



PROGRAMA EQ-ANP

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



**Uso de CFD na Otimização das Proporções
Geométricas de um Hidrociclone para a
Separação de Dispersões Óleo/Água
Provenientes de Refinarias**

Juliana Teixeira do Nascimento

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Prof. Rodrigo Azevedo dos Reis, D.Sc.**

Setembro de 2008

USO DE CFD NA OTIMIZAÇÃO DAS PROPORÇÕES GEOMÉTRICAS DE UM HIDROCICLONE PARA A SEPARAÇÃO DE DISPERSÕES ÓLEO/ÁGUA PROVENIENTES DE REFINARIAS

Juliana Teixeira do Nascimento

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

Aprovado por:

Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva, D.Sc.

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.

Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Orientado por:

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D

Rodrigo Azevedo dos Reis, D.Sc

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2008

Nascimento, Juliana Teixeira.

Uso de CFD na Otimização das Proporções Geométricas de um Hidrociclone para a Separação de Dispersões Óleo/Água Provenientes de Refinarias/ Juliana Teixeira do Nascimento. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

xi, 50 p.; il.

(Projeto de Final de Curso) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008. Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e Rodrigo Azevedo dos Reis.

1. Hidrociclone. 2. Separação óleo/água. 3. CFD. 4. Projeto de Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D. 6- Rodrigo Azevedo dos Reis, D.Sc.

Dedico à minha mãe, ao meu pai e ao Márcio.

Não se pode fechar os olhos
Não se pode olha pra trás
Sem se aprender alguma coisa pro futuro.
(Legião Urbana)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, aos meus avós, tios, padrinhos, primos, irmãos e à minha família de coração por todo amor e apoio.

Ao Márcio, meu amor e melhor amigo, por tudo que passamos juntos e conseguimos superar. Só a gente sabe como foi difícil.

Ao apoio e ajuda dos meus orientadores, Ricardo Medronho e Rodrigo dos Reis.

À imensa compreensão da minha família e dos meus amigos.

Aos professores amigos que sempre me ajudaram, com muita paciência.

Ao Paint, ao Excel, ao Solver e ao MatLab.

Ao Renato Russo que sempre tem a música certa que eu preciso ouvir.

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

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

USO DE CFD NA OTIMIZAÇÃO DAS PROPORÇÕES GEOMÉTRICAS DE UM HIDROCICLONE PARA A SEPARAÇÃO DE DISPERSÕES ÓLEO/ÁGUA PROVENIENTES DE REFINARIAS

Juliana Teixeira do Nascimento
Setembro, 2008

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Prof. Rodrigo de Azevedo dos Reis, D.Sc.

Em virtude da crescente preocupação mundial com o possível esgotamento dos recursos hídricos disponíveis, é importante otimizar-se o uso da água em refinarias. O tratamento das águas oleosas é uma forma de não só se recuperar o óleo, mas principalmente reutilizar a água tratada. A indústria do petróleo tem grande interesse nessas tecnologias, pois o uso da água é de essencial importância em toda sua cadeia, desde a extração do poço até o refino. O óleo retirado em uma plataforma sofre tratamento primário no próprio local e, ao chegar na refinaria, passa por um tratamento secundário, onde é de fato possível separar o óleo da água. Esta água separada não está própria para reuso ou descarte, visto que ainda é necessário outro tipo de tratamento. Para esta função, podem ser utilizados hidrociclones, que são equipamentos que, apesar de seu tamanho reduzido, apresentam elevadas capacidades e eficiências de separação, sendo esta eficiência grandemente influenciada pela geometria do equipamento. O estudo teórico de hidrociclones, entretanto, é de enorme complexidade, já que envolve escoamento multifásico e turbulento. A Fluidodinâmica Computacional (CFD) utiliza as equações de conservação para descrever numericamente as características de escoamentos complexos. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi buscar a geometria ótima de um hidrociclone para separar misturas óleo/água típicas de refinarias. As variáveis geométricas analisadas foram os diâmetros da entrada e das saídas. Empregou-se CFD para auxiliar na otimização, visto que seria inviável construir o grande número de diferentes geometrias necessárias. A análise foi feita com base nas eficiências granulométricas reduzidas (G') obtidas para uma gota de $25\ \mu\text{m}$, produzidas por um hidrociclone de 10 mm de diâmetro. O hidrociclone otimizado apresentou uma G' estimada de 54,4% para este tamanho de gota e seus diâmetros de entrada, saída concentrada em óleo (*overflow*) e saída de água tratada (*underflow*) foram 1,5 mm, 2,0 mm e 2,6 mm, respectivamente.

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

EMPLOYING CFD FOR OPTIMIZING HYDROCYCLONE GEOMETRY FOR THE SEPARATION OF OIL-WATER DISPERSIONS FROM OIL REFINERIES

Juliana Teixeira do Nascimento
September, 2008

Supervisors: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D
Prof. Rodrigo de Azevedo dos Reis, D.Sc.

Due to the increasing world concerned about a possible collapse of fresh water resources, it is very important to optimize the water usage in refineries. The oily water treatment represents not only a way of recovering the oil, but more important it allows for the treated water reuse. In the petroleum industry, water is most important in all kinds of processes, indifferent if they regard to oil extraction or oil refining activities. The oil extracted in a platform suffers a primary treatment there and after that it is transferred to a refinery where it receives a secondary treatment to remove the water presenting in this oil. This water can not be reused or discarded before being processed for oil removal. Hydrocyclones can be used for this purpose since they are high efficient devices and can give high capacities, despite their small size. The efficiency they give is greatly influenced by their size and geometrical proportions. A theoretical study of hydrocyclones, however, is of an enormous complexity, since it involves multiphase flow and turbulence. Computational Fluid Dynamics (CFD) uses the conservation equations to numerically describe the characteristics of complex flows. Thus, the objective of this work was to optimize hydrocyclone geometry for the separation of oil/water mixtures typically found in refineries. The studied variables were the feed and exits diameters. CFD was applied to generate computational results for optimization, since it would be impracticable to build the large number of different geometries needed. The analysis was based on reduced grade efficiencies (G') obtained for a drop size of 25 μm , produced by a hydrocyclone of 10 mm diameter. The optimized hydrocyclone presented feed, overflow and underflow diameters of 1.5 mm, 2.0 mm, and 2.6 mm, respectively, and an estimated G' of 54.4% for a drop size of 25 μm .

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Motivação	1
1.2.	Objetivo	3
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1.	Hidrociclones	5
I.	Grupos Adimensionais Aplicados a Hidrociclones	10
2.2.	Turbulência	10
2.3.	Fluidodinâmica Computacional (CFD)	12
II.	Etapas de uma Simulação Fluidodinâmica	13
III.	Discretização	16
IV.	Método dos Volumes Finitos	17
V.	Metodologias de Solução	21
3.	MODELAGEM MATEMÁTICA	22
3.1.	Equação de Conservação	22
3.2.	Considerações Feitas	23
4.	OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO HIDROCICLONE	26
5.	SIMULAÇÕES	28
5.1.	Geração da Geometria Base	28
5.2.	Geração e Seleção das Malhas	28
5.3.	Otimização da Geometria do Hidrociclone	30
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.1.	Geração da Geometria Base	32
6.2.	Geração e Seleção das Malhas	32
6.3.	Geração das Geometrias para Otimização do Hidrociclone	39
6.4.	Validação de Resultados	41
6.5.	Otimização da Geometria do Hidrociclone	44
7.	CONCLUSÕES	51
7.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-I – Esquema de um processo de separação em refinarias utilizando um hidrociclone	3
Figura 1.1-II – Hidrociclone base utilizado para o estudo	4
Figura 2.1-I – Diagrama esquemático de um hidrociclone convencional	7
Figura 2.1-II - Distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone (Svarovsky, 2000)	8
Figura 2.1-III - Esquema do fluxo radial e axial no interior do hidrociclone (Capela, 1994)	8
Figura III-I - Técnicas de geração de malha	17
Figura IV-I – Organização da malha	18
Figura IV-II - Representação do domínio (Barreira et al., 2003)	19
Figura IV-III - Estrutura básica de uma malha unidimensional de volumes finitos	20
Figura 5.1-I - Dimensões do hidrociclone base	28
Figura 5.2-I – Gráfico representativo de um teste de malha	29
Figura 5.2-II - Superfícies que possuem “inflation”	30
Figura 6.1-I – Geometria do hidrociclone utilizado no teste de malha	32
Figura 6.2-I - Malha gerada para os testes 1 e 9, respectivamente	33
Figura 6.2-II - Corte da malha na parte cilíndrica do hidrociclone	34
Figura 6.2-III - Corte da malha na parte cilíndrica do hidrociclone, com detalhe para o “inflation”	35
Figura 6.2-IV - Malha vista da parte interna do hidrociclone a partir de um corte realizado em relação a sua altura	36
Figura 6.2-V - Malha vista na entrada do hidrociclone	37
Figura 6.2-VI - Gráfico com a relação entre o raio do hidrociclone e a velocidade tangencial para cada malha utilizada	38
Figura 6.3-I - Geometrias geradas para otimização	40
Figura 6.4-I - Linhas de corrente no interior do equipamento	41
Figura 6.4-II - Detalhe do vórtice formado no centro do hidrociclone	41
Figura 6.4-III - Perfil da velocidade da água, com destaque para núcleo central	42
Figura 6.4-IV - Perfil de pressão no hidrociclone	42
Figura 6.4-V - Fração volumétrica do óleo e da água, respectivamente, em um plano traçado no centro do hidrociclone	43
Figura 6.5-I: Relação entre G' obtido e previsto.	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1-1 – Dimensões de hidrociclones de diferentes famílias	9
Tabela 3.1-1 - Significado dos termos da equação de conservação	22
Tabela 3.1-2 - Expressão associada às variáveis pertencentes à equação diferencial	23
Tabela 5.2-1 - Parâmetros e condições utilizados nas simulações	29
Tabela 5.2-2 - Parâmetros utilizados nas simulações do teste de malha	30
Tabela 5.3-1 - Características das geometrias utilizadas para a otimização	31
Tabela 6.2-1 - Número de volumes de controle gerados para cada teste	33
Tabela 6.5-1: Resultados de G' e R_f para cada experimento	44

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

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

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

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

Uma das técnicas utilizadas para promover a separação água-óleo nas refinarias é a decantação, na qual a separação se dá pela diferença de densidade entre os fluidos envolvidos. Por se tratar de um processo simples e puramente físico, é o mais utilizado, porém apresenta desvantagens, como a necessidade de grandes equipamentos para uma separação eficiente e um elevado tempo de residência. Em alguns casos, após esses extensos períodos, não há a separação completa das fases, pois a força da gravidade não é suficiente para separar o óleo da água e para remover os sólidos no intervalo de tempo permitido pelo processo (Hashmi et al., 2004). Além disso, muitas vezes há a necessidade de aquecer o sistema para melhorar a separação, consumindo maior quantidade de energia e promovendo a geração de CO₂.

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

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

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

No Brasil, uma refinaria de grande porte consome 1.400 m³/h de água e a produção é de 0,4 e 1,60 m³ efluente/m³ de óleo refinado na planta. A maioria das operações de refino utiliza grande quantidade de água de processo, vapor ou água de resfriamento. A principal função da água em refinarias é a de resfriamento e, após retirar calor das correntes de óleo e de derivados, é resfriada nas torres de resfriamento, formando um circuito fechado. O uso de circuitos fechados pode reduzir a quantidade de água captada em mais de 90%, reduzindo a quantidade de efluentes produzidos (Mariano, 2005).

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

Em relação ao descarte da água residual, agências internacionais de controle de poluição de águas prevêm limites de concentração para descarte desta no mar. A título de exemplo, pode-se destacar o Departamento de Energia do Reino Unido que permite concentrações mensais máximas de óleo na água de descarte de 40 mg/L. No Brasil este limite é de 29 mg/L (Resolução CONAMA No. 393, de 08 de agosto de 2007).

Visto isso, torna-se evidente que é de grande interesse da indústria do petróleo o estudo de novas técnicas e/ou equipamentos que possam promover a separação água-óleo de maneira mais eficiente, para que a água possa ser reaproveitada. Um equipamento muito utilizado para este tipo de separação é o hidrociclone. A Figura 1.1-I

esquematisa este processo de separação em refinarias e mostra um exemplo de onde o hidrociclone poderia ser inserido.

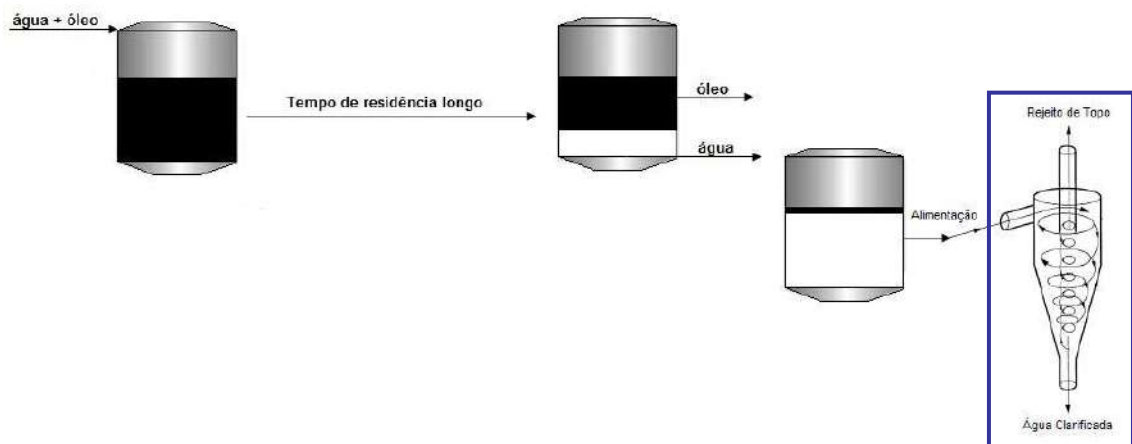


Figura 1.1-I – Esquema de um processo de separação em refinarias utilizando um hidrociclone

Hidrociclones são equipamentos que usam campos centrífugos para promover a separação. Esses equipamentos podem produzir eficiências elevadas com pequenos tempos de residência e ocupando uma pequena área, podendo ser utilizada inclusive uma bateria de hidrociclones para aumentar a eficiência de separação.

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

Os hidrociclones apresentam grandes vantagens em relação a outros equipamentos de separação. Dentre elas, pode-se destacar a grande versatilidade em aplicações; o baixo custo de fabricação, instalação e manutenção; ausência de partes móveis; seu tamanho reduzido em relação a outros separadores; geração de fortes tensões cisalhantes no escoamento; elevadas capacidades; e simplicidade de operação. (Svarovsky, 1990)

1.2. Objetivo

O objetivo desse trabalho é otimizar a geometria de um hidrociclone projetado para a separação de águas oleosas de correntes típicas de refinarias. A otimização será realizada com base na análise da eficiência granulométrica reduzida produzida para cada variação na geometria do equipamento.

O estudo foi realizado através de simulações com fluidodinâmica computacional (CFD) do escoamento da mistura óleo/água em dado hidrociclone, com o uso do CFX da Ansys, na versão 11.0.

Técnicas de CFD são primordiais para este tipo de estudo, pois demandaria muito trabalho experimental e seria muito custoso construir o grande número de geometrias que seria necessário para a conclusão do mesmo.

O hidrociclone utilizado como base para o estudo pode ser visto na Figura 1.2-I.



Figura 1.2-I – Hidrociclone base utilizado para o estudo (Capela, 1994)

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Hidrociclones

O hidrociclone é um separador estático baseado na diferença de densidades dos fluidos envolvidos. Ele é, em geral, composto por duas partes, sendo uma cônica e a outra cilíndrica. A operação consiste essencialmente em se alimentar uma mistura, sob pressão, tangencialmente à câmara cilíndrica. Cria-se então um escoamento espiralado no interior do hidrociclone, com fluido descendo por sua parede externa (vórtice externo) e subindo ao longo do seu eixo de simetria (vórtice interno). (Svarovsky, 1990)

Diferentemente das centrífugas, hidrociclones não têm partes móveis e o vórtice necessário é produzido pelo bombeamento do fluido tangencialmente ao corpo cone-cilíndrico estacionário. Se partículas ou gotículas entram no hidrociclone com o escoamento e sendo sua densidade diferente daquela do líquido, elas serão separadas devido à ação centrífuga gerada pelo fluido em rotação. Nesse trabalho, as gotículas de óleo são menos densas que a água e, portanto, movem-se radialmente em direção ao centro do hidrociclone.

O líquido entra no hidrociclone através de uma entrada de seção reta circular ou retangular localizada tão próxima da cobertura superior quanto possível. Na entrada, o jato turbulento de suspensão penetra no vórtice existente dentro da seção cilíndrica e a intensa mistura resultante tende a dispersar as partículas por toda a área da seção reta disponível para o escoamento.

Exceto pela região próxima ao duto de entrada tangencial, o movimento do fluido dentro do hidrociclone apresenta, em média, simetria circular. A força centrífuga gerada pelo vórtice externo atua nas partículas de maior tamanho e densidade, transportando-as de encontro à parede do hidrociclone, num movimento em espiral descendente adentrando na seção cônica. Nesta seção, as partículas maiores e mais densas permanecem em seu caminho espiral descendente, saindo pelo orifício inferior (*underflow*). As partículas de menor tamanho e densidade são carreadas para o centro, num escoamento em espiral ascendente, abandonando o equipamento pelo orifício superior (*overflow*) (Nezhati et al, 1987).

A velocidade de sedimentação depende fortemente do tamanho de partícula sendo que as grandes serão separadas mais rapidamente que as partículas finas, que podem não atingir a camada-limite até que o vórtice externo atinja o fundo do cone. Esta é a razão principal para a alta dependência do desempenho de um hidrociclone em relação ao tamanho de partícula, como mostra a equação de Stokes que será mostrada no próximo item.

Os perfis de velocidade são bastante agudos no escoamento, causando fortes tensões cisalhantes que tendem a quebrar quaisquer flocos, aglomerados ou gotículas presentes. A descarga das partículas separadas no orifício de *underflow* é devida ao próprio escoamento, que dirige a camada de partículas para baixo rumo ao ápice do cone. O efeito da gravidade é normalmente insignificante, podendo-se operar hidrociclones inclinados ou mesmo invertidos.

Observa-se que o comportamento hidrodinâmico no interior de hidrociclones é bastante complexo, incluindo características como alta preservação de vorticidade, fenômenos de “quebra de vórtices” (*vortex breakdown*) e escoamento inverso.

Em relação às suas dimensões, os diâmetros dos hidrociclones podem variar enormemente, sendo comum encontrar equipamentos na faixa de 10 mm a 2,5 m, os diâmetros de corte para sólidos de 2 a 250 μm e as capacidades individuais das unidades variam entre 0,1 e 7200 m^3/h .

As quedas de pressão variam de 0,34 a 6 bar, sendo que as unidades menores geralmente operam a quedas de pressão mais altas que as grandes. As concentrações de sólidos no *underflow* raramente excedem 45 a 50% em volume, dependendo do tamanho e projeto da unidade, condições de operação e a natureza dos sólidos.

A Figura 2.1-I mostra o diagrama esquemático de um hidrociclone convencional.

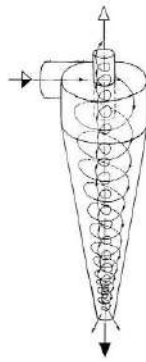


Figura 2.1-I – Diagrama esquemático de um hidrociclone convencional (Pinto et al, 2007)

No topo da seção cilíndrica há um escoamento secundário que se move ao longo da cobertura superior até a base do *vortex finder* e ao longo da parede externa do tubo até juntar-se ao resto do fluido no *overflow*. Este escoamento secundário é devido à presença da cobertura do hidrociclone e da parede externa do *vortex finder*, a qual reduz a velocidade de rotação na região próxima e, portanto, cria áreas de menor resistência ao escoamento das regiões externas de maior pressão para as regiões internas de menor pressão.

Outra característica importante do escoamento no hidrociclone é a formação do núcleo central de ar. O escoamento turbilhonar intenso cria uma área de baixa pressão no centro que normalmente resulta na formação de uma superfície líquida rotativa livre, de forma aproximadamente cilíndrica que ocorre em todo o comprimento do hidrociclone. Se uma ou ambas as saídas estiverem conectadas diretamente com a atmosfera, o núcleo será preenchido com ar (*air core*). Quaisquer gases dispersos ou dissolvidos no fluido alimentado também serão conduzidos a este núcleo central que pode existir mesmo quando as saídas não estiverem conectadas com a atmosfera. Este núcleo pode ser suprimido aplicando-se uma contrapressão.

Devido ao escoamento turbilhonar nos hidrociclones, a pressão estática aumenta radialmente. Este efeito é determinado pela distribuição da velocidade tangencial no escoamento e constitui a maior contribuição à queda total de pressão através de um hidrociclone em operação. Como consequência, as distribuições de velocidade tangencial podem ser estimadas através de medidas simples de pressão estática radial. A velocidade tangencial cresce com a redução do raio até um certo ponto, abaixo do qual diminui e é proporcional ao raio. A Figura 2.1-II mostra a distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone.

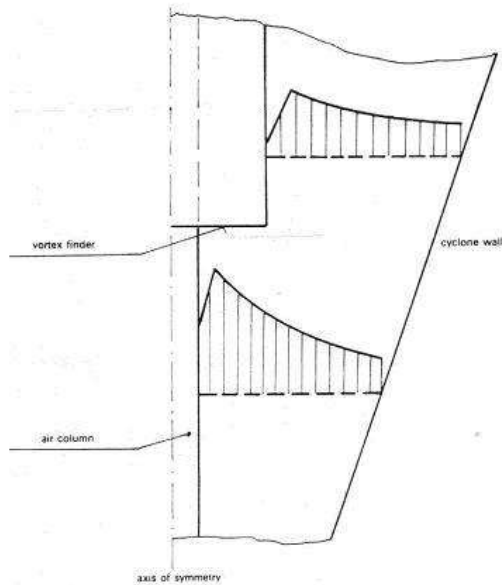


Figura 2.1-II - Distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone (Svarovsky, 2000)

A Figura 2.1-III mostra um esquema do fluxo radial e axial no interior de um hidrociclone. Pelo esquema é possível notar que parte do fluido que entra no hidrociclone entra pelo *vortex finder* e deixa o equipamento, sem que haja separação. Além disso, há uma zona de recirculação na região próxima à entrada do hidrociclone.



Figura 2.1-III - Esquema do fluxo radial e axial no interior do hidrociclone (Capela, 1994)

Escoamentos rotativos compõem um problema clássico em mecânica dos fluidos e podem ser analisados com as equações de Navier-Stokes. Entretanto, para o caso

particular de hidrociclones, há grandes dificuldades tais como as múltiplas fases do escoamento: líquido, ar e partículas sólidas (cada tamanho ou densidade de partícula representa uma fase adicional).

Esse tipo de escoamento pode ser altamente turbulento e anisotrópico, ou seja, as intensidades turbulentas são diferentes em cada direção coordenada. A rotação também causa uma redução na transferência líquida de energia das grandes estruturas turbilhonares para as menores. Este efeito, por sua vez, provoca a redução da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta e aumenta as dimensões das escalas, especialmente ao longo do eixo de rotação (Lauder, 1989).

Ao longo dos anos, as equações de Navier-Stokes gradualmente foram inseridas nos modelos, mas ainda sob hipóteses muito simplificadoras devido principalmente à limitação de recursos computacionais. Porém, na década de 90, com o avanço significativo na capacidade de processamento computacional, nos algoritmos para a solução de equações diferenciais parciais e nos modelos para a representação da fase dispersa, trabalhos mais elaborados foram apresentados (Capela, 1994).

Como dito anteriormente, há uma relação direta entre a eficiência de separação e as dimensões do hidrociclone utilizado. A Tabela 2.1-1 mostra exemplos de dimensões de hidrociclones para diferentes famílias.

Tabela 2.1-1 – Dimensões de hidrociclones de diferentes famílias

Família de Hidrociclone	D_c (m)	Proporções Geométricas				
		D_f/D_c	D_o/D_c	D_i/D_c	L/D_c	θ
Rietema	0,075	0,28	0,34	0,4	5	20°
Bradley	0,038	0,133	0,2	0,33	6,85	9°
Mosley	0,022	0,154	0,214	0,57	7,43	6°
Mosley	0,044	0,16	0,25	0,57	7,71	6°
Warman	0,076	0,29	0,2	0,31	4	15°
Hi-Klone	0,097	0,175	0,25	0,92	5,6	10°
RW 2515	0,125	0,2	0,32	0,8	6,24	15°
Demco	0,051	0,217	0,5	1	4,7	25°
Demco	0,102	0,244	0,313	0,833	3,9	20°

Para este trabalho, escolheu-se a família Bradley, pois é amplamente utilizada para este tipo de separação água/óleo.

I. Grupos Adimensionais Aplicados a Hidrociclones

Como visto, o escoamento em um hidrociclone se dá em todas as direções possíveis (radial, axial e angular). Teoricamente, esse fenômeno pode ser descrito pelas equações da Continuidade e do Movimento. Entretanto, do ponto de vista matemático, a resolução exata dessas equações é altamente complexa e ainda desconhecida.

Grande parte dos estudos feitos com hidrociclones fundamenta-se nos grupos adimensionais relevantes ao fenômeno. Os mais importantes são os números de Stokes (Stk₅₀), Euler (Eu) e Reynolds (Re) que estão, respectivamente, relacionados com o poder de classificação, com os custos energéticos e com o tipo de escoamento. A obtenção de tais grupos adimensionais é feita através do teorema π de Buckingham (BIRD et al., 1961), cujas expressões são descritas a seguir.

$$\text{Stk}_{50} = \frac{(\rho_s - \rho)u_c d_{50}^3}{18\mu D_c}$$

$$\text{Eu} = \frac{2(-\Delta P)}{\rho u_c^2}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho D_c u_c}{\mu}$$

Na prática, os números de Stokes, Euler e Reynolds são correlacionados entre si de acordo com a influência que desempenham no processo de separação, podendo associá-los também à concentração volumétrica de sólidos (Cv) e à razão de líquido (Silva e Medronho, 1988).

2.2. Turbulência

Em um hidrociclone, a turbulência é inerente ao escoamento, já que a existência de duas saídas e a alimentação tangencial ao corpo do hidrociclone produz movimento rotacional do fluido, que é limitado em praticamente todas as direções por paredes, principais causadoras de turbulência (Averous e Fuentes, 1997).

A correta modelagem do escoamento próximo à parede é importante para a fidelidade dos resultados, pois nesta região os gradientes de velocidade são elevados. Para que os resultados da simulação sejam os mais próximos possíveis da realidade e gerem valores corretos de velocidades, concentrações e eficiências de separação, é de extrema importância a correta modelagem da turbulência existente no processo.

Turbulência consiste de flutuações nas propriedades do escoamento, como viscosidade, a velocidade e a pressão, ao longo do tempo e espaço (Deissler, 1998). A seguir são listadas algumas características importantes dos escoamentos turbulentos (Hinze, 1959):

- Altos números de Reynolds;
- Altamente irregulares: as flutuações turbulentas são aparentemente randômicas, sem que haja um perfil determinável das propriedades turbulentas ao longo do escoamento;
- Tridimensionais: as flutuações turbulentas se dão em todas as direções do escoamento, na maioria das vezes de forma anisotrópica;
- Alto grau de vorticidade: o escoamento turbulento é caracterizado pela intensa presença de turbilhões, que se formam e se dissipam continuamente;
- Comportamento dissipativo: a energia perdida é convertida irreversivelmente a energia interna do fluido;
- Estrutura coerente: eventos repetitivos e determinísticos são responsáveis pelo alto grau de mistura presente no escoamento.

Em princípio, as equações de Navier-Stokes descrevem escoamentos laminares e turbulentos sem a necessidade de informações adicionais. Porém, escoamentos turbulentos reais têm uma larga faixa de escalas de tempo e de comprimento de turbulência. Para a simulação efetiva da turbulência são necessárias escalas de comprimento muito menores que o menor elemento passível de resolução numérica, impossibilitando a resolução numérica desses escoamentos. Por essa razão são então adicionados, às equações de Navier-Stokes, modelos de turbulência. (Hargreaves e Silvester, 1990)

2.3. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma área de grande interesse para a solução de muitos problemas práticos, como nas áreas da aerodinâmica, termodinâmica, hidráulica, dentre outros.

Para um problema típico de hidrodinâmica, um modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. Estas equações, quando submetidas a condições de contorno apropriadas, representam, matematicamente, um problema particular. A solução analítica destas equações somente é possível para escoamentos muito simples. Para se analisar problemas reais, lança-se mão do uso dos chamados métodos numéricos, através de técnicas de CFD.

Nos casos de escoamentos laminares, os modelos são relativamente simples, pois as equações de Navier-Stokes, conservação da massa e conservação de energia podem ser resolvidas. Contudo, como a maioria dos escoamentos que acontecem na natureza e no meio industrial são turbulentos, estes têm um alto grau de complexidade e, portanto, deve-se lançar mão de modelos matemáticos de turbulência. A turbulência ainda é um grande desafio para os pesquisadores, pois os escoamentos turbulentos são instáveis e contém flutuações que são dependentes do tempo e do espaço.

Dentre as características mais importantes dos escoamentos turbulentos, destaca-se a multiplicidade de escalas que os caracterizam, desde as maiores estruturas, controladas pela geometria que as geram, até as menores estruturas as quais são controladas pela viscosidade do fluido, além de serem altamente rotacionais.

Devido a esta complexidade, os pesquisadores lançam mão de ferramentas estatísticas para análise dos mesmos. No entanto, as médias estatísticas não permitem o acesso às mais importantes informações dos mecanismos físicos dos escoamentos, especialmente no que concerne às instabilidades.

No entanto, deve-se ter em mente que as simulações não são 100% realistas, visto que há uma série de erros em uma simulação que desviam o resultado numérico do exato. Dentre esses erros, pode-se citar:

- Erros de modelagem (simplificação de modelos, aproximações de condições de contorno ou uso de modelos impróprios para representar o fenômeno físico);
- Erros de arredondamento (operações matemáticas que formam dízimas periódicas ou números reais com casas decimais infinitas necessitam ser arredondados, podendo gerar erros de arredondamento);
- Erros de convergência (associados à diferença entre o valor obtido e o real); e
- Erros de discretização (associados à malha computacional utilizada).

II. Etapas de uma Simulação Fluidodinâmica

Primeiramente, faz-se um estudo dos fenômenos naturais envolvidos no processo em questão e, a partir daí, descrevem-se modelos físicos que regem estes fenômenos, com princípios na conservação de massa, energia e quantidade de movimento. A etapa seguinte é a elaboração do domínio e a discretização do mesmo, utilizando modelos matemáticos, fazendo uso de equações diferenciais.

Estas equações serão resolvidas por programação, com modelos numéricos, fazendo uso de equações algébricas, através de condições de contorno impostas ao domínio. Há diferentes métodos de resolução, como Euleriano, Método de Diferenças Finitas, Método de Elemento Finitos, Método de Integração do Contorno e Sistema de Coordenadas Lagrangeano.

Uma simulação pode ter ou não dependência temporal, sendo, respectivamente, transiente ou estacionária. Para um bom resultado, uma simulação deve garantir convergência, consistência e estabilidade. Finalmente, avalia-se o resultado obtido e buscam-se validações para este estudo através de resultados experimentais.

Para as simulações deste trabalho foi utilizado o CFX[®] que é um software de CFD integrado, no qual é possível construir a geometria, a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar os resultados obtidos, sendo utilizado para a simulação de diversos tipos de escoamentos.

O pacote computacional CFX é composto basicamente de quatro programas (CFX 11, 2008):

- CFX-Build: para a construção das geometrias e da malha numérica;
- CFX-Pre: para o ajuste dos parâmetros de simulação;
- CFX-Solver: para a resolução dos cálculos, que podem ser feitos utilizando um ou vários processadores; e
- CFX-Post: é o programa para a análise dos resultados, que processa e apresenta os dados graficamente, podendo o usuário criar diferentes tipos de imagens gráficas, para melhor análise dos resultados.

A seguir será mostrada, em detalhes, cada etapa realizada nas simulações desse trabalho.

a) Gerador de Geometria

Para a geração da geometria utilizou-se o pacote computacional Workbench do software Ansys, que possui ferramentas de CAD. Com este software é possível gerar geometrias elaboradas e complexas, devido a sua grande flexibilidade e recursos disponíveis.

b) Gerador de Malha

O gerador de malha gera volumes de controle nos quais serão resolvidas todas as equações relacionadas ao problema estudado. Assim, quanto maior o número de volumes de controle, mais precisa estará a solução. Porém, a demanda de esforço computacional será maior. Desta maneira, é necessário encontrar um limite onde a partir deste, um aumento da quantidade de volumes de controle aumenta o esforço computacional, mas não altera os resultados obtidos.

Assim, são feitas simulações com malhas de diferentes números de volumes de controle a fim de encontrar aquela que forneça a maior precisão possível. Este procedimento é conhecido como teste de malha, onde se faz uma análise de um parâmetro chave em cada simulação realizada.

Para a geração da malha utilizou-se o pacote computacional Workbench do software Ansys.

c) Pré-Processamento

Nesta etapa é possível definir todos os parâmetros relevantes à simulação a ser realizada, no que diz respeito à modelagem do problema, condições de contorno e propriedades dos fluidos envolvidos. Entradas e saídas do sistema são definidas bem como características do escoamento, modelo de turbulência, número de iterações, resíduo para convergência, dependência temporal, entre outros.

Para o alcance de resultados precisos dentro de limites econômicos (esforço computacional), são realizadas simplificações no estudo. Deve-se conhecer com detalhes o fenômeno a ser estudado para avaliar se haverá grande impacto nos resultados.

d) Solver

O Solver é responsável pela simulação propriamente dita, ou seja, calcula para cada volume de controle as equações definidas no Pré-Processamento. A simulação é realizada até que se atinja a convergência estipulada ou o número de iterações definidas.

O Solver faz aproximações das variáveis desconhecidas do escoamento, discretiza o espaço, lineariza o sistema de equações algébricas, define a estratégia de solução deste sistema e finalmente, o resolve utilizando uma abordagem numérica.

Este é o item mais crítico de uma simulação, pois varia de acordo com a potência e a capacidade do computador onde a simulação será realizada. Assim, quando mais potente for o computador, menor tempo computacional é gasto e, conseqüentemente, mais econômico é o estudo.

É possível acompanhar a resolução das equações durante o andamento da simulação, onde são visualizados os resíduos das equações e fechamento do balanço de massa no sistema.

e) Pós-Processamento

Para analisar os resultados obtidos, usa-se o Pós-Processamento. Este pacote disponibiliza ferramentas para visualização da geometria e da malha geradas,

construção de gráficos com vetores e contorno para avaliação de perfis de velocidade, pressão, concentração, entre outros, inclusive tridimensionais.

Além disso, é possível traçar gráficos relacionando variáveis da simulação, construir tabelas, fazer cálculos no próprio programa, visualizar a trajetória das partículas e linhas de corrente, bem como criar animações para facilitar a análise dos resultados e possibilidade de exportação de resultados para outro software de visualização.

III. Discretização

Para resolução de problemas em CFD, o domínio a ser estudado é subdividido em subdomínios, que são domínios menores, onde as equações dos balanços serão aplicadas. Esta subdivisão é conhecida como Malha ou Grid. As malhas podem ser estruturadas ou não-estruturadas.

As malhas estruturadas são geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos unidimensionais, cujo produto cartesiano gera elementos bidimensionais e tridimensionais que são, geralmente, quadriláteros e hexaédricos, respectivamente. Nessas malhas, cada elemento tem sempre o mesmo número de elementos vizinhos, a não ser quando o mesmo pertence ao contorno.

As malhas não-estruturadas são produzidas de forma automatizada, contendo elementos que podem ter diversas formas, usualmente usam-se triângulos no caso bidimensional. No caso tridimensional, os tetraedros são os mais utilizados. Essas malhas conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas, devido à maior flexibilidade de forma que seus elementos podem assumir.

Entretanto, esta vantagem tem sido cada vez mais reduzida com o desenvolvimento de técnicas que tornam malhas estruturadas adaptadas a geometrias complexas. Técnicas como as *Body-Fitted Meshes*, multiblocos de malha estruturadas e a *Cut-Cell* tentam compensar esta deficiência das malhas estruturadas frente às não-estruturadas. As duas primeiras técnicas frequentemente exigem bastante esforço do usuário de CFD, mas há técnicas de geração automática e até códigos comerciais disponíveis. Há códigos comerciais bastante eficientes também para geração de malhas não-estruturadas. A terceira técnica, *Cut-Cell*, é de extrema simplicidade e eficiência em quase todos os casos em que se lida com geometrias complexas. Ela consiste em um mapeamento

preliminar de onde há partes sólidas ou fluidas no domínio e no conseqüente reposicionamento dos centros de volumes que são parcialmente sólidos.

A Figura III-I ilustra as diferentes técnicas de geração de malha.

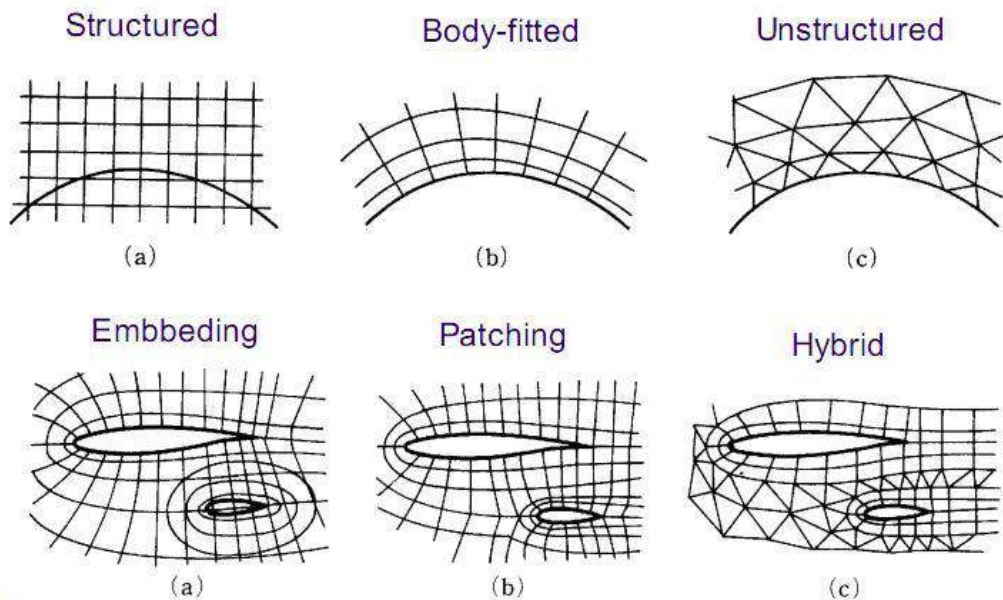


Figura III-I - Técnicas de geração de malha

IV. Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos é uma técnica que parte da integração formal das equações de transporte que regem o escoamento do fluido em todos os volumes de controle obtidos pela discretização do domínio. Assim, as equações são resolvidas em relação às derivadas parciais baseada na resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento a um determinado volume de meio contínuo. (Pinto e Lage, 2001)

Nesta integração, a forma conservativa de cada equação é usada para que seja possível transformar as integrais em volume dos divergentes dos fluxos advectivos e difusivos em integrais em área dos fluxos normais à superfície dos volumes de controle, através da aplicação do teorema da divergência.

Embora esta operação seja exata, a completa discretização destes termos e das outras integrais no volume necessita do uso de técnicas numéricas para aproximar os

campos das variáveis conservadas, ϕ , que utilizam funções de interpolação ou aproximações funcionais. A acurácia destas aproximações e da representação obtida para os fluxos através das superfícies dos volumes de controle é o aspecto mais importante no método de volumes finitos.

Como os outros métodos, as equações finais levam a um sistema algébrico de equações. A solução das equações de conservação via Método dos Volumes Finitos requer uma relação do ponto a ser calculado com as suas vizinhanças. A Figura IV-I mostra a organização do ponto e seus vizinhos para o caso de elementos de volume hexaédricos e a equação seguinte mostra a relação de um ponto da malha com suas vizinhanças.

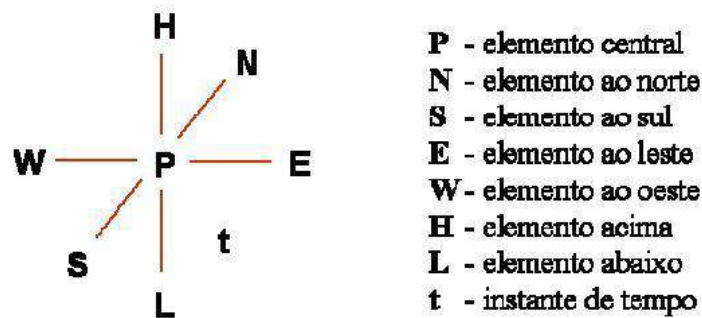


Figura IV-I – Organização da malha

$$A_P \phi_P = A_N \phi_N + A_S \phi_S + A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_H \phi_H + A_L \phi_L + A_t \phi_t + \text{fontes}$$

Este método evoluiu das diferenças finitas, outro método de resolução de equações diferenciais, e não apresenta problemas de instabilidade ou convergência, por garantir que, em cada volume discretizado, a propriedade em questão (por exemplo, a massa) obedece à lei da conservação.

A aproximação discreta de uma equação de conservação pelo método dos volumes finitos tem por objetivo dividir o domínio de cálculo em um certo número de subdomínios, nos quais a lei física de conservação seja feita válida, dentro de um certo grau de aproximação. Esta aproximação pode ser obtida de duas formas. A primeira forma é a utilização do balanço da propriedade conservada para cada um dos subdomínios. O segundo modo é a integração da equação de conservação, na forma conservativa, no volume do subdomínio. Evidentemente, ambos os métodos levam ao

mesmo resultado, pois a equação de conservação se originou através de um balanço da propriedade em um volume finito, como mostrado na equação da continuidade, para a conservação de massa.

Considerando, por exemplo, a equação da continuidade em duas dimensões espaciais, e usando a geometria cartesiana, a Figura IV-II mostra um subdomínio do domínio bidimensional da equação e onde está representada a nomenclatura de determinados pontos dentro ou na superfície deste subdomínio ou volume finito, bem como os fluxos mássicos que atravessam cada face no intervalo de tempo Δt .

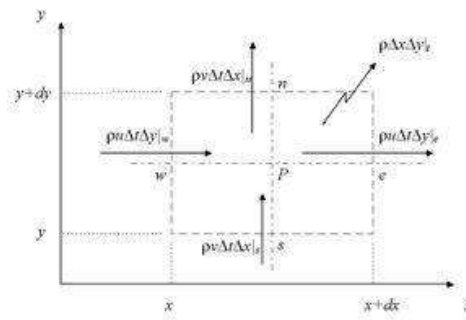


Figura IV-II - Representação do domínio (Barreira et al., 2003)

Assim a variação da massa dentro deste volume, no intervalo Δt , é dada pelo balanço a seguir:

$$(\rho\Delta x\Delta y)_{t+\Delta t} - (\rho\Delta x\Delta y)_t = (\rho u\Delta t\Delta y)_w - (\rho u\Delta t\Delta y)_e + (\rho v\Delta t\Delta x)_s - (\rho v\Delta t\Delta x)_n$$

Dividindo a equação acima pelo produto $\Delta t\Delta x\Delta y$ tem-se a seguinte equação, que é a equação discretizada para o volume finito em questão:

$$\frac{\rho_{t+\Delta t} - \rho_t}{\Delta t} + \frac{(\rho u)_e - (\rho u)_w}{\Delta x} + \frac{(\rho v)_n - (\rho v)_s}{\Delta y} = 0$$

A equação acima também pode ser obtida através da integração da equação da continuidade, sem o termo em ρw , utilizando o operador integral abaixo:

$$\int_t^{t+\Delta t} dt \int_w^e dx \int_s^n \cdot dy$$

Assim, a aproximação discreta é obtida pelos dois procedimentos. Usualmente, é mais fácil obter a equação aproximada através da integração da equação de conservação na forma divergente, já que muitas grandezas têm balanços bem complexos.

Nota-se que a equação discretizada ainda é uma expressão exata para a conservação de massa no volume em questão, pois a forma de cálculo dos fluxos médios através das faces e das densidades médias no volume ainda não foi especificada. A aproximação destas grandezas utilizando seus valores em pontos discretos da malha e em um dado instante de tempo é que introduz o erro da aproximação numérica.

A Figura IV-III mostra a estrutura básica de uma malha unidimensional de volumes finitos. Usualmente, os valores das variáveis dependentes são armazenados nos centros dos volumes (P, W, E) ou nos centros de determinadas faces (w, e). Os valores necessários destas variáveis em outras posições são obtidos por processos convenientes de interpolação. Em um mesmo problema, algumas das variáveis dependentes podem ser armazenadas nos centros dos volumes, enquanto que outras ficam armazenadas em pontos sobre as faces. Assim, o método de volumes finitos pode utilizar várias malhas para um mesmo problema (malhas entrelaçadas).

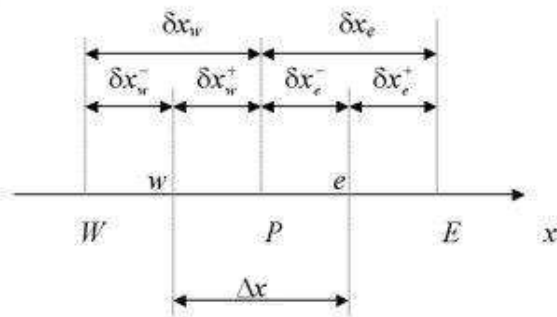


Figura IV-III - Estrutura básica de uma malha unidimensional de volumes finitos

Do exposto acima, ficam bem claras as diferenças entre o método das diferenças finitas e o método dos volumes finitos. O primeiro se baseia na aplicação da equação diferencial em pontos discretos de uma malha e na utilização de aproximações das derivadas utilizando séries de Taylor. O segundo aplica a equação diferencial de conservação a subdomínios de uma determinada malha através da sua integração em cada volume. De fato, os termos de transporte convectivo são os responsáveis pelas maiores dificuldades numéricas na solução de equações diferenciais parciais onde funções de interpolação devem ser aplicadas.

V. Metodologias de Solução

Uma vez discretizadas, as equações devem ser resolvidas. A metodologia de solução envolve a solução de um sistema de equações algébricas representado sob a forma $F\varphi = a$, onde F é a matriz de coeficientes, φ é o vetor da variável de interesse e a é o vetor que contém as informações dos termos fontes associados. Para a montagem da matriz de coeficientes do sistema linear de equações, podem ser utilizados métodos diretos ou iterativos (Versteeg and Malalasekera, 1995).

Os métodos diretos são aqueles que necessitam da inversão da matriz completa, incluindo os elementos não-nulos. Esses são somente recomendados quando o sistema de equações possui um número não muito grande.

Já os métodos iterativos podem se classificar de acordo com o esquema de solução: ponto a ponto, linha a linha, plano a plano ou todos os elementos da matriz a serem resolvidos simultaneamente.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1. Equação de Conservação

A equação a seguir mostra de uma forma generalizada todas as equações resolvidas através de uma simulação em CFD. Cada termo da equação representa um determinado fenômeno a ser modelado. A Tabela 3.1-1 mostra o significado de cada termo da equação de conservação.

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

Tabela 3.1-1 - Significado dos termos da equação de conservação

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)$	TERMO TEMPORAL
$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi)$	TERMO CONVECTIVO
$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial z}\right)$	TERMO DIFUSIVO
S^{ϕ}	TERMO FONTE

Pode-se notar que todas as equações de conservação podem ser representadas da mesma forma que a anterior, modificando somente os respectivos termos temporais, difusivos, convectivos, fontes e a variável correspondente. A Tabela 3.1-2 mostra a expressão associada às variáveis pertencentes à equação diferencial.

Tabela 3.1-2 - Expressão associada às variáveis pertencentes à equação diferencial

Equação de conservação	ϕ	Γ^\dagger	S^\dagger
Continuidade	i	0	0
Momento em x	u	μ	$B_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}$
Momento em y	v	μ	$B_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}$
Momento em z	w	μ	$B_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z}$
Energia	T	$\frac{k}{C_p}$	$\frac{1}{C_p} \frac{DP}{Dt} + \frac{\mu}{C_p} \Phi$
Massa de um componente i	C	ρD	0

3.2. Considerações Feitas

i) Número de fases envolvidas

O núcleo central de ar que pode ser formado neste tipo de equipamento não foi considerado. Esta simplificação foi feita para facilitar a convergência da simulação e diminuir o tempo da mesma, já que sistemas trifásicos (água/óleo/ar) são mais complexos que àqueles bifásicos.

ii) Corrente de alimentação

A alimentação do hidrociclone possui características de correntes típicas tratadas em refinarias. No entanto, é evidente que algumas características, como a concentração de óleo na água, densidade e pressão na alimentação, por exemplo, podem variar de acordo com o tipo de óleo e capacidade da planta.

Outro ponto importante a ressaltar é que, apesar de o CFX recomendar que seja definida a velocidade na entrada, foi definida a pressão imposta pela bomba na corrente que alimenta o hidrociclone. Isto foi feito, pois, ao definir-se a pressão na entrada, representa-se com maior fidelidade a corrente, visto que velocidades podem variar consideravelmente devido a flutuações na vazão de entrada. Esta consideração foi feita para todas as simulações no teste de malha.

No entanto, ao simular as geometrias para otimização, estas apresentaram problemas de convergência. Para solucionar o problema sem prejudicar os resultados, foi

considerada uma vazão na entrada igual àquela simulada no teste de malha. Assim, para calcular a vazão de entrada do hidrociclone, foram utilizadas ferramentas do pós-processador do CFX. Como as geometrias simuladas para a otimização são diferentes (ou seja, há diferentes diâmetros da entrada), foi necessário calcular a velocidade correspondente àquela vazão para cada área do *inlet*.

iii) Modelo de turbulência

Quanto à modelagem da turbulência foi utilizado o modelo SSG, que considera o escoamento como anisotrópico. Apesar de o modelo κ - ϵ ser mais robusto e demandar um poder computacional menor que os modelos baseados nos Tensores de Reynolds, esse não é recomendado para escoamentos com trajetórias curvas, como ocorre em hidrociclones (GIMBUN et al., 2005). Como o modelo SSG faz o cálculo exato do termo de produção e a modelagem inerente ao modelo das tensões anisotrópicas, é mais apropriado para escoamentos complexos, incluindo efeitos de curvatura, mudanças repentinas na taxa de cisalhamento, escoamentos secundários e empuxo.

No entanto, devido a questões computacionais, a modelagem da turbulência foi feita em etapas. Primeiramente, os casos foram simulados com modelo de turbulência κ - ϵ e, após sua convergência, foram simulados com SSG. Desta maneira, o modelo κ - ϵ serviu como condição inicial para o modelo SSG.

iv) Modelo para o escoamento multifásico

No CFX há diferentes modelos disponíveis para definir um escoamento multifásico e a escolha do modelo que melhor representa o fenômeno foi feita baseada nas características inerentes ao escoamento. Foram feitos testes com o modelo Euleriano, que considera equações de transporte para cada fase existente no domínio, bem como a influência de uma fase no escoamento das demais. Os resultados encontrados foram coerentes com a realidade e, portanto, este modelo foi utilizado em todas as simulações.

v) Esquema Upwind

Foi utilizado o esquema Upwind, que é uma função de interpolação que evita os coeficientes negativos. É um esquema de interpolação de primeira ordem, onde o valor da função na interface é o mesmo no volume a montante. Tal característica é

fisicamente realizável nos casos onde o transporte da propriedade é controlado pela convecção.

vi) Condição de parada para as simulações

Como condição de parada para todas as simulações realizadas nesse trabalho, foram utilizados os seguintes critérios:

- Fechamento do balanço de massa;
- Alcance de 1000 iterações (no caso do teste de malhas) e 1500 iterações para as demais simulações; e
- Resíduo estável e menor ou igual a 10^{-4} .

4. OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO HIDROCICLONE

Para a otimização da geometria do hidrociclone, foi utilizado o programa *Essential Regression and Experimental Design for Chemist and Engineers*. Foram variados os parâmetros D_i , D_o e D_u , que são, respectivamente, o diâmetro da alimentação, do *overflow* e do *underflow*.

Como respostas para o ajuste pelo programa foram utilizadas a eficiência reduzida do equipamento (G') e a razão de fluido (R_f). A eficiência total (ou global) relaciona a vazão mássica de óleo coletados no *overflow* e a vazão mássica de óleo alimentada no hidrociclone. Já a eficiência reduzida leva em consideração somente a quantidade de óleo coletada no *overflow* efetivamente pela ação do hidrociclone, ou seja, desconsiderando-se o óleo recolhido sem que haja separação. A eficiência reduzida pode ser representada pela equação a seguir:

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

Em relação à razão de fluido, é um parâmetro que relaciona a vazão mássica de água coletada no *overflow* e a vazão mássica de água alimentada no hidrociclone.

Como são inversamente proporcionais, o objetivo é encontrar uma geometria que alcance a maior eficiência possível para uma menor razão de fluido. Assim, o óleo recolhido no *underflow* será o menor possível, garantindo que a água desta corrente esteja apta para descarte/reuso.

Dessa maneira, foi feito um planejamento experimental para definir a quantidade de simulações a serem feitas, onde foram variados os 3 parâmetros especificados anteriormente, com o objetivo de obter diversos resultados para G' e R_f . Em seguida, o programa gerou uma equação, como pode ser vista a seguir, que mostra a influência de cada parâmetro nos resultados encontrados, definindo diferentes pesos para cada um deles através dos coeficientes b_0 a b_9 .

$$\text{Response} = b_0 + b_1 * D_i + b_2 * D_o + b_3 * D_u + b_4 * D_i * D_i + b_5 * D_o * D_o + b_6 * D_u * D_u + b_7 * D_i * D_o + b_8 * D_i * D_u + b_9 * D_o * D_u$$

Finalmente, esta equação foi tratada no suplemento do Excel dedicado a análises de otimização (Solver), onde foram definidas as dimensões ótimas do hidrociclone para uma máxima eficiência e uma mínima razão de fluido.

5. SIMULAÇÕES

5.1. Geração da Geometria Base

Foi feita uma geometria para o hidrociclone base, da família Bradley, com diâmetro principal da parte cilíndrica (D_c) igual a 10 mm. Os hidrociclones desta família têm todas as dimensões auxiliares dependentes do D_c e podem ser visualizadas na Figura 5.1-I.

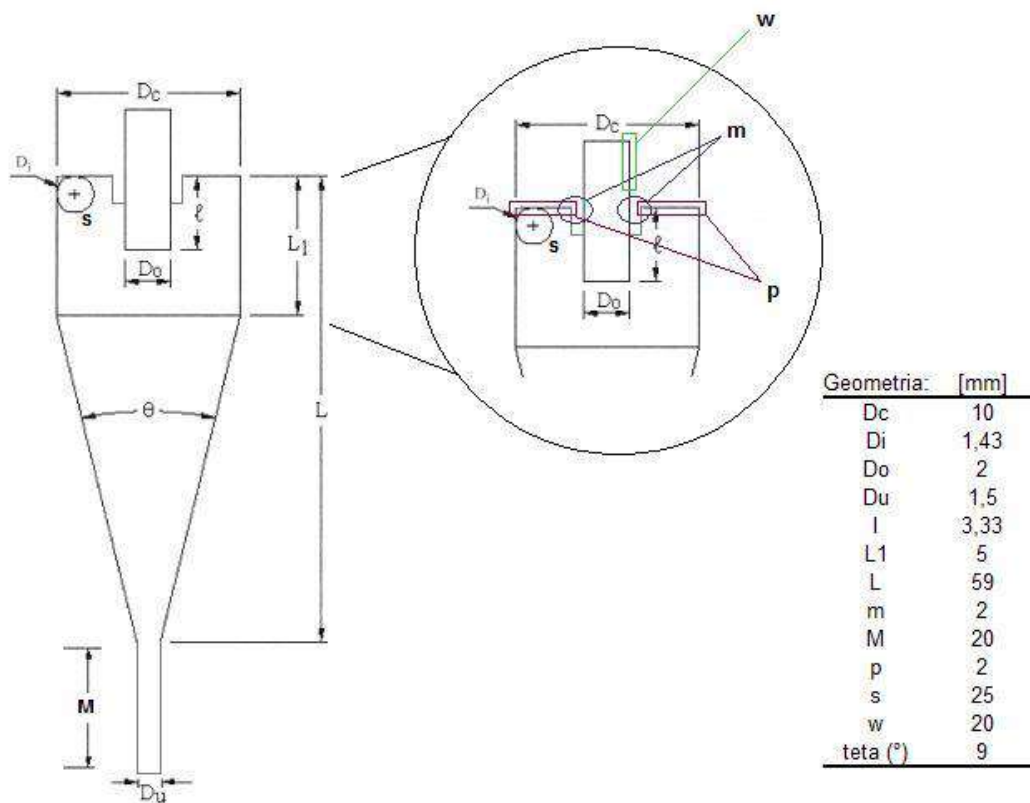


Figura 5.1-I - Dimensões do hidrociclone base

5.2. Geração e Seleção das Malhas

Como o resultado das simulações é muito dependente da malha utilizada, deve-se fazer uso de algum critério para seleção da malha ideal. Assim, realizou-se um teste de malha variando-se os parâmetros “*default body space*”, que representa o maior tamanho possível para um elemento de volume de controle, e “*inflation*”, que representam camadas refinadoras da malha próximas às paredes do hidrociclone. Com este teste é possível definir a melhor malha que gera um melhor resultado gastando um tempo computacional razoável e dentro das margens de erro aceitáveis.

A Figura 5.2-I mostra esquematicamente um exemplo da relação entre o número de nós presente na malha e a qualidade dos resultados obtidos, em função de um parâmetro chave.

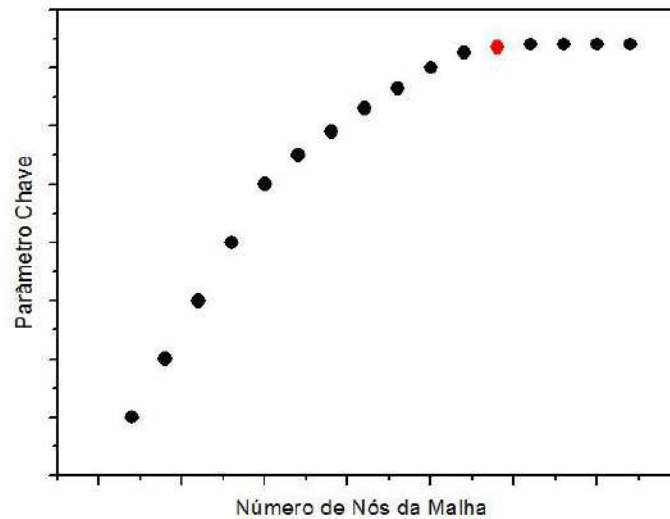


Figura 5.2-I – Gráfico representativo de um teste de malha

No teste de malha foram feitas 9 simulações utilizando os parâmetros e condições descritos na Tabela 5.2-1 (Pecora, 2002).

Tabela 5.2-1 - Parâmetros e condições utilizados nas simulações

Dados para simulação:
Viscosidade do óleo: 13,2 cP
Densidade do óleo: 840 Kg/L
Concentração do óleo na alimentação: 0,0124
Pressão na entrada: 12,7 atm
n° de iterações: 1000
Diâmetro da partícula: 25 µm
Pressão <i>overflow</i> : 1 atm
Pressão <i>underflow</i> : 1 atm

A Tabela 5.2-2 mostra os parâmetros “*default body space*” e “*inflation*” utilizado em cada uma das simulações.

Tabela 5.2-2 - Parâmetros utilizados nas simulações do teste de malha

Teste	Default Body Spacing (mm)	Inflation (mm)
1	1	1
2	0,667	0,667
3	0,5	0,5
4	0,4	0,4
5	0,333	0,333
6	0,333	0,333
7	0,286	0,286
8	0,270	0,270
9	0,240	0,240

A Figura 5.2-II mostra as superfícies que possuem “*inflation*” para os testes realizados nessa etapa.

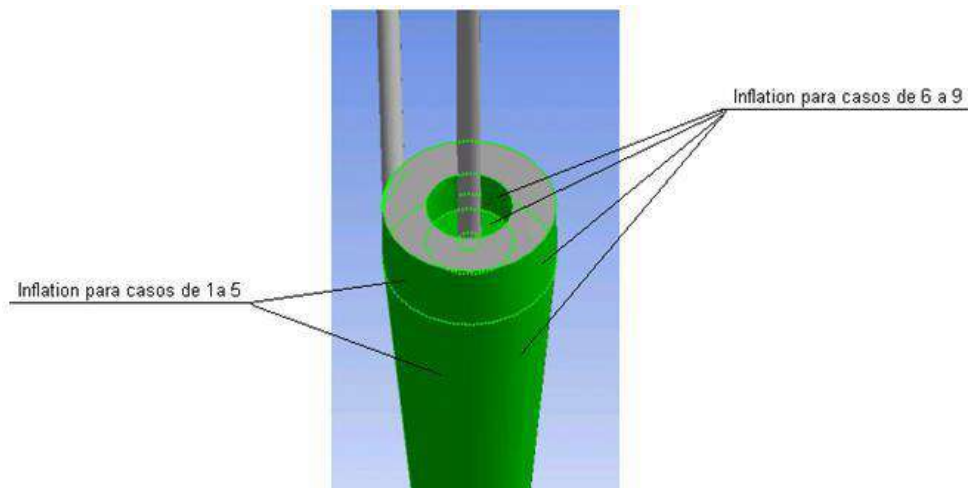


Figura 5.2-II - Superfícies que possuem “*inflation*”

5.3. Otimização da Geometria do Hidrociclone

Para a otimização das geometrias do hidrociclone foram utilizados os seguintes limites, em mm, para os parâmetros variados:

$$1 < D_i < 2 \quad 1 < D_o < 2 \quad 2 < D_u < 3$$

Pelo planejamento experimental, foi definido que seriam realizados 17 experimentos variando a geometria do hidrociclone. Destes 17 experimentos, 3 são repetições (*centerpoint*) para aumentar a confiabilidade do método (Experimentos 1, 7 e 11). A

Tabela 5.3-1 mostra as características de cada um deles, sendo que as dimensões apresentadas estão em milímetros:

Tabela 5.3-1 - Características das geometrias utilizadas para a otimização

Exp #	Di	Do	Du
1	1,5	1,5	2,5
2	2	2	2
3	1	1	3
4	2	2	3
5	0,659	1,5	2,5
6	1,5	0,659	2,5
7	1,5	1,5	2,5
8	2	1	2
9	1,5	2,341	2,5
10	1	2	3
11	1,5	1,5	2,5
12	2,341	1,5	2,5
13	1	1	2
14	1,5	1,5	1,659
15	2	1	3
16	1	2	2
17	1,5	1,5	3,341

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Geração da Geometria Base

Inicialmente, para gerar a geometria foi feito um esboço da vista lateral do hidrociclone e, a partir deste, a mesma foi gerada. A Figura 6.1-I ilustra o esboço em azul e a geometria final em cinza.

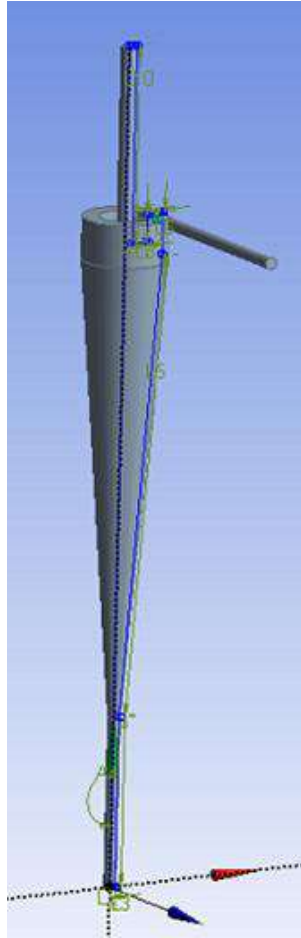


Figura 6.1-I – Geometria do hidrociclone utilizado no teste de malha

6.2. Geração e Seleção das Malhas

A Tabela 6.2-1 mostra o número de volumes de controle gerados para cada teste realizado.

Tabela 6.2-1 - Número de volumes de controle gerados para cada teste

Teste	Default Body Spacing (mm)	Inflation (mm)	n° volumes de controle
1	1	1	28747
2	0,667	0,667	67849
3	0,5	0,5	172106
4	0,4	0,4	316372
5	0,333	0,333	565740
6	0,333	0,333	564758
7	0,286	0,286	823317
8	0,270	0,270	957148
9	0,240	0,240	1361027

A Figura 6.2-I mostra, respectivamente, a malha gerada para o teste 1 (menos refinada com 28.747 volumes de controle) e a gerada para o teste 9 (mais refinada com 1.361.027 volumes de controle).

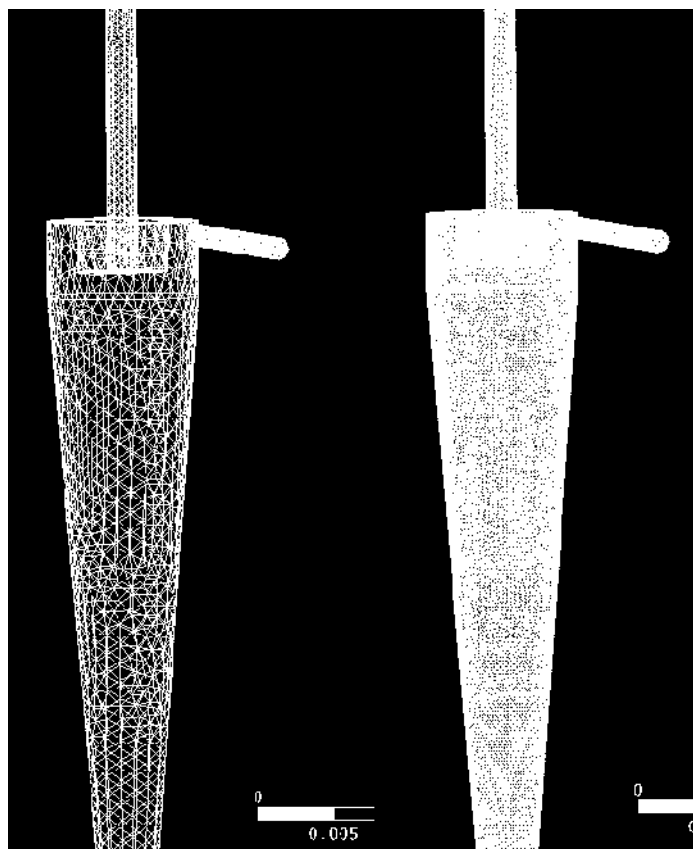


Figura 6.2-I - Malha gerada para os testes 1 e 9, respectivamente

A Figura 6.2-II mostra a malha gerada para os 9 testes realizados vista de um corte na parte cilíndrica do hidrociclone.

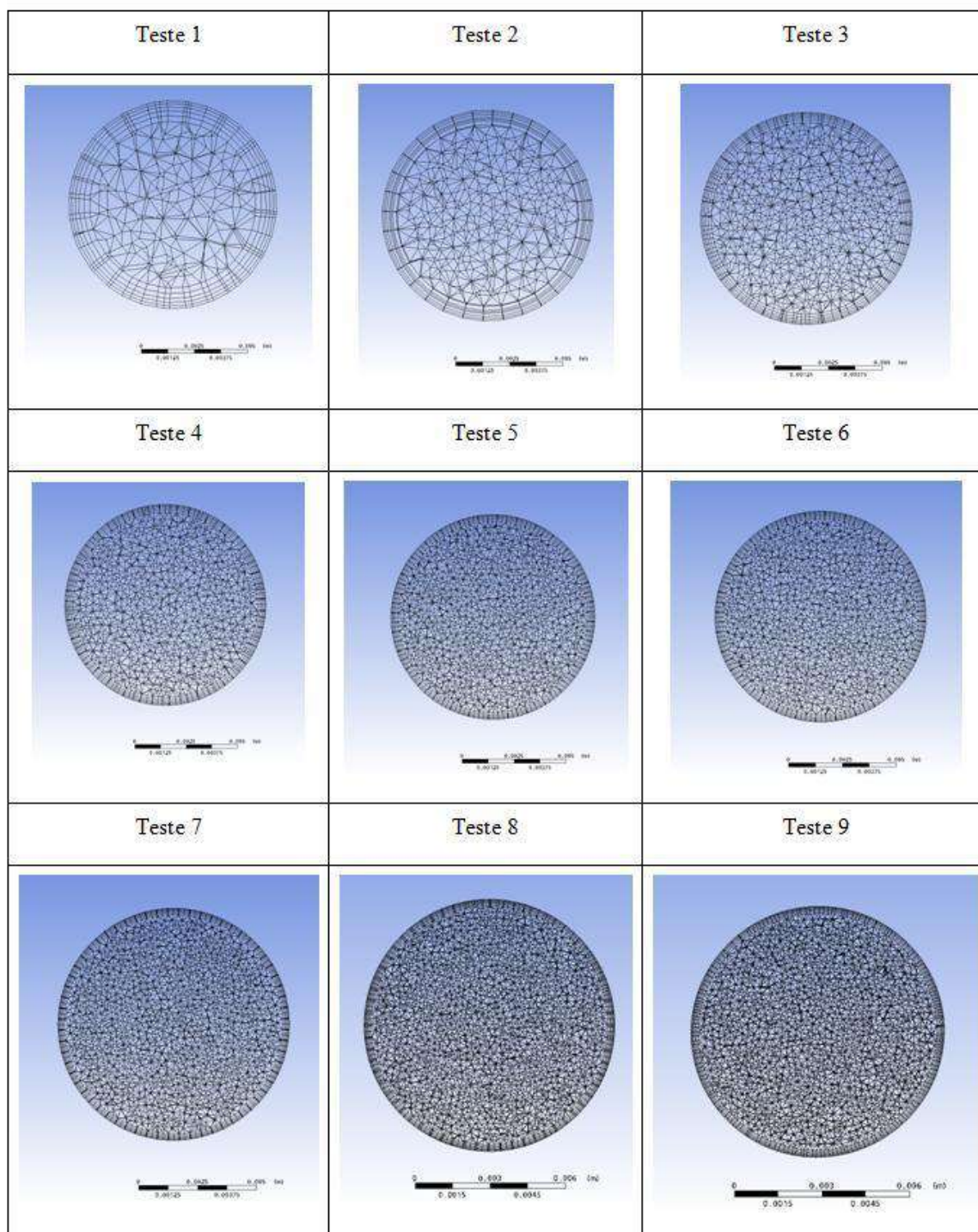


Figura 6.2-II - Corte da malha na parte cilíndrica do hidrociclone

A Figura 6.2-III mostra a malha gerada para os testes 6 a 9 com detalhes no “inflation” em mais superfícies, de uma vista da parte cilíndrica do hidrociclone em uma altura menor que àquela mostrada anteriormente.

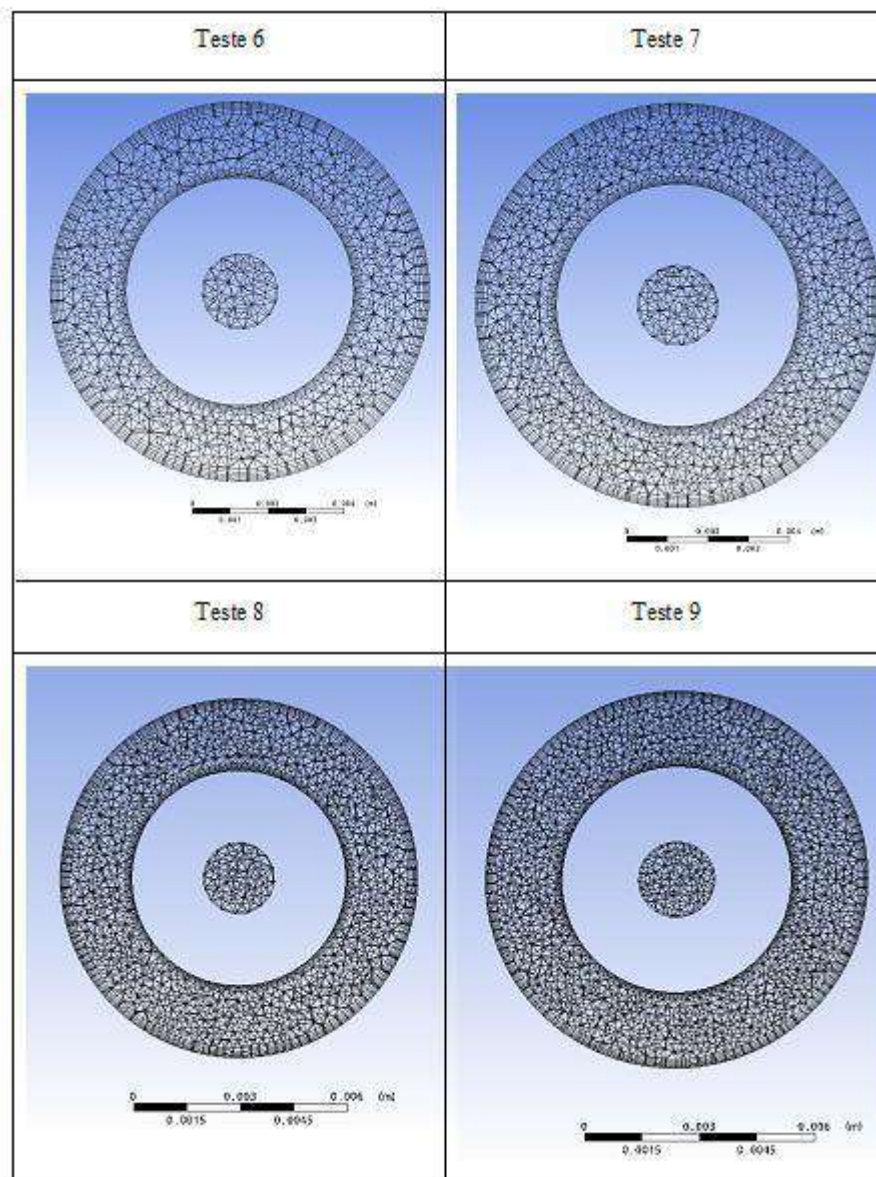


Figura 6.2-III - Corte da malha na parte cilíndrica do hidrociclone, com detalhe para o “inflation”

A Figura 6.2-IV mostra a malha gerada para os 9 testes realizados vista da parte interna do hidrociclone a partir de um corte realizado em relação a sua altura.

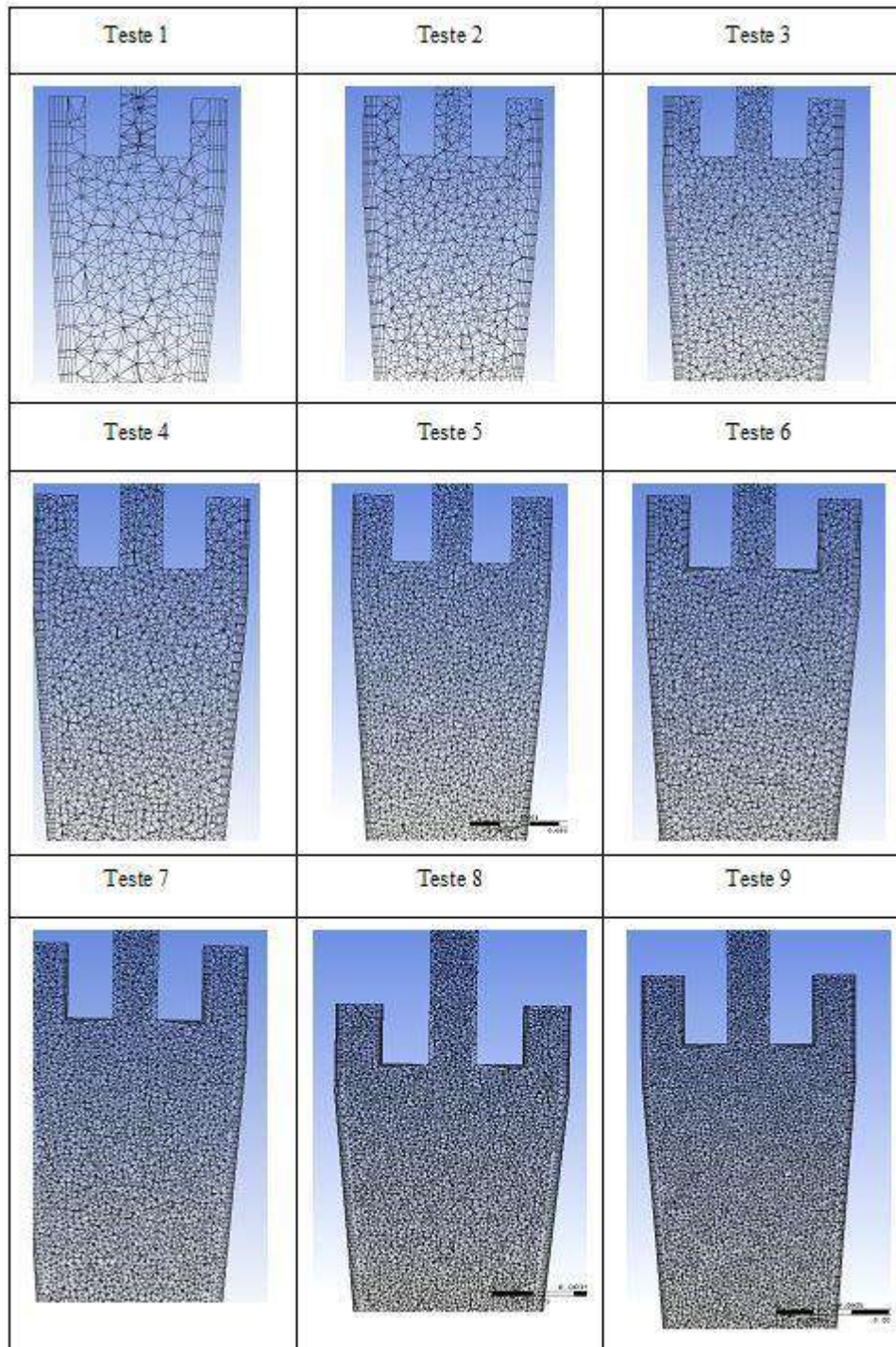


Figura 6.2-IV - Malha vista da parte interna do hidrociclone a partir de um corte realizado em relação a sua altura

A Figura 6.2-V mostra a malha gerada para os 9 testes realizados vista na entrada do hidrociclone, que é a menor superfície da geometria utilizada.

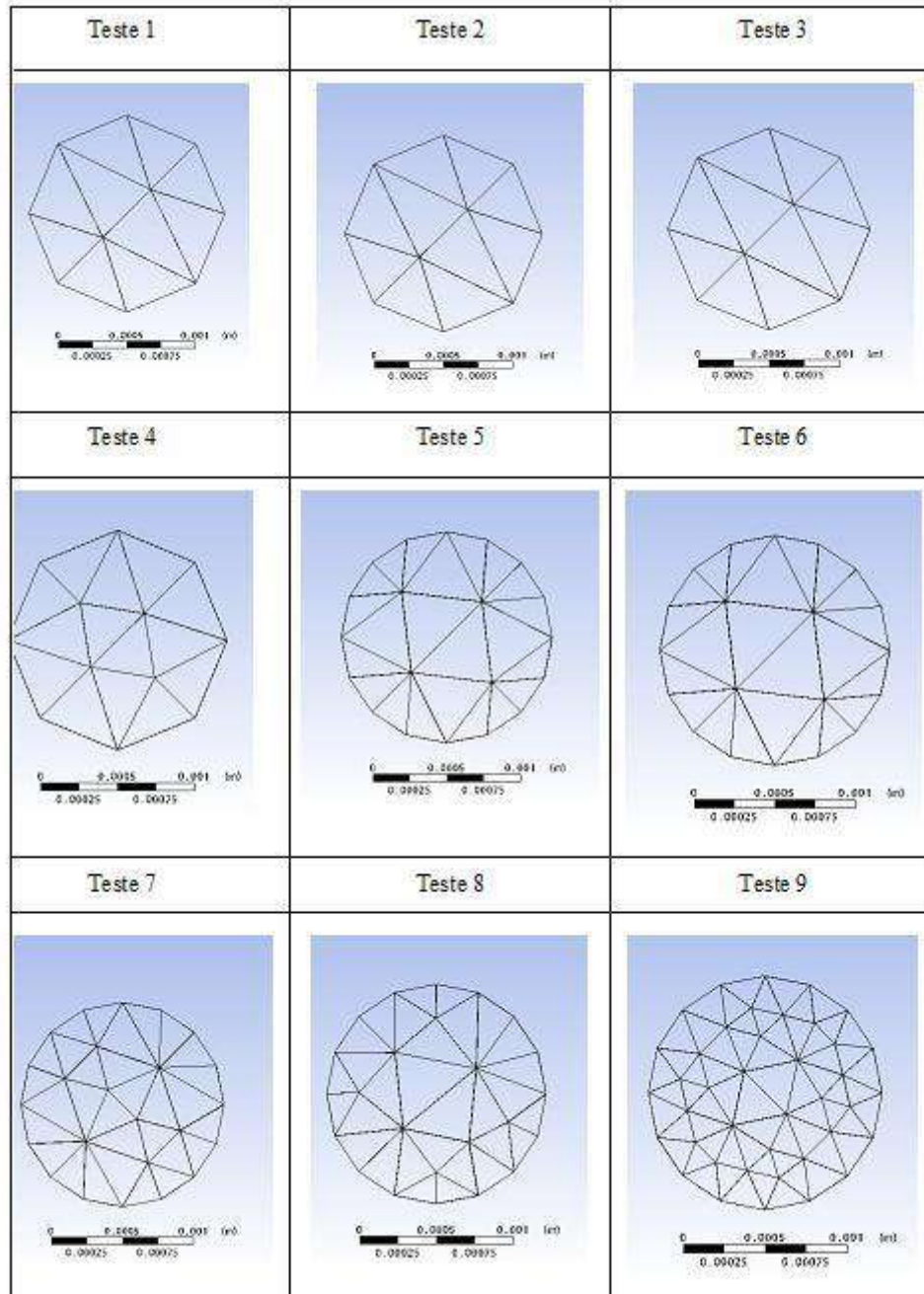


Figura 6.2-V - Malha vista na entrada do hidrociclone

Por fim, a Figura 6.2-VI mostra um gráfico com a relação entre o raio do hidrociclone e a velocidade tangencial para cada malha utilizada.

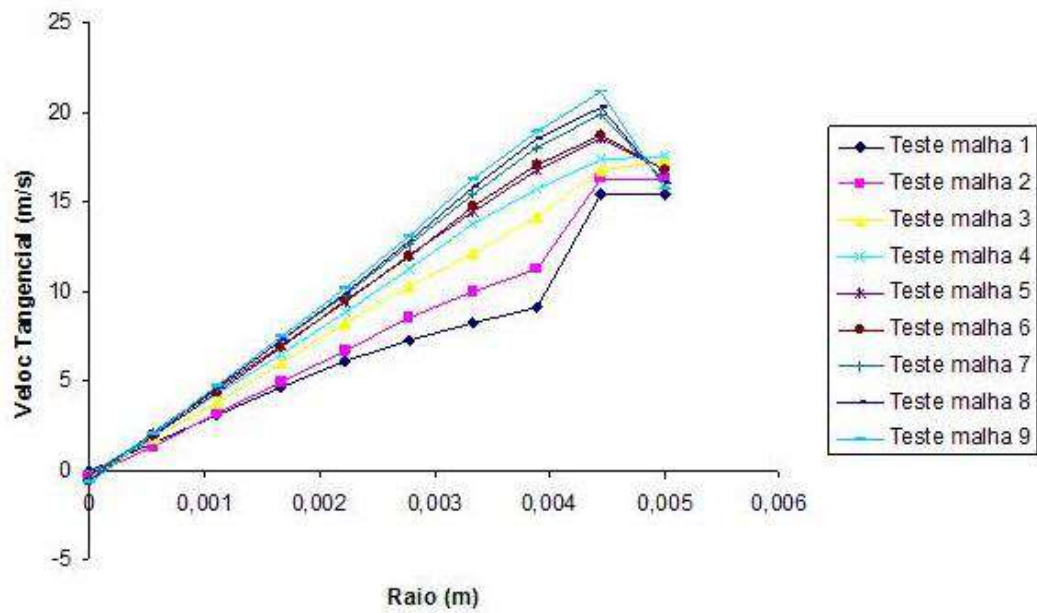
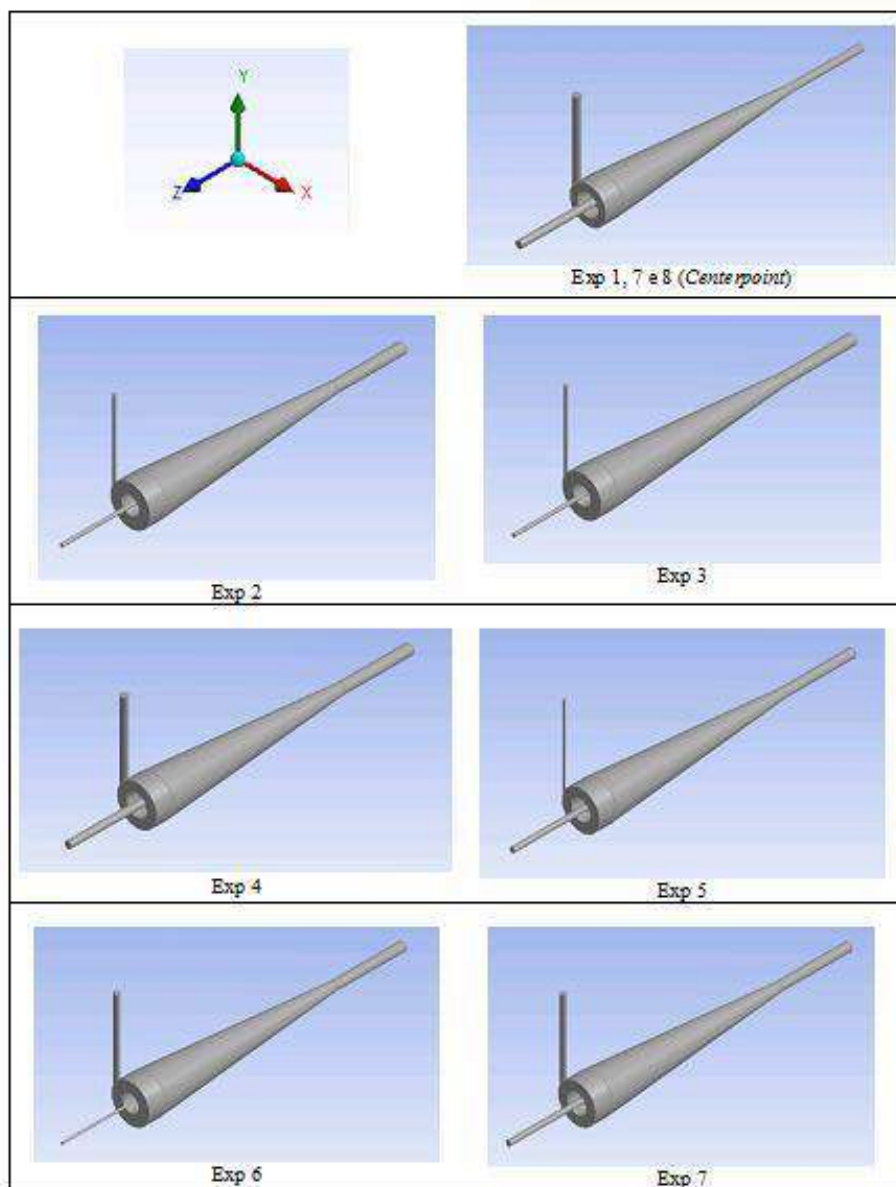


Figura 6.2-VI - Gráfico com a relação entre o raio do hidrociclone e a velocidade tangencial para cada malha utilizada

Dessa maneira, é possível concluir que a partir do teste de malha 7 não houve variação significativa do resultado, mostrando que a malha não mais interfere nos resultados obtidos. Assim, a malha eleita para a realização deste estudo foi a malha 8, como uma abordagem mais conservativa.

6.3. Geração das Geometrias para Otimização do Hidrociclone

De acordo com a metodologia definida anteriormente, foram geradas 15 geometrias diferentes, como mostra a Figura 6.3-I.



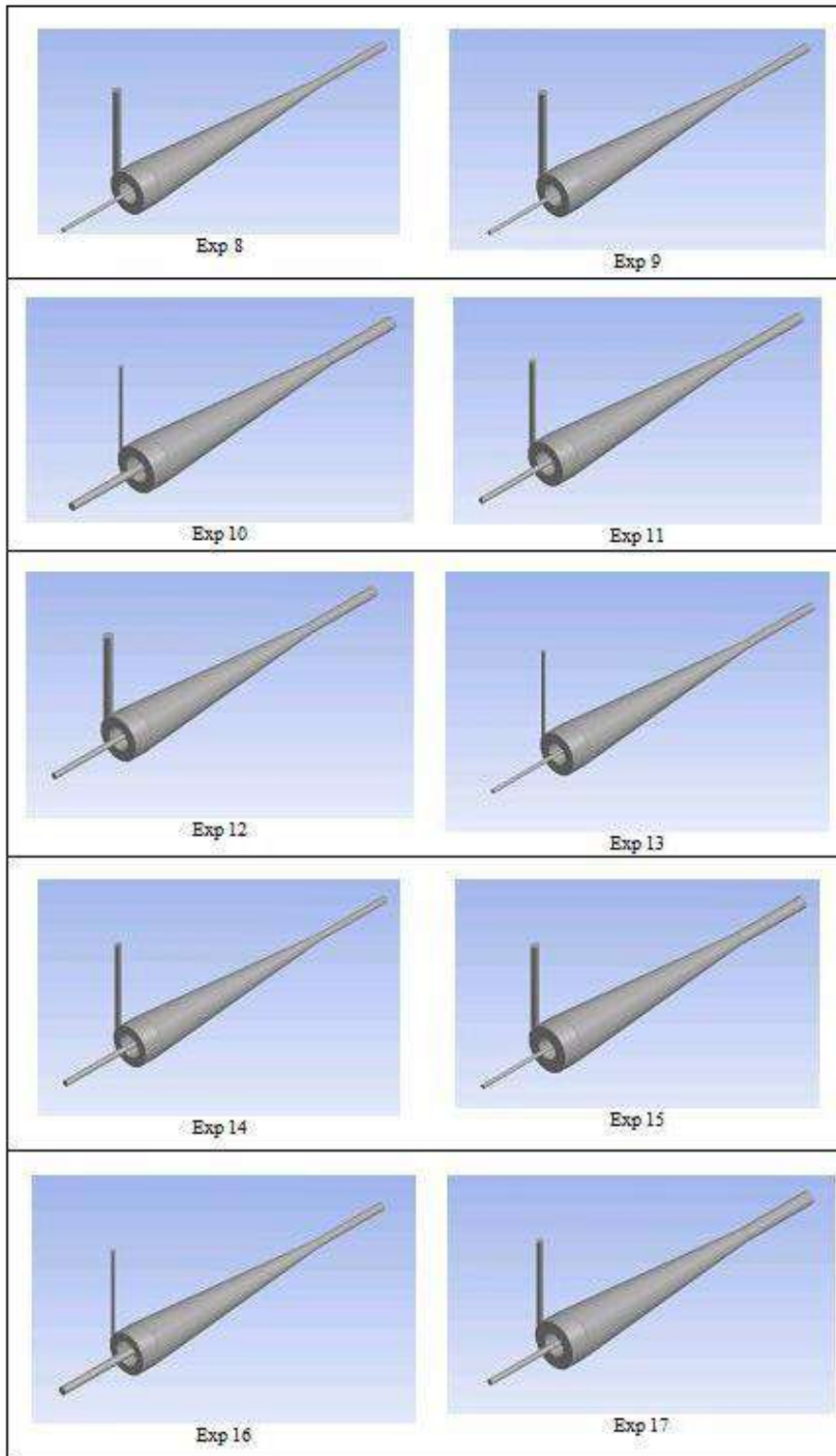


Figura 6.3-I - Geometrias geradas para otimização

6.4. Avaliação dos Resultados

Para a avaliação dos resultados obtidos com as simulações no CFX, foi utilizado o caso 8 do teste de malhas. A Figura 6.4-I mostra linhas de corrente - coloridas em relação à velocidade da água - no interior do equipamento seguindo um movimento helicoidal, conforme esperado. Além disso, há formação do vórtice no centro do hidrociclone, mostrado em detalhes na Figura 6.4-II. Para complementar a análise, foi traçado um plano no centro do hidrociclone para avaliar o perfil da velocidade da água e, pela Figura 6.4-III, pode-se notar que há uma região onde a velocidade é nula, que é justamente a região da interface com o vórtice central.

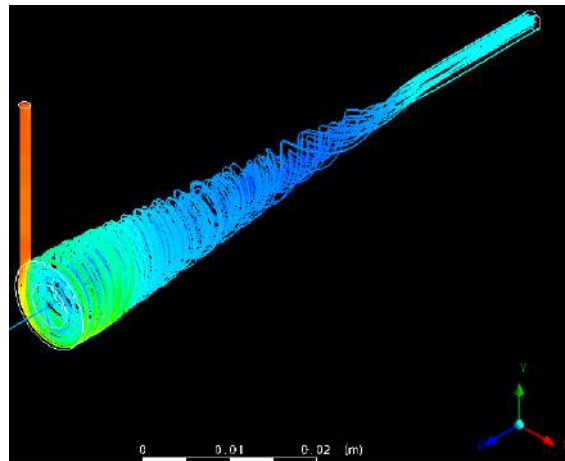


Figura 6.4-I - Linhas de corrente no interior do equipamento

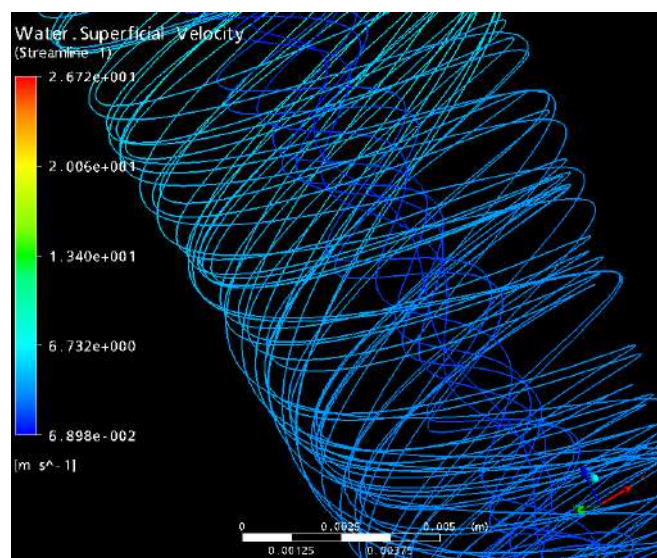


Figura 6.4-II - Detalhe do vórtice formado no centro do hidrociclone

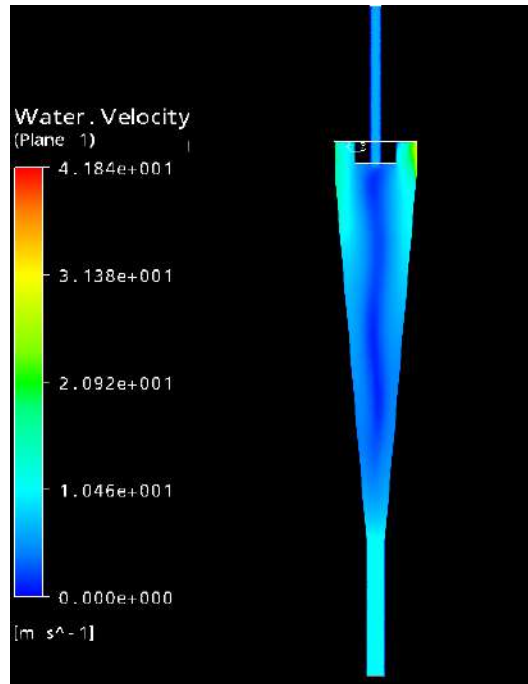


Figura 6.4-III - Perfil da velocidade da água, com destaque para núcleo central

Em relação ao perfil de pressão no hidrociclone, mostrado na Figura 6.4-IV, pode-se observar um resultado condizente com o esperado, pois na entrada da parte cilíndrica há os maiores níveis de pressão.

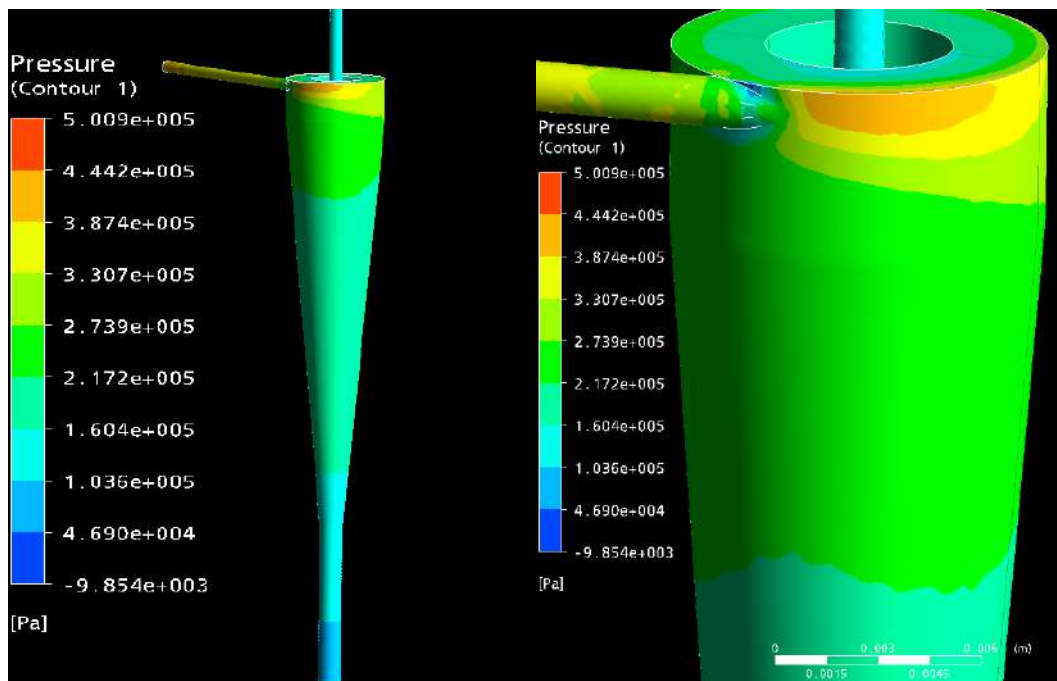


Figura 6.4-IV - Perfil de pressão no hidrociclone

Avaliando a separação óleo-água, a Figura 6.4-V mostra o perfil da fração volumétrica do óleo e da água, respectivamente, em um plano traçado no centro do

hidrociclone. Em relação ao óleo, nota-se, pela escala de cores, que há uma maior concentração no topo do equipamento, como é esperado, visto que o óleo é menos denso que a água. Já em relação à água, o comportamento é o oposto, tendo maior concentração na parte do fundo do equipamento.

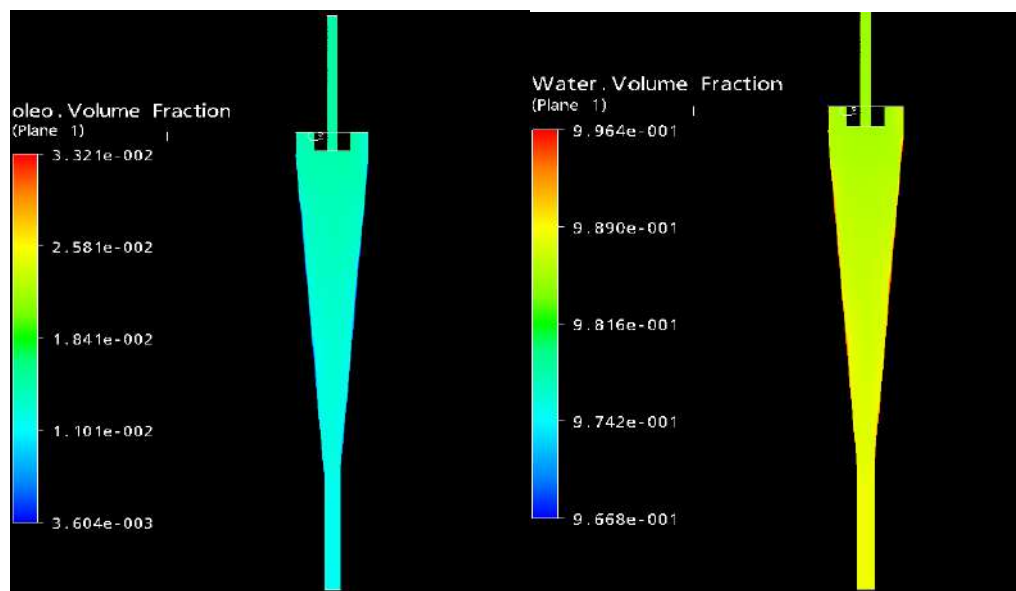


Figura 6.4-V - Fração volumétrica do óleo e da água, respectivamente, em um plano traçado no centro do hidrociclone

6.5. Otimização da Geometria do Hidrociclone

Foram realizadas 17 simulações e os resultados encontrados para cada experimento em relação à eficiência reduzida e à razão de fluido podem ser vistos na Tabela 6.5-1.

Tabela 6.5-1: Resultados de G' e Rf para cada experimento

Exp #	Di	Do	Du	G'	Rf
1	1,500	1,500	2,500	0,4449	0,1590
2	2,000	2,000	2,000	0,5602	0,3971
3	1,000	1,000	3,000	0,0545	0,0140
4	2,000	2,000	3,000	0,3094	0,1827
5	0,659	1,500	2,500	0,2835	0,1868
6	1,500	0,659	2,500	0,1326	0,0258
7	1,500	1,500	2,500	0,4364	0,1593
8	2,000	1,000	2,000	0,2439	0,1320
9	1,500	2,341	2,500	0,6464	0,3102
10	1,000	2,000	3,000	0,2626	0,0565
11	1,500	1,500	2,500	0,4434	0,1591
12	2,341	1,500	2,500	0,2267	0,1820
13	1,000	1,000	2,000	0,2966	0,1034
14	1,500	1,500	1,659	0,4260	0,3540
15	2,000	1,000	3,000	0,1140	0,0480
16	1,000	2,000	2,000	0,7968	0,3355
17	1,500	1,500	3,341	0,2196	0,0543

Em seguida, os resultados encontrados foram ajustados pelo programa *Essential Regression*, com um valor de R² igual a 0,955 onde foi gerada a seguinte equação para eficiência reduzida:

$$G' = - 1,329 + 0,3645*Di + 1,15128*Do + 0,5681*Du - 0,2507*Di*Di - 0,06076*Do*Do - 0,1550*Du*Du - 0,0983*Di*Do + 0,1977*Di*Du - 0,2065*Do*Du$$

Essa equação para G' foi, então, tratada no suplemento Solver com o objetivo de encontrar o máximo valor para este parâmetro. Isto foi feito levando-se em consideração algumas restrições de limites impostas pelo próprio programa em relação às dimensões e, além destas, foram adicionadas:

- Rf ≤ 10% (para garantir que a água sairá efetivamente clarificada)
- Di ≥ 1mm (para evitar que ocorra cisalhamento das gotas de óleo prejudicando a separação)

Dessa maneira, o programa buscou a máxima eficiência de separação considerando as restrições impostas e levando em conta os experimentos realizados, e as dimensões ótimas encontradas foram:

$$D_i = 1,5 \text{ mm}$$

$$D_o = 2 \text{ mm}$$

$$D_u = 2,6 \text{ mm}$$

É importante destacar que a eficiência encontrada com a otimização foi de 54,4%, que é menor que a maior eficiência encontrada com os experimentos realizados. Isto porque R_f máxima foi limitado, como dito anteriormente, e, assim, o programa de otimização atingiu a máxima G' obedecendo a esta restrição, levando a um resultado de R_f exatamente igual a 10%.

Os resultados foram bastante satisfatórios e a Figura 6.5-I mostra a relação praticamente linear entre a eficiência obtida e a prevista.

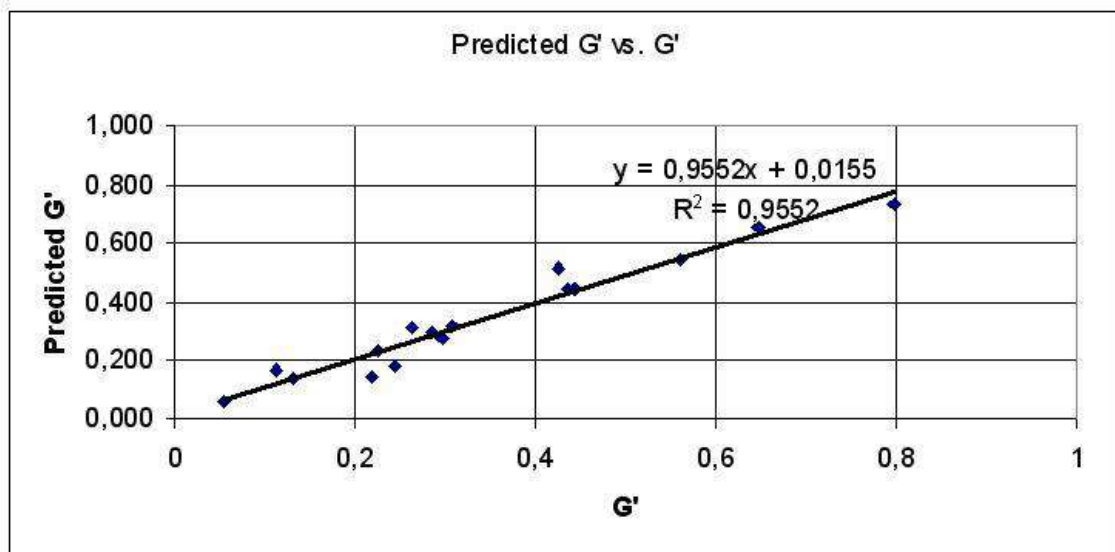


Figura 6.5-I: Relação entre G' obtido e previsto.

6.6. Simulações com a Geometria Ótima

Para concluir esse trabalho, foram realizadas simulações com diferentes diâmetros de gota de óleo, como mostra a Tabela 6.6-1.

Tabela 6.6-1 – Experimentos para diferentes diâmetros de gota

Exp #	D óleo (µm)
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30
6	35
7	40

A seguir, foi gerado um gráfico relacionando os diâmetros de gota de óleo com a eficiência de separação, como mostra a Figura 6.6-I.

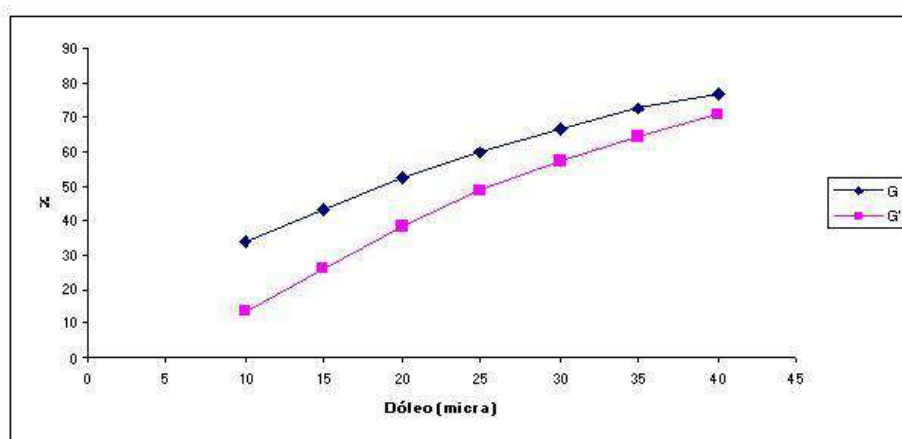


Figura 6.6-I – Relação entre $D_{\text{óleo}}$ e G'

Pelo gráfico mostrado, é possível obter, então, o valor para d'_{50} (diâmetro de gota com 50% de eficiência de separação):

$$d'_{50} = 26 \mu\text{m}$$

Na literatura (Plitt, 1976) há uma relação entre a eficiência granulométrica reduzida e os diâmetros de gota, mostrada a seguir.

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

A partir desta relação e dos resultados obtidos, pôde-se estimar o valor de n , que foi igual a 1,4 (coeficiente angular da reta), como mostra a Figura 6.6-II.

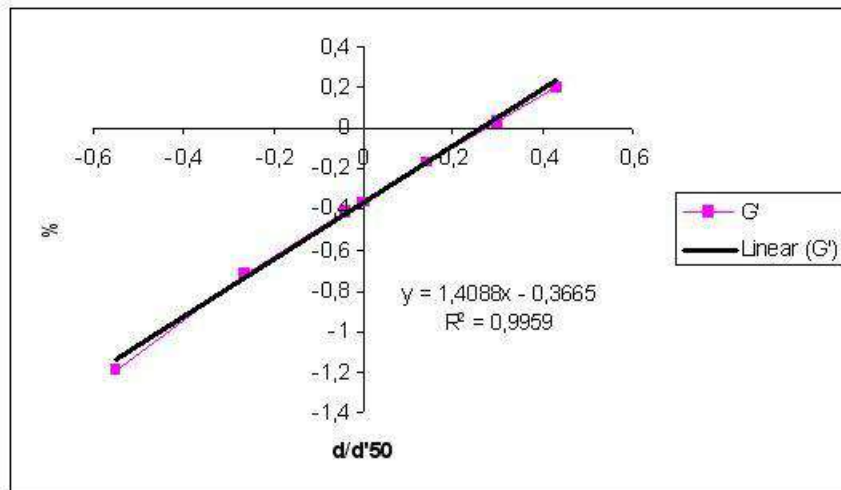


Figura 6.6-II – Relação entre d/d'_{50} e G'

Para estimar a eficiência total de separação do óleo, é necessário conhecer a distribuição de tamanhos de gota de óleo típica. Uma vez que não se encontram disponíveis na literatura distribuições típicas para corrente em refinarias, foram usadas distribuições de gotas em poços de produção de petróleo. Como este valor varia muito de acordo com a idade do poço, foram utilizadas duas faixas de distribuição para se trabalhar em uma faixa ampla: uma fina e uma grossa.

COLMAN et. al (1980) apresenta, em seu trabalho, uma distribuição fina típica encontrada na produção de petróleo (Figura 6.6-III).

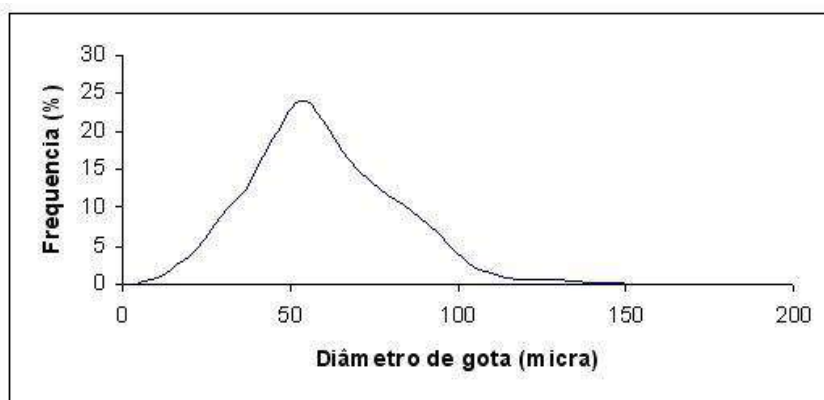


Figura 6.6-III – Relação entre diâmetro de gota e a respectiva frequência

A partir dessa curva foi feita a curva de frequência acumulada, mostrada na Figura 6.6-IV:

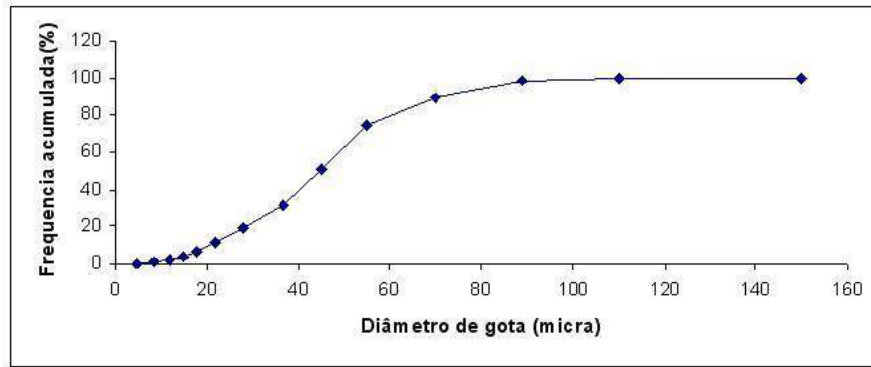


Figura 6.6-IV – Relação entre diâmetro de gota e a respectiva frequência

Para a estimativa dos parâmetros k e m , foi utilizado modelo de Weibull, que apresenta a seguinte equação, onde a é o diâmetro mínimo:

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

A equação linearizada pode ser escrita da seguinte forma:

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - y} \right) \right) = m \ln(d - a) - m \ln k$$

A estimativa dos parâmetros k e m foi feita a partir da linearização da curva mostrada anteriormente, descartando-se o primeiro e o último ponto, e o resultado pode ser visto nos coeficientes angular e linear na Figura 6.6-V .

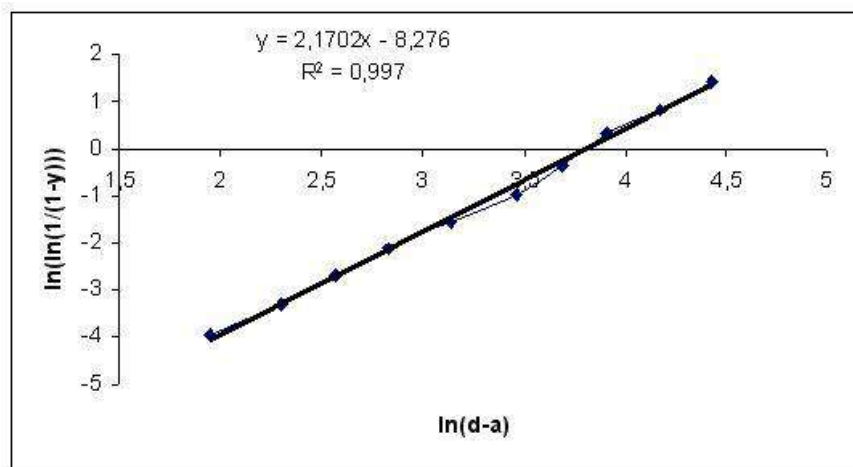


Figura 6.6-V – Gráfico representando a equação de Weibull linearizada

Para encontrar uma relação do tipo $d(y)$, explicita-se o diâmetro na equação do modelo de Weibull em relação a y :

$$d = a + k \ln(-\ln(1 - y))^{1/m}$$

Assim, substituindo-se a expressão $d(y)$, encontrada pelo modelo de Weibull, na equação para G' , chega-se à seguinte relação:

$$G = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{a + k \{[-\ln(1 - y)]^{1/m}\}}{d'_{50}} \right)^n \right]$$

Integrando-se a relação anterior, tem-se a eficiência global reduzida (E'_T)

$$E'_T = \int_0^1 G' dy$$

Para calcular a eficiência global, utiliza-se a relação já mostrada anteriormente entre eficiência e razão de fluido. Assim, a eficiência global do hidrociclone para a distribuição fina foi de 76,6%.

Este procedimento foi repetido para uma distribuição grossa de tamanhos de gotas, mostrada na Figura 6.6-VI (Belore et al, 1998)

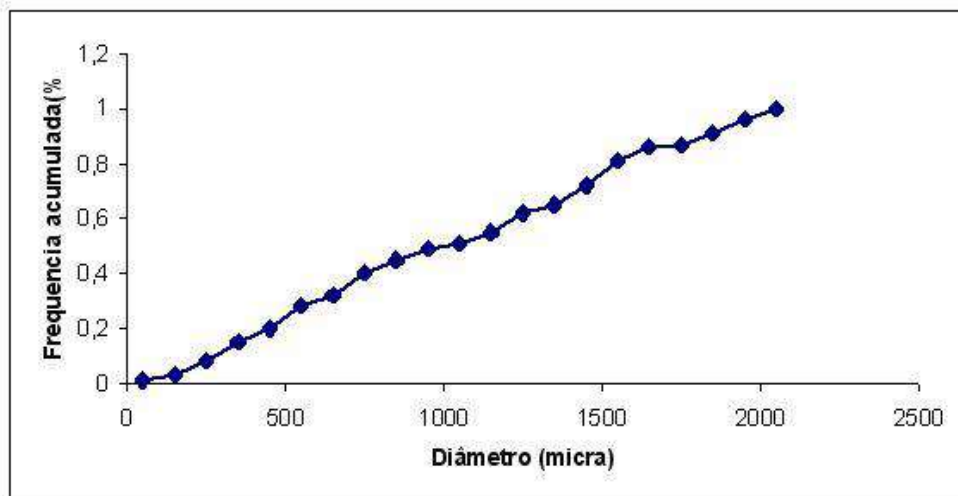


Figura 6.6-VI – Relação entre diâmetro de gota e frequência acumulada

A eficiência encontrada para a distribuição grossa foi de 97,4%. Como esperado, o valor encontrado foi maior que o referente à distribuição anterior, visto que a eficiência é diretamente proporcional ao diâmetro de gota.

7. CONCLUSÕES

A partir das simulações realizadas nesse trabalho foi possível obter uma geometria ótima para um hidrociclone destinado à separação de dispersões óleo/água para as condições especificadas. O hidrociclone otimizado apresentou uma eficiência granulométrica reduzida estimada de 54,4% para tamanho de gota igual a $25\mu\text{m}$ e seus diâmetros de entrada, *overflow* e *underflow* iguais a 1,5 mm, 2 mm e 2,6 mm, respectivamente.

Cabe destacar que houve algumas dificuldades na execução desse trabalho, tais como grande número de casos a serem simulados, grande conjunto de resultados a serem analisados e validados, além do grande tempo computacional gasto.

É importante ressaltar que, fazendo-se uso das técnicas de CFD, ainda não se tem o entendimento completo de determinados escoamentos, pois alguns modelos matemáticos não representam com fidelidade a diversidade de fenômenos encontrada na natureza. Além disso, os modelos existentes ainda não são suficientemente precisos para que se tenham resultados totalmente coerentes com a prática.

Em relação às características das simulações, o esquema Upwind não gera resultados 100% coerentes, pois este esquema é difusivo e não-conservativo, porém, por questões de tempo computacional o mesmo foi utilizado. Assim, para resultados ainda melhores poder-se-ia utilizar o esquema *High Resolution*.

Finalmente, a metodologia para otimização de hidrociclones desenvolvida nesse trabalho pode, ainda, ser utilizada em diferentes aplicações na indústria química e do petróleo.

7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser citados os seguintes itens:

- Simular os casos deste trabalho utilizando o modelo algébrico (ASM), para fins comparativos com os resultados do modelo Euleriano;
- Estudar os fenômenos de quebra de gotas no tubo da alimentação, pois isto faria com que a eficiência de separação fosse inferior devido ao tamanho reduzido das gotas;

- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com dados experimentais nas mesmas condições;
- Estudar o melhor conjunto de parâmetros para tratar os resíduos das simulações, de maneira que este diminua com o tempo e não mais fique estabilizado; e
- Simular novos casos com diferentes correntes de alimentação para validar a metodologia utilizada nesse estudo de otimização.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bradley, D. - "The Hydrocyclone" - Pergamon Press - Londres - 1965.

Carvalho, A. T., "Otimização de Ciclone para a Pré-separação de Areia na Produção de Petróleo" - 2008 - Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.

CFX (2008), CFX 11.0 Solver Theory Guide, Ansys Inc., Berkeley.

Colman, D. A., Thew, M. T. - "Hydrocyclone to give a highly concentrated sample of a lighter dispersed phase" - Paper presented at an International Conference on Hydrocyclones - Cambridge, U.K. - October, 1980 - p. 209 - 223.

Colman, D. A., Thew, M. T. - Paper presented at an 2rd International Conference on Hydrocyclones - 19 - 21 September, 1984 - p.217-232.

Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução - Resolução N° 392, de 8 de agosto de 2007, que dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências.

Dai, G.Q., Li, J.M., Chen, W.M. - "Numerical Prediction of the Liquid Flow within a Hydrocyclone" - Chemical Engineering Journal, 74, p. 217-233 - 1999.

Deissler, R.G. - "Turbulent Fluid Motion" - Taylor & Francis - Philadelphia - 1998.

Dyakowsky, T., Williams, R.A. - "Modelling Turbulent Flow within a Small-Diameter Hydrocyclone" - Chemical Engineering Science, 48, No. 6, p. 1143-1152 - 1993.

Ferziger, J.H., Péric, M. - "Computational Fluid Dynamics applied to the analysis of deoiling hydrocyclone performance" - Trans Institute of Chem Eng - Vol. 68 - p. 365-383, 1990.

Hargreaves, J. H., Silvester, R. S. - "Computational Fluid Dynamics applied to the Analysis of Deoiling Hydrocyclone Performance" - Trans. Institute of Chem. Eng - v. 68, part A, p. 365-383 - 1990.

Hashmi, K. A., Hamza, H. A., Wilson, J. C. - "Canmet hydrocyclone: an emerging alternative for the treatment of oily waste streams" - Science Direct - 2004.

Herckert, M. G. - “Fluidodinâmica computacional e suas aplicações” - 2004.

Hinze, J. O. – “Turbulence – An Introduction to its Mechanisms and Theory” - Mc Graw-Hill book Company Inc. - 1959.

“Hydrocyclone for oil-from-water separation” - Filtration & Separation - April, 1996 - Pg. 291.

Launder, B. E. – “Second moment closure: present and future?” - Int. J. Heat and Fluid Flow - vol. 10, No. 4, p. 282- 300 - 1989.

Leahy-Dios, A., “Estudo da Separação Água-Óleo em Hidrociclones Através de Fluidodinâmica Computacional - Influência do Ângulo da Seção Cônica” - 2003. 83 f. - Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo. Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.

Malhotra, A., Branion, R.M.R., Hauptmann, E.G. – “Modelling the Flow in a Hydrocyclone” - The Canadian Journal of Chemical Engineering, 72, p. 953-960 - 1994.

Maliska, C.R. - Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, 2ª ed., LTC Editora, Florianópolis, Brasil - 2004.

Mancuso, P. C. S., dos Santos, H. F. (ed.) - “Reuso de Águas” - Barueri, SP – Manole - 2003.

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

Medronho, R. A. ; Russo, C. ; Olteanu, D. . “Application of Hydrocyclones to the Treatment of Oil Wastes” - Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Engenharia Química - Vol. 9 - n. 002 - p. 41-54 - 1992.

Moraes, C. A. C. - “Modelo Fluidodinâmico para Estimativa de Eficiência em Hidrociclone para Águas Oleosas” Dissertação de Mestrado - 1994 - Rio de Janeiro - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Nezhati, K., Thew, M. T. – “Aspects of the Performance and Scaling of Hydrocyclones for Use with Light Dispersions” - 3rd Int. Conference on Hydrocyclones - Oxford, England - Paper G1, p. 167-180 - 1987.

Olteanu, D., “Hidrociclones Na Separação Líquido/Líquido” - Abril, 1990 - Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientador: Ricardo de Andrade Medronho

Pecora, R.H.G. - “Separação de Emulsões óleo-água em hidrociclones” - Dissertação de Mestrado, UFU - Uberlândia - 2002.

Pinto, R. C. V. ; Medronho, R. A. ; Castilho, L. R., “Influência das Proporções Geométricas e da Queda de Pressão na Separação de Células CHO com Hidrociclones” - In: XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2004, 2004, Uberlândia. Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2004 - Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

Pinto, J. C. ; Lage, P. L. C. – “Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química” – 1ª ed. - Rio de Janeiro - E-papers Servicos Editoriais Ltda., 2001 - v. 1. 316 p.

Plitt, L.R. – “A mathematical model of the hydrocyclone classifier” - CIM Bull. 69, 114–123 – 1976.

Preece, W. K., Smith, J. E., Craven, R. P. M. - “An Empirical model for a hydrocyclone: reject rate versus orifice size and pressure ratio” - Flow meas. Instrum. - Vol. 1 - October, 1990.

Svarovsky, L. – “Solid-Liquid Separation” - 3rd Ed. – Butterworths – London - 1990.

Telles, A. S. - “Application of the Methods of Extended Thermodynamics to Closure of Turbulence” - Latin American Applied Research - 2003.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. - “An introduction to Computational Fluid Dynamics (The Finite Volume Method)” - Prentice Hall - 1995.

Wood, P. - Paper presented at an 3rd International Conference on Hydrocyclones - 30 September - 2 October, 1987 - p.167-180.

Young, G. A. B., Wakley, W. D., Taggart, D. L., Andrews, S.L., Worrell, J. R. - “Oil-water separation using hydrocyclones: An experimental search for optimum dimensions” - Science Direct - 1993.