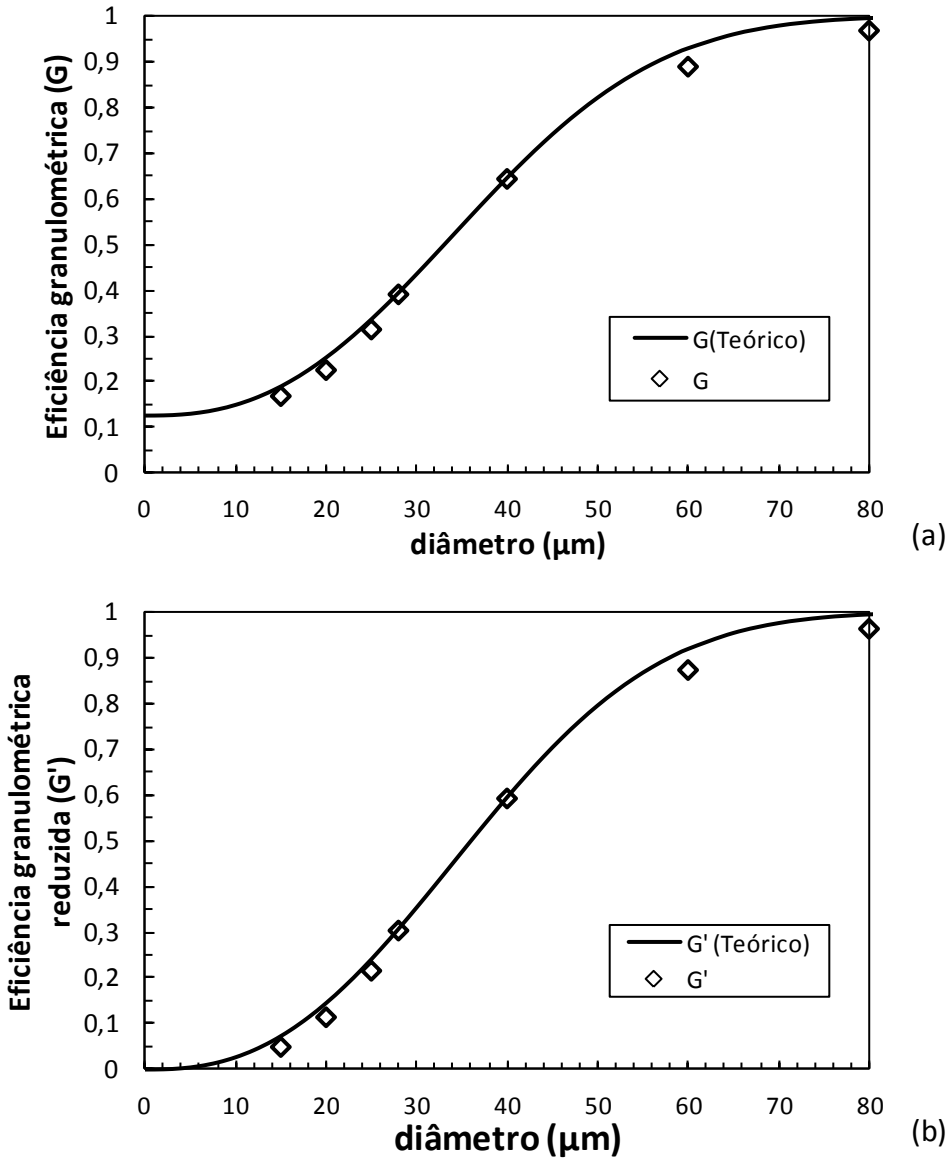


Figura 41: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 4, utilizando a abordagem Euleriana.

5.7.3. Comparação entre as Eficiências Totais Obtidas com a Abordagem Lagrangeana e Euleriana para o Experimento 4.

As mesmas distribuições de tamanho de gotas utilizadas para os cálculos de eficiência empregados nas simulações dos hidrociclones da validação foram também aplicadas para este hidrociclone,Tabela 14. Através destes dados foi possível calcular as eficiências das três distribuições. A eficiência (E_{Ty}), Tabela 30, foi calculada utilizando a primeira metodologia apresentada no item 5.3. Já a eficiência E_{TG} foi obtida utilizando a segunda metodologia do item 5.3 e com os valores de n e d'_{50} apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Parâmetros da curva de eficiência granulométrica reduzida para as abordagens Lagrangeana e Euleriana obtidos com o hidrociclone do experimento 4.

Parâmetros	Langrangeana	Euleriana
n	1,5	2,5
d'_{50}	33,3	36,0

Tabela 30: Eficiências obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas (fina, média e grossa) com o hidrociclone do experimento 4.

Distribuição	**Mediana da distribuição (μm)**	E'_{Ty}	E'_{TG} **(Lagrangeana)**	E'_{TG} **(Euleriana)**
Fina	21	0,150	0,330	0,251
Média	45	0,542	0,619	0,630
Grossa	130	0,955	0,953	0,970

5.7.4. Eficiências Obtidas com a Abordagem Lagrangeana para o Experimento 8

A Figura 42 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com abordagem Lagrangeana para a geometria do experimento 4. Nesta figura se obtém também um valor de *n* igual a 1,4.

A Figura 43 mostra a curva de eficiência granulométrica e a curva de eficiência granulométrica reduzida, onde d'_{50} é igual a 23 μm.

Para estes hidrociclones também foi observada a má previsão de eficiência gerada com esta abordagem para partículas com diâmetros menores que o d'_{50}.

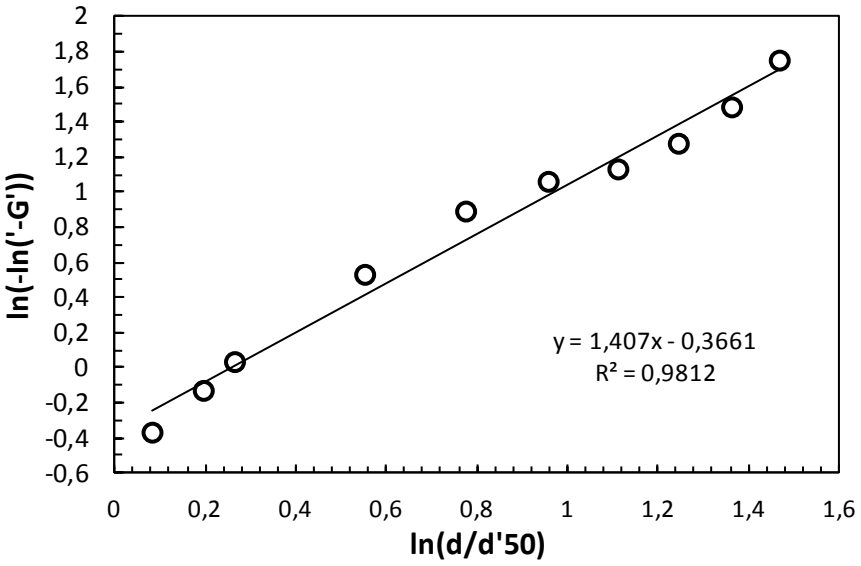
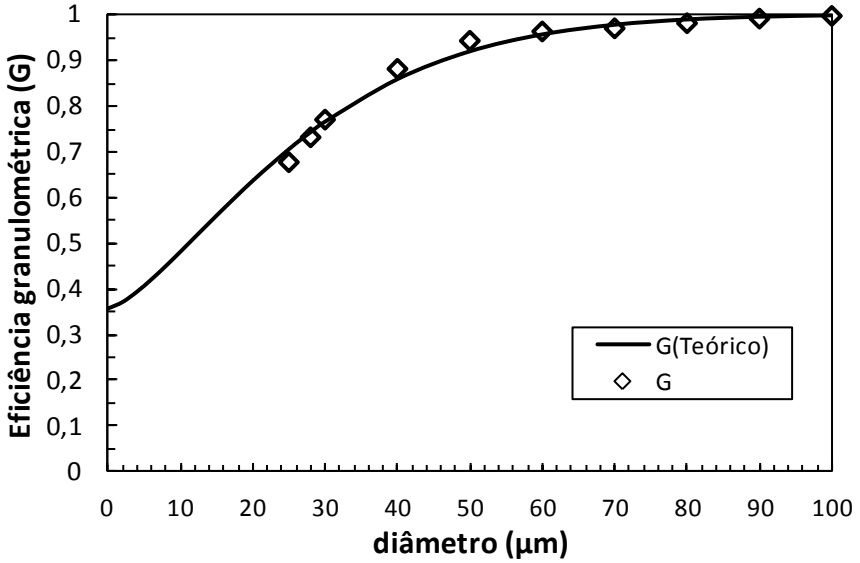


Figura 42: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 8 utilizando a abordagem lagrangeana.



(a)

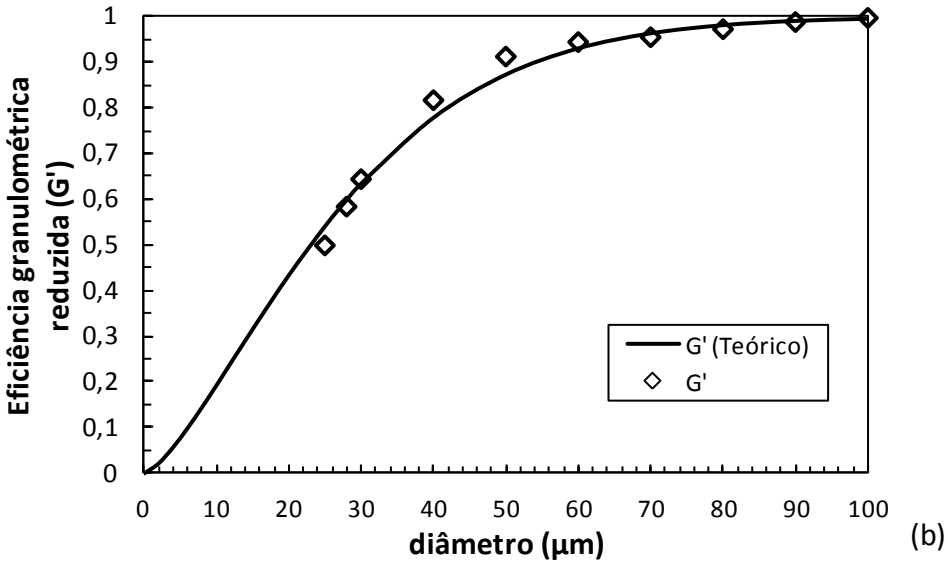


Figura 43: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 8, utilizando a abordagem lagrangeana.

5.7.5. Eficiências Obtidas com a Abordagem Euleriana para o Experimento 8

A Figura 44 apresenta a linearização da equação de eficiência granulométrica reduzida para os diâmetros simulados com abordagem Lagrangeana para a geometria do experimento 4. Nesta figura se obtém também um valor de *n* igual a 2,5.

A Figura 45 mostra a curva de eficiência granulométrica e a curva de eficiência granulométrica reduzida, onde d'_{50} é igual a 24 µm.

Para estes hidrociclones também foi observada a má previsão de eficiência gerada com esta abordagem para partículas com diâmetros menores que o d'_{50}.

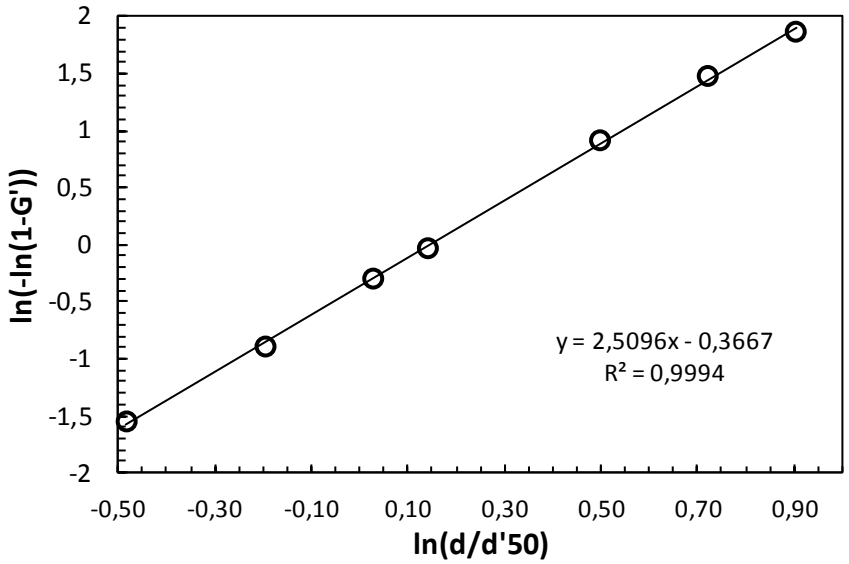
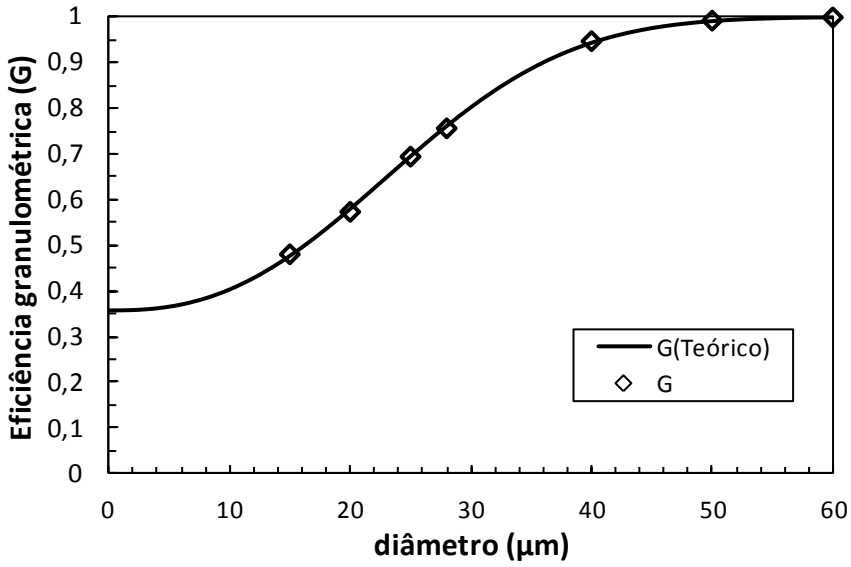


Figura 44: Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida dos dados obtidos com o hidrociclone do experimento 8, utilizando a abordagem euleriana.



(a)

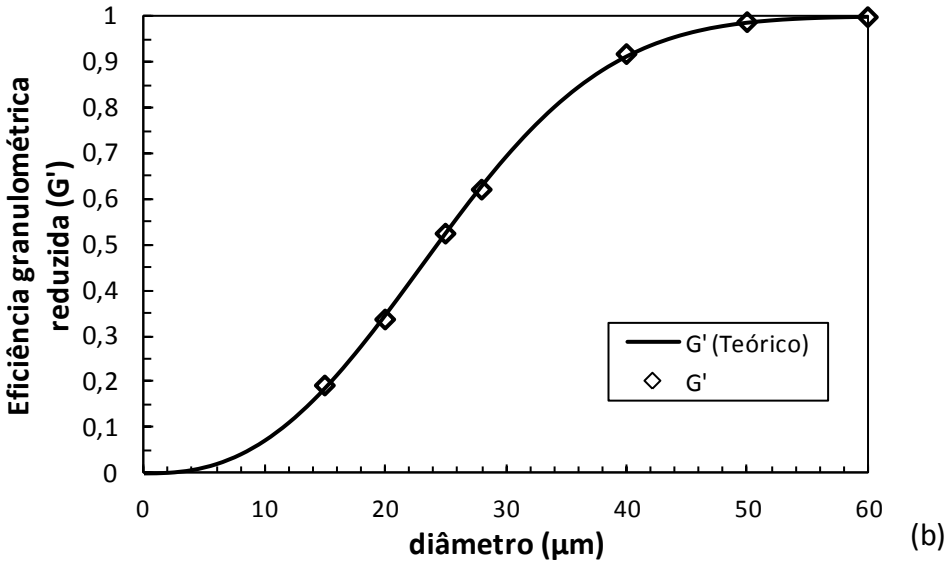


Figura 45: Curva de eficiência granulométrica (a) e a curva de eficiência granulométrica reduzida (b) obtidas com o hidrociclone do experimento 8, utilizando a abordagem euleriana.

5.7.6. Comparação entre as Eficiências Totais Obtidas com a Abordagem Lagrangeana e Euleriana para o Experimento 8.

A eficiência (E_{TG}), Tabela 32, foi calculada utilizando a segunda metodologia apresentada no item 5.3 e com os valores de *n* e d'_{50} apresentados na Tabela 31.

Tabela 31: Parâmetros da curva de eficiência granulométrica reduzida para as abordagens Lagrangeana e Euleriana obtidos com o hidrociclone do experimento 8.

Parâmetros	Langrangeana	Euleriana
n	1,4	2,5
d'50	23	24

Tabela 32: Eficiências obtidas para as três distribuições de tamanhos de gotas (fina, média e grossa) com o hidrociclone do experimento 8.

Distribuição	distribuição (µm)	E'_{Ty}	E'_{TG} (Lagrangeana)	E'_{TG} (Euleriana)
Fina	21	-0,043	0,471	0,454
Média	45	0,583	0,765	0,825
Grossa	130	0,968	0,979	0,989

5.7.7. Comparação entre os Hidrociclones 4 e 8 Obtidos Através da Abordagem Euleriana

Uma avaliação detalhada do desempenho dos hidrociclones dos experimentos 4 e 8 foi apresentada na seção anterior para diferentes tamanhos de partículas e distribuições. Porém, o principal objetivo deste trabalho é obter o hidrociclone que gere a menor concentração na saída diluída (água tratada). Por isso, são apresentadas algumas relações para obtenção das frações volumétricas das correntes de diâmetros (Equações 56 e 57, respectivamente). Estas equações foram obtidas através da substituição das definições de eficiência e razão de fluido nas Equações 12 e 13, respectivamente.

$$f_{vc} = \frac{Q_e E_T}{Q_{fe} R_f + Q_e E_T} \tag{56}$$

$$f_{vd} = \frac{Q_e (1 - E_T)}{Q_{fe}(1 - R_f) + Q_e (1 - E_T)} \tag{57}$$

Onde:

f_{vc}= fração volumétrica de óleo no concentrado;

f_{vd}= fração volumétrica de óleo no diluído;

Q_e= vazão volumétrica de óleo na entrada;

Q_{fe}= vazão volumétrica de água na entrada.

Na Tabela 33, são apresentados os valores eficiência total e da fração volumétrica de óleo nas saídas concentrada e diluída para os dois hidrociclones, utilizando os valores obtidos com a abordagem Euleriana para a distribuição grossa. Com estes resultados, verifica-se que o experimento 8, que fornece a maior eficiência, foi o que apresentou a menor fração de óleo na saída diluída entre todos os experimentos. Apesar desta condição possuir a maior eficiência foi obtida uma menor fração de óleo no concentrado devido à maior R_f.

Tabela 33: Valores de eficiência total e de fração volumétrica de óleo nas saídas concentrada e diluída para os dois hidrociclones, com base nos valores obtidos com a abordagem Euleriana para a distribuição grossa.

Experimento	f_{vc}	f_{vd}	E_T
4	0,0372	149 ppm	0,974
8	0,0137	58 ppm	0,993

Como o sistema em estudo é diluído, é possível considerar que Q_{fe} é muito maior que Q_e. Esta aproximação serve para as demais correntes.

Sendo assim as equações 58 e 59 podem ser simplificadas e relacionadas com a fração de óleo na entrada.

$$f_{vc} = \frac{E_T}{R_f} f_{ve} \tag{58}$$

$$f_{vd} = \frac{(1 - E_T)}{(1 - R_f)} f_{ve} \tag{59}$$

Onde:

f_{ve}= fração volumétrica de óleo na entrada.

Através destas relações fica mais fácil entender como o hidrociclone mais eficiente não é o que gera a corrente mais concentrada, pois um maior R_f gera uma corrente concentrada menos rica em óleo.

5.8. Eficiência dos Hidrociclones Otimizados em Série

Apesar das altas eficiências obtidas com os dois hidrociclones otimizados (Tabela 33), ainda é possível se obter um arranjo de hidrociclones em série que forneça uma maior eficiência.

Segundo Svarovsky (1984), a utilização de hidrociclones combinados em série pode gerar um sistema com maior eficiência. A Equação 60 apresenta a eficiência total reduzida do conjunto de hidrociclones em série.

$$E'_{T(conjunto)} = E'_{T1} - (1 - E'_{T1})E'_{T2} \tag{60}$$

Onde:

$E'_{T(conjunto)}$= eficiência total reduzida do conjunto;

E'_{T1}= eficiência total reduzida do hidrociclone 1;

E'_{T2}= eficiência total reduzida do hidrociclone 2.

É possível obter uma relação semelhante para a razão de fluido do conjunto, conforme apresentado na Equação 61.

$$R_{f(conjunto)} = R_{f1} - \left(1 - R_{f1}\right)R_{f2} \tag{61}$$

Onde:

$R_{f(conjunto)}$= razão de fluido do conjunto;

R_{f1}= razão de fluido do hidrociclone um;

R_{f2}= razão de fluido do hidrociclone dois.

A melhor forma de se arranjar em série estes dois hidrociclones estudados, é tendo primeiro o hidrociclones 4 e depois o 8. Este é a melhor disposição por se ter o primeiro equipamento com maior diâmetro de corte que o segundo. Como já se possui as variáveis de desempenho destes equipamentos, *n e* d'_{50}, é necessário que o hidrociclone 8 tenha a mesma vazão com a qual este foi simulado, uma vez que a vazão altera o diâmetro de corte. Para que isso seja possível é necessário que se utilize 8 hidrociclones 4 em série com 7 hidrociclones 8.

Na Figura 46, é apresentado o arranjo em série dos hidrociclones 4 e 8 do planejamento.

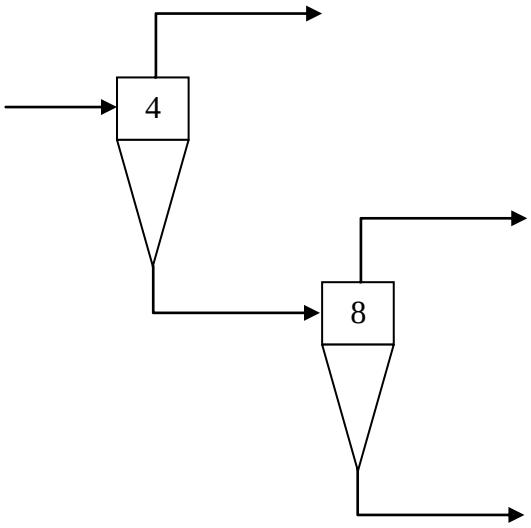


Figura 46: Arranjo em série dos hidrociclones dos experimentos 4 e 8 do planejamento.

Para se conhecer a eficiência total reduzida do conjunto é necessário calcular as eficiências totais reduzidas dos dois hidrociclones. Porém, a E_T do hidrociclone 8 foi obtida com a distribuição completa e agora ele é alimentado pela distribuição residual do hidrociclone 4. Sendo assim, torna-se necessário conhecer a distribuição de partículas que deixa a saída diluída do primeiro hidrociclone.

O processo de obtenção desta nova distribuição é feito da seguinte forma:

- Alimentar o hidrociclone 4 com alguns diâmetros;
- Calcular a fração cumulativa menor que dado tamanho que sai pelo diluído do hidrociclone 4, y_d (Equação 62);
- Calcular os parâmetros k e m (Equação 1) desta nova distribuição;
- Calcular a eficiência total reduzida produzida com o hidrociclone 8, com esta nova distribuição.

O valor da fração cumulativa de partículas menores que dado tamanho que deixa o hidrociclone pela saída diluída foi obtido com a equação abaixo, considerando que o hidrociclone 4 está sendo alimentado pela distribuição grossa (Tabela 14).

$$y_d|_d = \frac{1}{(1 - E'_T)} \int_0^{y_e|_d} (1 - G')dy \qquad (62)$$

Os dados de distribuição das partículas que deixam o hidrociclone 4 pela saída inferior são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34: Fração cumulativa das partículas na alimentação ($y_{e|d}$) e no diluído ($y_{d|d}$) do hidrociclone 4.

d	$y_{e\|d}$	$y_{d\|d}$
5	0,0002	0,0067
10	0,0009	0,0297
15	0,0024	0,0773
20	0,0050	0,1547
27	0,0105	0,2990
47	0,0411	0,7581
67	0,0965	0,9689
87	0,1768	0,9995

Os parâmetros k e m da distribuição de tamanhos do diluído que deixa o hidrociclone 4 foram 41 e 2,4, respectivamente. Com base nestes parâmetros, encontra-se uma eficiência total reduzida para o hidrociclone 8 igual a 0,717.

Na Tabela 35, são apresentados os valores de $E'_{T(8)}$, do $E'_{T\ (conjunto)}$, $R_{f\ (conjunto)}$ e $f_{vd(8)}$ para o arranjo dos dois hidrociclones em série.

Tabela 35: Valores de eficiência granulométrica reduzida do hidrociclone 8 no arranjo em série, eficiência total reduzida do conjunto e fração volumétrica na saída diluída do conjunto.

$E'_{T(8)}$	$E'_{T(conjunto)}$	$R_{f(conjunto)}$	$f_{vd(8)}$
0,717	0,995	0,438	42,7 ppm

Através do resultado obtido para os hidrociclones 4 e 8 com arranjo em série, verificou-se que esta formação possibilita uma corrente diluída com menor teor de óleo, apresentando um melhor desempenho em comparação com o hidrociclone 8 somente.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para os perfis de velocidades tangenciais a partir da simulação numérica representaram bem os dados experimentais de Zhou *et al.* (2010) e de Marins *et al.* (2010), demonstrando que a modelagem empregada é capaz de representar o adequadamente comportamento de hidrociclones.

A simulação transiente demonstrou que o estado estacionário foi atingido em 1,3 s.

As duas formas de obtenção da eficiência total (alimentar-se o hidrociclone com a distribuição de tamanhos ou com vários tamanhos de gotas) mostraram resultados idênticos para distribuições de tamanhos de gotas com medianas superiores ao diâmetro de corte reduzido (d'_{50}). Para distribuições onde esta mediana é inferior a d'_{50}, recomenda-se empregar o segundo método de estimativa da eficiência total, preferencialmente, usando uma abordagem euleriana também para a fase dispersa.

Comparando os hidrociclones da validação verificou-se que os perfis de velocidades tangenciais e de pressões obtidos com o hidrociclone utilizado por Marins *et al.* (2010) é mais estável que o hidrociclone empregado por Zhou e*t al*. (2010). A justificativa para este fenômeno é a simetria proporcionada pela geometria do hidrociclone com duas entradas.

Verifica-se, com o planejamento de experimentos, que com o aumento do R_f, através da mudança nos diâmetros do concentrado e diluído, maior é o pico de velocidade tangencial na parte cilíndrica do hidrociclone, o mesmo não ocorrendo na parte cônica.

Com o planejamento de experimentos, foi possível obter funções das principais características de desempenho do hidrociclone (G, R_f, G', ΔP, fvc e fvd) em função dos diâmetros do diluído e do concentrado. Estas equações mostraram, através da ANOVA, significância estatística.

O hidrociclone obtido com o planejamento (Exp. 8) apresentou alto valor de eficiência total reduzida e baixa concentração de água na saída inferior, como desejado, mostrando que a metodologia aplicada é uma ferramenta eficaz para otimização.

O arranjo em série entre os hidrociclones 4 e 8 apresentou uma eficiência do conjunto de 99,5% e uma diminuição na concentração na saída diluída de 26%, quando comparada com a saída o hidrociclone 8 somente.

7. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

- Avaliar os hidrociclones apresentados, diluidor e concentrador, na planta piloto e comparar com os resultados experimentais com os numéricos;

- Estudar experimentalmente os fenômenos de quebra e coalescência nos hidrociclones do presente trabalho;

-Avaliar os modelos de quebra e coalescência presentes no FLUENT e CFX com os obtidos experimentalmente;

-Caso necessário criar um modelo de quebra e coalescência que relacione estes fenômenos com a ação de cisalhamento e inserir este modelo nos pacotes de CFD, comparando os resultados experimentais e simulados;

- Avaliar a influência do ângulo da região cônica na eficiência, mantendo os níveis de velocidade tangencial para comparação;

- Determinar a faixa ótima de operação destes hidrociclones (vazão crítica);

- Avaliar a influência, na eficiência de separação, do diâmetro da saída superior e do aumento da pressão na saída inferior, usando RQP.

- Aumentar a capacidade destes hidrociclones aumentando o volume do HC e o diâmetro da entrada e avaliar a eficiência;

- Em hidrociclones, medir a distribuição de partículas no concentrado e diluído e comparar com a distribuição da entrada para verificar a ocorrência de aumento e diminuição de diâmetros. Gerando informações para avaliar os efeitos de quebra e coalescência;

- Avaliar a possibilidade de utilizar a distribuição granulométrica como medida de concentração, pois sabendo o número e o diâmetro das gotas pela distribuição e a densidade do óleo é possível calcular o volume, ou massa, de cada gota e com isso relacionar com a quantidade de amostra analisada;

- Simular uma nova condição para o hidrociclone concentrador com $D_o = -\alpha$ e $D_u = \alpha$.

- Simular uma nova condição para o hidrociclone diluidor com $D_o = \alpha$ e $D_u = -\alpha$.

8. BIBLIOGRAFIA

AGUIRRE, J.; DAMIAN, R. **Guidelines on numerical modeling of cyclones an hydrocyclones**. South american ANSYS conference, Rio de Janeiro, 2008.

Ansys 13.0 Help, 2010.

ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R.; PETRI JUNIOR, I. **Utilização de código comercial de CFD para descrição dos campos de velocidades do líquido em hidrociclone para o tratemento de águas oleosas**, 2010. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química.

BAI, Z. S.; WANG, H. L.; TU, S. T. **Experimental study of flow patterns in deoiling hydrocyclone.** Minerals Engineering, v. 22, p. 319-323, 2009.

BELAIDI, A.; THEW, M. T. **The Effect of Oil and Gas Content on the Controllability and Separation in a De-Oiling Hydrocyclone.** Trans IChemE, v. 81, March 2003. ISSN Part A.

BENNETT, M. A.; WILLIAMS, R. A. **Monitoring the operation of an oil-water separator using impedance tomography.** Minerals Engineering, v. 17, p. 605-614, 2004.

BHASKAR, K. U. *et al.* **CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone.** Minerals Engineering, v. 20, p. 60-71, 2007.

BIRD, B. R.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte.** 2ª Edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

BRADLEY, D. **The hydrocyclone**. Londres: Pergamon Press, 1965.

CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A. **Cell retention devices for suspendee-cell perfusion cultures.** Advances in Biochemical Engieering & Biotechnology, v. 74, p. 183-169, 2002.

COELHO, M. A. Z.; MEDRONHO, R. A. **A model for performance prediction of hydrocyclones.** Chemical Engineering Journal, v. 84, p. 7-14, 2001.

D. COLMAN, M. T. D. C. **Hydrocyclones for Oil/Water, Separation.** in Int. Conf. on Hydrocyclones, BHRA, Cambridge, United, Kingdom, paper 11, p. 143-165, 1980.

FIGUEREDO-CARDERO, A. **Filtros de malha rotativa internos e externos como dispositivos de retenção de células animais: Um estudo com o auxílio de velocimetria por imagem de partículas e fluidodinâmica computacional**. Tese de Doutorado - TPQB, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

FONTES, C. E. *et al.* **Introdução à Fluidodinâmica Computacional.** Rio de Janeiro: Escola Piloto Virtual, 2005. UFRJ/COPPE/PEQ.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Comutacionas para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações.** São Paulo: USP, 2000.

FREIRE, A. P. S.; MENUT, P. M. M.; SU, J. **Turbulência.** Rio de Janeiro: ABCM, v. 1, 1998.

FREITAS, A. G. B. **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone**. Dissertação - Universidade Federal de Sergipe, 2009.

GERRARD, A. M.; LIDDLEY, C. J. **How to get the most out of your hydrocyclone systems.** Process Engng, p. 105-107, 1976.

GIBSON, M.; LAUNDER, B. E. **Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer.** J. Fluid Mech, v. 86, p. 491–511, 1978.

HEISKANES, K. **Particle Classification**. London: Chapman & Hall, 1993.

HEYES, W. C.; CARROLL, W. C.; FOTHERGILL, D. W. J. **Hydrocylones for Treating oily water development and field testing in bass strait**. Offshore Technology Conference, 17th Annual OTC in Huston, Texas, May 6-9 1985.

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

HUSVEG, T. *et al.* **Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates**, v. 20, p. 368-379, 2007.

JOCKWER, A. *et al.* **The use of hydrocyclones for mammalian cell retention in perfusion bioreactors**, in: 17 th Meeting of ESACT (European Society for Animal Cell Techology), Animal Cell Technology: From Target to Market. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

KILAVUZ, F. S.; GÜLSOY, Ö. Y. **The effect of cone ratio on the separation efficiency of small diameter hydrocyclones.** International Journal of Mineral Processing, v. 98, p. 163-167, 2011.

KRAIPECH, W.; NOWAKOWSKI, A.; SUKSANGPANOMRUNG, A. **An inverstigation of the effect of the particle-fluid and particle-particle interactions on the flow within a hydrocyclone.** Chemical Engineering Journal, v. 111, p. 189-197, 2005.

LI, J.; GU, Y. **Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds**, v. 42, p. 1-13, 2005.

LÜBBERSTEDT, M.; MEDRONHO, R. A.; ANSPACH, F. B. **Separation of mammalian cells using hycrocyclones**, in: Proceedings of the World Congress on Biotechnology. Berlim: [s.n.], v. 1, 2000. 460-462 p.

LYNCH, A. J. E. R. T. C. **Modellling and scale-up of hydrocyclone classifiers.** Proceedings 11th Int. Mineral Precessing Congress, v. 9, p. 9-25, 1975.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MARINS, L. P. M. *et al.* **LDA and PIV characterization of the flow in a hydrocyclone without an air-core.** Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 70, p. 168-176, 2010.

MEDRONHO, R. A. **Scale-up of hydrocyclones at low feed concentrations**, Inglaterra, 1984. Tese de Ph.D Universidade de Bradford.

MELDRUN, N. **Hydrocyclones: A solution to produced water treatment.** Offshore Technology Conference, Houston, Texas, April 1987.

NOROOZI, S.; HASHEMABADI, S. H. **CFD analysis of inlet chamber body profile effects on de-oilig hydrocyclone efficiency.** Chemical Engineering Research and Design, 2011. doi: 12.1016/j.cherd.2010.11.017.

PLITT, L. R. **The analysis of solid-solid separations in classifiers.** CIM Bulletin, v. 64, p. 42-47, 1971.

PLITT, L. R. **A mathematical model of th hydrocyclone classifier.** CIM-Bulletin, p. 114-123, Dezembro 1976.

REGO, F. C. D. A. **Estudo do hidrociclone cilíndrico de uma unidade de flotação centrícufa com auxílio de fluidodinâmica computacional.**. Dissertação - Universiade Federal do Rio de Janeiro, 2008

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** 2ª Edição. ed. Campinas: Cárita, 2009.

SCHÄFER, M. **Computational Engineering- Intrudoction to Numerical Methods.** Nova York: Spring, 2006.

SCHÜTZ, S.; GORBACH, G.; PIESCHE, M. **Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid–liquid separation in hydrocyclones.** Chemical Engineering Science, v. 64, p. 3935-3952, 2009.

SHOJAEEFARD, M. H. *et al.* **Particle size effects on hydro-cyclone performance**. International Journal of Engineering Science, v. 17, n. 3-4, p. 9-19, 2006.

SILVA, L. F. L. R. **Desenvolvimento de Metodologias para Simulação de Escoamentos Polidispersos**. Tese de Doutorado - PEQ/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, M. A. P. **Hidrociclones de Bradlyes: Dimensionamento e analise de desempenho**, 1989. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVEIRA NETO, A. **Turbulência nos Fluidos Aplicada**, 2003. Disponivel em: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/CFD/bibliografia/turbulencia/curso_Aristeu/apostila-pdf>. Acesso em: 1 dez. 2011.

SPEZIALE, C.; SARKAR, S.; GATSKI, T. **Modelling the Pressure-Strain Correlation of Turbulence: An Invariant Dynamical Systems Approach.** J. Fluid Mech, v. 227, p. 245–27, 1991.

SU, J. **Introdução aos Modelos de Turbulência**, 2007.

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

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. Califórnia: DCW Industries, Inc., 1994.

YOUNG, G. A. B. *et al.* **Oil-water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions**. J. Petrol. Sci. Eng., v. 11, p. 37-50, 1994.

ZHAO, L.; JIANG, M.; LI, F. **Experimental study on the separation performance of air-infected de-oil hydrocyclones.** Chemical Engineering Reserach and Design, n. 88, p. 772-778, 2010.

ZHOU, N. *et al.* **Investigation of velocity Field and oil distribution in an oil-water hydrocyclone usin a particle dynamics analyzer.** Chemical Enginnering Jornal, v. 157, p. 73-79, 2010.