



**Universidade Federal do Pampa
Programa de Pós-graduação em Engenharia**

ARTUR DUARTE DE MOURA

**ANÁLISE E PROJETO DE HIDROCICLONES PARA O ESPESSAMENTO DO
LODO GERADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS TÊXTEIS**

Bagé
2015

ARTUR DUARTE DE MOURA

**ANÁLISE E PROJETO DE HIDROCICLONES PARA O ESPESSAMENTO DO
LODO GERADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS TÊXTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida

Bagé
2015

ARTUR DUARTE DE MOURA

**ANÁLISE E PROJETO DE HIDROCICLONES PARA O ESPESSAMENTO DO
LODO GERADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS TÊXTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Dissertação apresentada em: 03 de dezembro de 2015.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador
UNIPAMPA

Profa. Dra. Gabriela Silveira da Rosa
UNIPAMPA

Prof. Dr. Marcilio Machado Morais
UNIPAMPA

Dedico esta dissertação a todos que direta ou indiretamente participaram dessa caminhada e em especial a minha esposa, Tanara Rodrigues de Moura, que estando sempre ao meu lado demonstrou ser a maior incentivadora de onde sempre fortaleceu minha esperança sendo uma fonte inesgotável de apoio, amor, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida, pela confiança, credibilidade e principalmente disponibilidade por estar sempre junto na realização deste trabalho, além de todo apoio e encorajamento e acima de tudo, a amizade que sempre demonstrou.

Aos meus pais Adão Severo de Moura e Nilma Maron Iost pela educação, ensinamentos, amor e suporte emocional com que sempre acompanharam a minha formação.

Aos meus irmãos Alexandra de Moura, Jamir Jost, Deise Jost e Joni Jost pelo apoio e incentivo.

Aos meus sogros Leopoldo dos Santos Rodrigues e Sirlei Tereza Peripolli Rodrigues por sempre acreditarem e incentivarem meus estudos e meu trabalho.

Aos diversos educadores e mestres que conviveram ao longo da minha jornada educacional, em especial, Ligia Girardon, Jarbas Patias, Gilberto Orengo de Oliveira, Alice Kozakevicius, Gabriela Silveira da Rosa que foram incentivadores tanto para minha escolha como para minha prática profissional.

Aos amigos, colegas de trabalho e de formação, em especial Lucas Carvalho, Camila Flores, Akel Kanaã, Gregori Avila, Aline Arim, Luis Henrique Trevisan, Gustavo Gonçalves, Guilherme Casanova e Gabriel Rosa pelo apoio, discussões, viagens e aprendizagens no desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

“É fundamental diminuir a distância entre o que se diz e o que se faz, de tal forma que, num dado momento, a tua fala seja a tua prática”.

Paulo Freire

RESUMO

O descarte de efluentes industriais e residenciais em corpos hídricos ganha cada vez mais atenção da fiscalização dos órgãos ambientais. Assim, é crescente a contribuição de grupos de pesquisas científicas em desenvolver novas tecnologias que contribuam para que esses descartes sejam menos prejudiciais à natureza. A indústria têxtil contribui com uma grande geração de poluentes que quando não são devidamente tratados se tornam agravante problema ambiental. Uma das matérias primas da indústria têxtil é a lã de ovinos. Devido às condições como são criadas as ovelhas, para o processamento industrial dessa lã é indispensável a retirada da maior parte possível de impurezas por meio da lavagem, para então ser transformada em fio pelo processo de cardar e por fim ser fiada e tingida. A alta temperatura e pH que são utilizados na lavagem contribuem significativamente para a geração dos lodos como efluente e a alta quantidade de água utilizada faz com que este efluente fique bastante úmido. O método mais comum de tratamento desse tipo de efluente se dá por meio da decantação ou sedimentação através de tratamento biológico via sistema de lodos ativados. Apesar de apresentar uma boa eficiência, esse método não é suficiente para remoção de compostos orgânicos dissolvidos, além de produzir grande volume de lodo. Algumas opções como a secagem ou hidrociclonagem, contribuem para o espessamento dos lodos gerados durante o tratamento do efluente. Os parâmetros geométricos dos hidrociclones dependem da família a qual ele pertence, as configurações da família *Rietema* e *Bradley* são os que aparecem com mais frequência nos trabalhos da literatura quando se trata de equipamentos com boa eficiência para separação de sólido-líquido. O Rio Grande do Sul, dentre os estados brasileiros, se destaca tanto na produção têxtil como no cenário da pecuária, em especial na produção de lãs de ovinos, por isso o objetivo desse trabalho foi projetar, analisar e simular a fluidodinâmica de hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* para o espessamento do lodo produzido por uma indústria têxtil da cidade de Bagé – RS. Primeiro, foi realizada a caracterização física do lodo do efluente através da obtenção da temperatura, da massa específica da fase líquida e da parte sólida, da sua viscosidade, da sua concentração de sólidos, e da sua distribuição do tamanho médio de partículas. Também foi feita a caracterização química através das medidas do pH, da DQO, da quantidade de matéria orgânica e condutividade elétrica. Com base nesses resultados e nas equações que relacionam a eficiência com diâmetro de corte e com o diâmetro da secção cilíndrica do hidrociclone, foi possível projetar e analisar o comportamento das eficiências dos hidrociclones de configuração *Rietema* e *Bradley*. Também foi verificado com base nas relações de *Euler* e *Reynold* qual dos hidrociclones tem menor gasto energético para uma mesma faixa de eficiência. Por fim, foi realizada a análise numérica por meio de simulação computacional, por CFD utilizando o programa ANSYS para descrever os perfis de velocidade, pressão e o comportamento da fase líquida e sólida no interior dos hidrociclones. Os resultados da caracterização física demonstraram que o lodo possui massa específica de $1000,05 \text{ kg/m}^3$ e o sólido contido no lodo possui uma massa específica de $1002,64 \text{ kg/m}^3$ e diâmetro de partícula de $586 \text{ }\mu\text{m}$ e uma concentração volumétrica de sólidos de 4,2 %. Na sensibilidade paramétrica, os hidrociclones de configuração *Rietema* e *Bradley* se comportaram de maneira bastante semelhante. Os resultados das simulações auxiliaram no conhecimento e na interpretação gráfica de como ocorre o movimento do fluido e a separação das fases no interior do hidrociclone. Na visualização dos perfis de velocidade tangencial, foi observado que esta é maior na região central do hidrociclone, onde retornará por movimento helicoidal ascendente, à fase menos densa. As correntes de pressão mostraram que essa variável é maior próxima nas paredes do hidrociclone, o que provoca a separação das fases. Para análise da eficiência foi utilizado o modelo Lagrangeano com curva de dispersões de sólido em água com mediana de distribuição de $586 \text{ }\mu\text{m}$. Ambos hidrociclones projetados apresentaram uma eficiência de separação de 74 %.

Palavras-chave: Poluição Ambiental, Tratamento de Efluentes, Industria Têxtil, Lodo, Hidrociclone, Fluidodinâmica Computacional.

ABSTRACT

The disposal of industrial and residential wastewater into water bodies has gained increasing attention of surveillance of environmental agencies. So it is increasing the contribution of scientific research groups to develop new technologies to help ensure that these discharges are less harmful to nature. The textile industry contributes a great generation of pollutants that are not properly treated when they become aggravating environmental problem. One of the raw materials of the textile industry is the sheep wool. Due to the sheep conditions are created for the industrial processing of such wool is essential that the largest possible removal of impurities by washing, then to be transformed into yarn by carding process and finally be spun and dyed. The high temperature and pH which are used in the wash contribute significantly to the generation of effluent and sludge as high amount of water used makes this effluent becomes moist enough. The most common method of treatment of this effluent is through decantation or sedimentation through biological treatment through activated sludge system. Despite presenting a good efficiency, this method is not sufficient for removing dissolved organic compounds, besides being very susceptible to the effluent composition and produce large amounts of sludge. Some options like, drying or hydrocycloning, contribute to the thickening of sludges generated during treatment of the effluent. The geometric parameters of hydrocyclones depend on the family to which it belongs, Rietema and Bradley Family settings are appearing more frequently in the work of literature when it comes to equipment with good efficiency for solid-liquid separation. The Rio Grande do Sul, among the Brazilian states, it is so prominent in the textile production and in livestock scenario, especially in wool production of sheep, so the aim of this study was to design, analyze and simulate the fluid dynamics of hydrocyclones type Rietema and Bradley for sludge thickening produced by a textile city of Bage - RS. First the physical characterization was carried effluent sludge by raising the temperature, the density of the fluid phase and the solid part of its viscosity, its solids concentration and its distribution of the average particle size. Also the chemical characterization was done by raising the pH, COD, the amount of organic matter and conductivity. Based on these results and the equations that relate efficiency with cutting diameter and the diameter of the cylindrical section of the hydrocyclone, it was possible to design and analyze the behavior of the efficiencies of Rietema and Bradley configuration hydrocyclones. It also found based on the relationship of Euler and Reynold which the hydrocyclones has lower energy expenditure for the same range of efficiency. Finally, a numerical analysis was carried out through computer simulation by CFD ANSYS software to describe the velocity profile, pressure and performance of liquid and solid phase within the hydrocyclones. The results of the physical characterization showed that the sludge has a specific weight of 1000.05 kg / m³ and the solid contained in the sludge has a specific weight of 1002.64 kg / m³ and a particle diameter of 586 m and a volume concentration of 4,2 %. In parametric sensitivity, the configuration hydrocyclones Rietema and Bradley behaved in much the same way. The simulation results helped in knowledge and graphic interpretation of how occurs the fluid motion and phase separation inside the hydrocyclone. In view of the tangential velocity profiles, it was observed that this is higher in the central region of the hydrocyclone, which returns ascending helical movement, the less dense phase. The pressure currents shown that this variable is greater near the walls of the hydrocyclone, which causes phase separation. To analyze the efficiency we used the Lagrangian model with solid dispersions curve in water with a median of distribution of 586 micrometers. Both hydrocyclones designed showed a 74% separation efficiency.

Keywords: Environmental Pollution. Wastewater Treatment. Textile Industry. Sludge. Hydrocyclone. Computational Fluid Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma dos processos da indústria têxtil.	11
Figura 2.2 – Esquema de tratamento por coagulação/floculação	13
Figura 2.3 – Esquema de tratamento biológico por lodo ativado.....	14
Figura 2.4 – Esquema completo do tratamento.	15
Figura 2.5 – Esquema completo do tratamento com uso de hidrociclones.	18
Figura 2.6 – Separação de misturas em um hidrociclone.	20
Figura 2.7 – Configuração geométrica de um hidrociclone.	21
Figura 2.8 – Eficiência do hidrociclone.....	26
Figura 2.9 – Análise da Eficiência.....	27
Figura 2.10 – Análise da Eficiência Reduzida.	27
Figura 2.11 – Coordenadas cilíndricas.	29
Figura 2.12 – Componentes da velocidade.....	30
Figura 2.13 – Escoamento interno do fluido dentro do hidrociclone.	31
Figura 2.14 – Distribuição radial da pressão no interior do hidrociclone.	32
Figura 2.15 – Hidrociclone HC11 com suas configurações características (em mm).....	41
Figura 3.1- Esquema de processo de geração de lodo em indústria têxtil	44
Figura 3.2 - Lodo de efluente gerado em indústria têxtil do município de Bagé.	45
Figura 3.3 – Fluxograma resumido das etapas do trabalho.	46
Figura 3.4 - Fotografia ilustrativa da análise da DQO.	48
Figura 3.5 - Fotografia ilustrativa da análise da matéria orgânica.	49
Figura 3.6 - Fotografia ilustrativa do elutriador.	51
Figura 3.7 - Hidrociclones projetados.	53
Figura 3.8 - Fluxograma dos passos para simulação em CFD.	55
Figura 3.9 - Hidrociclone geometrizado no software ANSYS.....	56
Figura 3.10 - Exemplo de malha hexaédrica	57
Figura 3.11 - Diferença entre malha estruturada e não estruturada.....	58
Figura 3.12 - Elementos de malha.	59
Figura 3.13 - Discretização de um domínio em um sistema de equações algébricas.....	61
Figura 3.14 - Esquema da aplicação do balanço de conservação em um volume de controle.	62

Figura 4.1- Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas.....	66
Figura 4.2 - Eficiência de coleta em função da vazão de alimentação.....	68
Figura 4.3- Eficiência de coleta em função da massa específica do sólido.....	68
Figura 4.4- Eficiência de coleta em função da concentração de sólido.....	69
Figura 4.5- Eficiência em função do diâmetro de partícula.	70
Figura 4.6- Perda de carga nos hidrociclones projetados em função da vazão de alimentação do lodo.....	70
Figura 4.7 - Fotografia ilustrativa dos hidrociclones projetados.	71
Figura 4.8 - Testes de malha para geometria <i>Rietema</i>	73
Figura 4.9 - Testes de malha para geometria <i>Bradley</i>	74
Figura 4.10 - Perfil de velocidade do hidrociclone para configuração <i>Rietema</i>	75
Figura 4.11 - Perfil de velocidade do hidrociclone para configuração <i>Bradley</i>	75
Figura 4.12 - Perfil de pressão do hidrociclone para família <i>Rietema</i>	76
Figura 4.13 - Perfil de pressão do hidrociclone para família <i>Rietema</i>	76
Figura 4.14 - Malha construída para hidrociclone da família <i>Rietema</i>	78
Figura 4.15 - Malha construída para hidrociclone da família <i>Bradley</i>	79
Figura 4.16 - Convergência do método para simulação bifásica.....	80
Figura 4.17 - Volume de massa da fase em suspensão.....	81
Figura 4.18 - Perfil de velocidade da simulação bifásica	83
Figura 4.19 - Linhas de corrente.....	84
Figura 4.20 - Linearização dos valores de eficiência simulados.	85
Figura 4.21 - Eficiência do modelo simulado em comparação com a eficiência projetada.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Padrões de Lançamento de Efluentes.	7
Tabela 2.2 - Família de hidrociclones.	22
Tabela 2.3 – Parâmetros de configuração do hidrociclone e condições operacionais recomendadas	23
Tabela 3.1 - Vazões e o tempos de cada fase dos ensaios de elutriação.	52
Tabela 3.2 - Razão em função do diâmetro da secção cilíndrica das famílias de hidrociclones.	54
Tabela 4.1 - Resultados da análise química do lodo do efluente da indústria têxtil.....	64
Tabela 4.2 - Caracterização física do lodo do efluente da indústria têxtil.....	65
Tabela 4.3 - Valores “ R_L ”, “ $f(R_L)$ ”, “ $g(C_v)$ ” e β calculados para os hidrociclones <i>Rietema</i> e <i>Bradley</i>	67
Tabela 4.4 - Dimensões dos hidrociclones tipo <i>Rietema</i> e <i>Bradley</i> projetados.....	67
Tabela 4.5 – Construção das malhas para simulação computacional.....	72
Tabela 4.6 – Testes de malhas para simulação computacional	77
Tabela 4.7 – Condições de contorno e parâmetros do processo para simulação bifásica	80

LISTA DE SIGLAS

ABIT - Associação Brasileira de Indústrias Têxtil e Confeccões
ARCO – Associação Brasileira de Criadores de Ovinos
CONDEMA – Conselhos Municipais de Defesa ao Meio Ambiente
CF – Constituição Federal
CFD – Computation Fluid Dynamics
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO - Demanda Química de Oxigênio
ETA – Estação de Tratamento de Água
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEPAM – Fundação Estadual de Proteção do Meio Ambiente
FIRGS – Federação das Industrias do Rio Grande do Sul
pH – Potencial Hidrogeniônico
RS – Estado Federativo do Rio Grande do Sul
SINDITÊXTIL - Sindicato das Indústrias Têxteis
UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

Parâmetro	Nome	Dimensão
A, B, C, β, K	Constantes Adimensionais	[-]
A_g	Área projetada da partícula na direção do escoamento	[L ²]
C_a	Coefficiente de arraste	[-]
$C_{\mu}, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k$ e σ_{μ}	Constante do modelo de turbulência $k - \epsilon$	[-]
C_v	Concentração Volumétrica	[ML ⁻³]
C_{wu}	Concentração Mássica do <i>underflow</i>	[-]
C_{wi}	Concentração Mássica da alimentação	[-]
D_C	Diâmetro da secção cilíndrica	[L]
D_i	Diâmetro da secção de alimentação	[L]
D_o	Diâmetro da secção de <i>overflow</i>	[L]
D_s	Diâmetro de Sauter	[L]
D_u	Diâmetro da secção de <i>underflow</i>	[L]
D^*	Diâmetro de corte	[L]
d_p	Diâmetro médio de partícula	[L]
d_{pi}	Diâmetro de Stokes	[L]
DPR	Razão da queda de pressão	[-]
E	Empuxo	[MLT ⁻²]
E_u	Número de Euler	[-]
F_a	Força de arraste	[MLT ⁻²]
F_p	Força peso	[MLT ⁻²]
g	Aceleração da gravidade	[LT ⁻²]
h	Altura da parte cilíndrica	[L]
H	Altura da parte cônica	[L]
H_f	Perda de Carga	[ML ⁻¹ T ⁻²]
L	Altura total do hidrociclone	[L]
l	Altura do vórtex finder	[L]
M_{HC}	Massa de hidrocarbonetos	[M]
M_f	Massa final de solução após evaporação do solvente.	[M]
m_f	Massa de Fluido	[M]
M_i	Massa inicial na análise.	[M]
P_1, P_2, P_3 e P_4	Pressão nos pontos correspondentes	[ML ⁻¹ T ⁻²]
P'	Pressão modificada	[ML ⁻¹ T ⁻²]
Q	Vazão volumétrica de fluido	[L ³ T ⁻¹]
R	Raio do cilindro	[L]
R_e	Constante de <i>Reynolds</i>	[-]
R_f	Razão de Fluido	[-]
t	Tempo de escoamento no viscosímetro	[T]
u_c	Velocidade no campo cilíndrico	[LT ⁻¹]

v	Velocidade relativa entre partícula e fluido	$[LT^{-1}]$
v_a	Velocidade atuando no campo axial	$[LT^{-1}]$
v_r	Velocidade atuando no campo radial	$[LT^{-1}]$
v_t	Velocidade terminal	$[LT^{-1}]$
v_x	Velocidade na direção x	$[LT^{-1}]$
v_θ	Velocidade atuando no campo tangencial	$[LT^{-1}]$
X_i	Fração mássica de sólido em cada elutriação	$[M]$
W_u	Vazão mássica no <i>underflow</i>	$[MT^{-1}]$
W_i	Vazão mássica na alimentação	$[MT^{-1}]$
W_{Su}	Taxa mássica de sólido que sai do <i>underflow</i>	$[MT^{-1}]$
W_S	Taxa mássica de sólido presente na alimentação.	$[MT^{-1}]$
Z	Altura	$[L]$

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

η	Eficiência granulométrica	$[-]$
η'	Eficiência granulométrica reduzida	$[-]$
θ	Ângulo da secção cônica	$[-]$
ρ	Massa específica do fluido	$[ML^{-3}]$
ρ_s	Massa específica do sólido	$[ML^{-3}]$
$\Delta\rho$	Diferença entre as massas específicas	$[ML^{-3}]$
Δp	Queda de pressão	$[MT^{-1}L^{-1}]$
γ	Intensidade do campo de força	$[L^2T^{-1}]$
M	Viscosidade do fluido	$[ML^{-1}T^{-1}]$
μ_c	Velocidade na secção cilíndrica	$[LT^{-1}]$
μ_{eff}	Viscosidade efetiva	$[ML^{-1}T^{-1}]$
μ_T	Viscosidade turbulenta	$[ML^{-1}T^{-1}]$
τ	Tensão de cisalhamento	$[ML^{-1}T^{-2}]$
Φ	Angulação em coordenadas cilíndricas	$[-]$
π	constante = 3,1416	$[-]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A Indústria Têxtil no Rio Grande do Sul e Aspectos Ambientais.....	4
2.2 Matérias-Primas da Indústria Têxtil.....	8
2.3 Geração, Caracterização e Tratamento dos Efluentes na Indústria Têxtil.....	10
2.3.1 Preparação da Matéria-Prima e Fiação	11
2.3.2 Tecelagem e Malharia	16
2.3.3 Tingimento, Estamparia, Acabamento/Beneficiamento	16
2.4 Hidrociclones e sua Aplicação na Indústria Têxtil.....	17
2.4.1 Surgimento do hidrociclone e suas atuais vantagens	18
2.4.2 Funcionamento de um hidrociclone e o seu formato físico.....	20
2.4.3 Projeto de Hidrociclone e variáveis envolvidas	23
2.5 Modelagem Matemática e Métodos Numéricos em Fluidodinâmica.....	28
2.5.1 Problema físico e a modelagem matemática no escoamento de hidrociclone	29
2.5.2 Modelos de turbulência	34
2.5.3 Resolução numérica do escoamento em hidrociclones.....	36
2.5.4 Simulação computacional do escoamento em hidrociclone	37
2.6 Estado da arte da aplicação dos hidrociclones.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Matéria-Prima e Contextualização	44
3.2 Caracterização Química e Física do Lodo da Indústria Têxtil	47
3.3 Projeto dos Hidrociclones da Família <i>Rietema</i> e <i>Bradley</i> e Análise da Sensibilidade Paramétrica.....	53
3.4 Simulação dos hidrociclones projetados.....	55
3.4.1 Geometria e Criação de Malhas	56
3.4.2 Construção das Malhas	58
3.4.3 Testes de Malha - Simulação Monofásica	60

3.4.4 Simulação Bifásica.....	62
3.4.5 Cálculo da Eficiência	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 Caracterização do Lodo	64
4.2 Projeto dos Hidrociclones da Família <i>Rietema</i> e <i>Bradley</i> e Análise da Sensibilidade Paramétrica.....	67
4.3 Geometrias Usadas nas Simulações	71
4.4 Simulação Monofásica - Testes de Malha	72
4.5 Simulação Bifásica.....	80
4.6 Eficiência	85
5 CONCLUSÕES	88
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Após o movimento ambiental, iniciado nos Estados Unidos no final dos anos 1960, muitas leis foram surgindo com a intensão de proteger os recursos naturais do planeta e controlar problemas ambientais como queimadas, secas, enchentes, poluição do ar e das águas. Mihelcic et al. (2012) relata que mesmo existindo a preocupação para reparar os danos ambientais mais óbvios, a preocupação em manter a economia em constante crescimento traz desafios ambientais, atualmente, mais sutis e mais complexos. Isso faz com que os cientistas, nas últimas décadas, tenham um importante papel no estudo de inovações tecnológicas e a fim de contribuir para manter as empresas legalizadas e principalmente contribuir com um mundo mais sustentável.

Um dos problemas ambientais existentes atualmente, citado por Mihelcic e Zimmerman (2012), Sant' Anna (2010), Arim (2014), é quanto à questão da carência de água potável, sendo esse um elemento essencial à vida e à saúde dos seres vivos. Esses e outros autores definem a escassez de água como a situação na qual seu uso não satisfaz as necessidades humanas normais, alertando que quase dois bilhões de pessoas hoje sofrem devido a severa escassez de água. Projeta-se que mais um bilhão de pessoas enfrentarão escassez de água até 2025, isso demonstra a importância de pesquisas e estudos para tratamento de recursos hídricos, pois o aumento de escassez de água está diretamente relacionado ao aumento de poluentes e efluentes industriais descartados em mananciais.

É notável a importância da indústria na geração de emprego, renda e desenvolvimento social de uma região, porém a instalação de indústrias geralmente está associada a uso de recursos naturais ou a sua degradação. Por isso, cada vez mais os setores de fiscalização estão exigindo e cobrando das indústrias uma ação mais sustentável. Segundo Azevedo (2010), a indústria têxtil tem uma grande contribuição na geração de poluentes que quando não são devidamente tratados se tornam agravante problema ambiental.

Nas indústrias, presencia-se diversas formas de tratamentos de efluentes, fundamentados em princípios físicos e químicos, podendo ser por meio de coagulação, decantação ou sedimentação através de tratamento biológico via sistema de lodos ativados. Porém, apesar de apresentar uma boa eficiência, essas formas de tratamento não são suficientes para remoção de compostos orgânicos dissolvidos, além de produzir grande volume de lodo, que por sua vez apresenta uma grande quantidade de água misturada com outras impurezas, que tornam impróprio a reutilização desses e aumentando o descarte de

poluentes na natureza. É importante o estudo de outros meios que possam separar as fases líquidas e sólidas, oportunizando a reutilização tanto de água como de sólidos.

Massarani (2002) relata que os métodos de secagem e hidrociclonagem consistem na retirada do maior nível possível de umidade do efluente e podem ser utilizadas como um recurso a mais no tratamento do efluente, inclusive nos casos onde os líquidos e os sólidos separados por um desses processos podem ser reutilizados ou comercializados, por meio da reciclagem.

Por exemplo, na indústria têxtil, quando não há presença de contaminantes, como metais pesados, a água pode ser reutilizada nos processos de lavagem de matéria-prima e os sólidos podem ser comercializados pelo setor agrário para balancear o pH e os nutrientes do solo. Em específico, os hidrociclones utilizados para o espessamento de lodos e de efluentes industriais são equipamentos que tem a função de separação de matérias de diferentes massas específicas.

Atualmente os hidrociclones têm destaque na indústria petrolífera, para separação de misturas de sistemas bifásicos, tanto envolvendo líquido-líquido como sólido-líquido. Existe o uso de hidrociclones, em menor escala na agricultura, no caso da filtragem de água para irrigação evitando erosão. Também em indústrias preocupadas em reduzir os níveis de poluentes em baixa atmosfera, como o caso de indústrias de argamassa e cimento, indústria de celulose e das estações de tratamento de água e esgoto.

Os parâmetros geométricos dos hidrociclones dependem da família a qual eles pertencem, sendo os hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley*, os que aparecem com mais frequência nos estudos científicos (MASSARANI, 2002). As principais vantagens no uso de hidrociclones estão no baixo custo de instalação, pois envolve apenas separação física, como a economia na aquisição, manutenção e da facilidade de manuseio (SILVA, 2012). Com os sólidos, resultantes da separação por hidrociclonagem, é possível dar um novo destino a esses resíduos, muito mais consciente e sustentável, como apresentado nos trabalhos de Chao et al. (2004), Ucker et al. (2010) e Moreira et al. (2001) há relatos de aplicação de lodo na fabricação de cimento, na fabricação de argamassa ou outros materiais de construção. Já Araújo et al. (2005) descrevem a adição de lodo em solos para agricultura de soja e trigo.

O estado do Rio Grande do Sul, devido o seu clima, vegetação e relevo proporciona às agroindústrias a possibilidade de relacionamento entre diferentes setores, onde uma pode beneficiar a outra, a partir do fornecimento de matéria-prima, reutilização de resíduos ou aquisição de materiais novos. Por exemplo, na região do pampa do Rio Grande do Sul, a pecuária fornece matéria-prima para indústria têxtil. No processo primário da indústria têxtil,

ocorre a lavagem da matéria prima e preparação da mesma para transformação em fios e malhas.

Para Tunay et al. (1996), da lavagem das lãs (uma das matérias primas da indústria têxtil) ocorre a geração dos lodos que surgem do tratamento dos efluentes gerados durante esse processo de lavagem. Esse lodo apresenta um material sólido rico em nutrientes orgânicos que por sua vez, o setor pode fornecer adubo, a partir de seus resíduos para a agricultura. Em outros trabalhos, como citado por Chao et al (2004), Ucker et al. (2010) e Moreira et al. (2001) que sugerem a esse mesmo ramo, que esses resíduos sejam utilizados como matéria-prima na fabricação de tijolos e cimento para indústria de material de construção.

Como a região do pampa do Rio Grande do Sul apresenta um destaque na criação de ovinos, dando suporte a matéria-prima para a indústria têxtil da região da campanha, onde ocorre a transformação da lã em fios, esse trabalho teve como objetivo geral a análise, projeto e simulação fluidodinâmica de hidrociclones para espessamento de lodos gerados durante o tratamento de efluentes no processo de lavagem da lã da indústria têxtil.

Para alcançar tal objetivo, os seguintes objetivos específicos foram atingidos:

1. caracterização do lodo gerado do tratamento do efluente da indústria têxtil realizada por análise química com a obtenção dos parâmetros de condutividade elétrica, pH, DQO e matéria orgânica e análise física com a determinação da massa específica da suspensão, concentração volumétrica e mássica de sólidos na suspensão, massa específica dos sólidos contidos na suspensão, viscosidade da suspensão e distribuição do tamanho médio das partículas contidas na suspensão;
2. projeto dos hidrociclones com configuração *Rietema* e *Brandley* para uma eficiência de 80% de espessamento;
3. análise das alterações dos parâmetros físicos do lodo do efluente na eficiência dos hidrociclones por meio da sensibilidade paramétrica dos hidrociclones;
4. análise numérica da eficiência do hidrociclone projetado para tratamento do lodo do efluente de indústria têxtil com auxílio do software *Fluent – Ansys*, e
5. comparação dos resultados da análise numérica com os do projeto e da análise das alterações dos parâmetros físicos do lodo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica enfoca inicialmente, sobre o panorama cultural, social e econômico da pecuária e da indústria, com destaque à cultura de ovinos e na indústria têxtil na região da campanha do Rio Grande do Sul, dando enfoque à questão ambiental e sugestões de atividades focadas na sustentabilidade. Posteriormente, estão definidos os meios de caracterizar e tratar os efluentes de indústrias têxteis. Compõe esse trabalho o estudo do projeto e análise de hidrociclones com base nas equações de Massarani (2002), um estudo teórico para simulação computacional de hidrociclones e por fim, uma breve explanação de resultados de alguns trabalhos acadêmicos envolvendo o projeto, a análise e a simulação de hidrociclones.

2.1 A Indústria Têxtil no Rio Grande do Sul e Aspectos Ambientais

É histórica a importância da indústria têxtil no cenário econômico gaúcho. Os primeiros estabelecimentos a se instalar em Rio Grande do Sul, no final do século XIX, eram do ramo têxtil, sendo a maioria no extremo sul, devido a estar próximo do porto do Rio Grande. Dados da Federação das Indústrias do Rio Grande do Sul, FIERGS (2013), apontam que o setor têxtil conta com 14 subsetores e 691 estabelecimentos, grande parte desses, 224 estão voltados para fabricação de artefatos para uso domésticos. O segmento de acabamentos de fios é o segundo deles, com 111 estabelecimentos e na fabricação de tecidos e malhas há 82 estabelecimentos.

A indústria têxtil é responsável por 10 mil empregos em todo o estado gaúcho, segundo dados da FIERGS (2013). As empresas de médio e grande porte desse ramo são a minoria, porém são as que concentram a metade do número de empregos e também os que têm melhor média salarial. Tais dados apontam a indústria têxtil, como uma das grandes responsáveis pela geração de renda e desenvolvimento econômico e social do Rio Grande do Sul. No entanto, a preocupação com a consciência ambiental no tratamento e descarte de seus efluentes, seguindo as normas e legislação em questão, é um ponto a ser tratado com atenção.

Nesse tipo de indústria, todo o processo, desde aquisição de matéria-prima, passando pelo tratamento industrial e até o uso do produto final, proporcionam geração de poluentes. O maior percentual se dá no processo industrial, com o uso de grandes quantidades de água,

principalmente na lavagem da matéria-prima e tingimento do produto final. Segundo Tunay et al. (1996), nesses processos, os componentes de destaque contidos no efluente são proteínas, amidos, gorduras e corantes. Além disso, a alta temperatura e faixa de pH (potencial hidrogeniônico) que são utilizados na lavagem contribuem significativamente para a geração dos lodos como efluente, além da alta quantidade de água utilizada que promove a diluição do efluente.

O descarte desses lodos gerados na indústria têxtil em rios, açudes e mananciais é bastante preocupante. Mihelcic e Zimmerman (2012) definem poluição como a introdução de uma substância no ambiente, em níveis que levam à perda dos benefícios de um recurso ou degradação da saúde dos seres vivos. No caso de efluentes descartados em meio aquoso, as partículas nele contidas podem ser classificadas como sólidos, que geralmente não são visíveis a olho nu, mas que podem adsorver matéria orgânica.

O tratamento de água considera partículas na faixa de 0,001 µm a 100 µm. Partículas maiores do que 1 µm são chamadas de sólidos suspensos, enquanto partículas entre 0,001 µm e 1 µm podem ser consideradas partículas coloidais. Constituintes menores que 0,001 µm são denominadas partículas dissolvidas (MIHELICIC E ZIMMERMAN, 2012).

As licenças requeridas para permitir aqueles que necessitam despejar efluentes nas águas superficiais ou subterrâneas partem de padrões que se referem à carga que pode ser despejada. Nos casos onde os controles não são suficientemente rigorosos para manter a qualidade desejada da água é feita uma análise para estabelecer a máxima carga diária total.

Conforme Constituição Federal, o artigo 225 (BRASIL, 1988), ter um meio ambiente ecologicamente equilibrado é um direito de todos, sendo o poder público e a coletividade os responsáveis em defendê-lo e preservá-lo para as futuras gerações. Sendo meio ambiente, definido pela Lei 6.938-81, o artigo 3º (BRASIL, 1981), um conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida e todas as suas formas; meio ambiente: natural, artificial, cultural e do trabalho.

A aplicação, desse artigo da Constituição Federal (CF), depende de ações da Política Nacional do Meio Ambiente, onde é citada a importância de que cada vez mais ocorra conscientização ambiental em todos os níveis escolares, por meio da educação ambiental, além dos princípios ambientais, como a prevenção ao combate da poluição, onde quem desenvolve uma atividade potencialmente poluidora tem que investir para não poluir.

Segundo a CF, (Brasil, 1988) um crime ambiental pode ser apenado de duas formas distintas, pagando para prevenir ou pagando para reparar.

O primeiro caso está se referindo aos danos que não podem ser reparados, quando não há possibilidade de reconstituir o sistema ecológico, como caso de algumas queimadas, poluição de mananciais e do ar, destruição de fontes de água, escavações ou lixões. O segundo caso confere a danos que podem ser reparados, como replantios de matas, reparação de rios, limpezas de terrenos, entre outros.

Os órgãos como Conselho Nacional do Meio Ambiente, (CONAMA), Conselhos Estaduais do Meio Ambiente, (CONSEMA), onde no Rio Grande do Sul atua a Fundação Estadual de Proteção ao Meio Ambiente, (FEPAM), e os Conselhos Municipais de Defesa ao Meio Ambiente, CONDEMA, estão atuando fortemente para que as indústrias cumpram as legislações em vigor e no caso de infrações, esses órgãos estão atribuindo às penalidades, conforme Lei 9.605 (Brasil, 1998).

Na Resolução 430 do CONAMA, são descritos os processos legais com base nos parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de águas. No artigo 3º (CONAMA, 2011) se compreende que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos na resolução e em outras normas aplicáveis. O artigo 16 dessa resolução apresenta as condições e padrões previstos para que os efluentes de qualquer fonte poluidora possam ser lançados diretamente no corpo receptor. Nos itens que seguem são descritos os padrões previstos na Resolução 430.

I - Condições de lançamento de efluentes.

- pH entre 5 a 9.
- Temperatura inferior a 40 °C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3 °C no limite da zona de mistura.
- Materiais sedimentáveis até 1 mL/L em teste de 1 h em cone *Inmhoff*. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar visualmente ausentes.
- Regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente.
- Óleos minerais até 20 mg/L. Óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L.
- Ausência de materiais flutuantes.
- Remoção mínima de 60 % de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20 °C), sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso da existência de estudo

de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

II – Padrões de Lançamentos de Efluentes

No artigo 16 da Resolução 430 (CONAMA, 2011), as indústrias podem consultar os padrões, com quantidades máximas de elementos inorgânicos e de compostos orgânicos que podem ser lançados em água. Os valores dados estão em termos da concentração de elemento, expresso em miligramas (*mg*) pelo volume em litros (*L*), conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Padrões de Lançamento de Efluentes.

Parâmetros Inorgânicos	Valores Máximos (<i>mg/L</i>)
Arsênio Total	0,5 As
Bário total	5,0 Ba
Boro total (Não se aplica para o lançamento em águas salinas)	5,0 B
Cádmio total	0,2 Cd
Chumbo total	0,5 Pb
Cianeto total	1,0 CN
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 CN
Cobre dissolvido	1,0 Cu
Cromo hexavalente	0,1 L Cr ⁺⁶
Cromo trivalente	1,0 Cr ⁺³
Estanho total	4,0 Sn
Ferro dissolvido	15,0 Fe
Fluoreto total	10,0 F
Manganês dissolvido	1,0 Mn
Mercúrio total	0,01 Hg
Níquel total	2,0 Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 N
Prata total	0,1 Ag
Selênio total	0,30 Se
Sulfeto	1,0 S
Zinco total	5,0 Zn
Parâmetros Orgânicos	Valores máximos
Benzeno	1,2
Clorofórmio	1,0
Dicloroetano (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	1,0
Estireno	0,07
Etilbenzeno	0,84
fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5
C ₆ H ₅ OH	1,0
Tetracloroeto de carbono	1,0
Tricloroetano	1,0
Tolueno	1,2
Xileno	1,6

Fonte: Artigo 16, Resolução 430, CONAMA, 2011.

De acordo com a Tabela 2.1, a indústria têxtil deve manter o cuidado ambiental, conforme a legislação apresentada, para fazer os descartes de seus efluentes. É importante destacar que esse setor causa danos ambientais desde o fornecimento da matéria-prima, como resíduos de remédio e produtos pecuários, passando pelo processo industrial, onde há geração de efluentes até o descarte do produto final pelo consumidor.

A partir do que foi apresentado é possível comprovar a importância dos estudos científicos na área de engenharia, matemática, química, física, biologia, economia, sociologia entre tantos outros frente às pesquisas e preocupações do setor industrial para o melhor aproveitamento dos recursos naturais, sendo indiscutível o papel de cada um nas transformações para a busca de um sistema sustentável.

2.2 Matérias-Primas da Indústria Têxtil

A principal matéria-prima que abastece a indústria têxtil no Brasil é o algodão, porém, devido aos períodos de baixa temperatura, no inverno gaúcho, essa planta não foi cultivada no Rio Grande do Sul. Por isso a indústria têxtil, quando surgiu nesse estado, ficou voltada à produção de artigos de lã (VOGT, 2003).

A FIERGS destaca que uma das principais características das indústrias gaúchas, além de ser voltada ao mercado externo e a diversificação, é a forte ligação com o setor agropecuário. A indústria têxtil é um exemplo dessa relação, pois uma das matérias-primas dessa indústria é a lã de ovinos, onde, conforme dados do (FIERGS, 2013) o Rio Grande do Sul, tem grande destaque na sua produção, sendo o maior produtor do país.

Além da ligação com a agropecuária, o ramo de indústria têxtil também movimentou outros setores. A indústria química aparece como grande fornecedora de fibras para matéria-prima, assim como fornecedora de corantes e resinas. Quanto ao segmento de máquinas, há aquisição de equipamentos para fases ou mesmo operações específicas de beneficiamento e acabamento dos produtos (VOGT, 2003). A matéria-prima para a indústria têxtil está associada à aquisição de diversos tipos de fibras, podendo ser química (artificial ou sintética) ou natural (de origem animal ou vegetal).

A celulose natural está presente principalmente nas fibras naturais de origem vegetal, com grande destaque ao algodão. A proteína está presente nas fibras naturais, principalmente nas de origem animal. Já as outras estruturas estão presentes nas fibras químicas, como no caso da celulose sintética e o poliéster (COGO, 2011).

I - Fibras Químicas

As fibras químicas podem ser classificadas como artificiais ou sintéticas. Essas denominações se devem ao fato dessas fibras não serem encontradas naturalmente, tendo a ação do homem para sua fabricação. Segundo Vogt (2003) o processo de produção das fibras químicas artificiais, consiste na transformação química da matéria-prima natural, geralmente celulose. Nesse processo, pode ocorrer geração de efluente contaminada por soda caustica, ácido sulfúrico, acetona, bissulfeto de carbono e ácido acético.

Os mesmos autores conferem que o processo de produção de fibras químicas sintéticas está associada a derivados de subprodutos de petróleo, onde a matéria-prima é adquirida nos primeiros estágios da petroquímica e sua produção final é realizada em outros segmentos da indústria química. As principais delas são o poliéster, o náilon, o acrílico e o polipropileno.

II - Fibras Naturais

As fibras naturais são as fibras que já se encontram prontas na natureza e podem ser tanto de origem vegetal como animal. Tecidos feitos com esses materiais poluem menos, pois o processo de transformar a matéria-prima em fios consiste principalmente de processos físicos (COGO, 2011). Como exemplos de fibras naturais de origem vegetal, Vogt (2003) apresenta o linho, o sisal, a juta e o rami, os dois últimos em extinção. Além desses, se destaca a produção de algodão, principalmente no Brasil. Porém a cultura do algodão apresenta algumas desvantagens por ser uma planta delicada a manifestação de pragas, o que acaba por utilizar grandes quantidades de herbicidas e fungicidas.

Como exemplos de fibras naturais de origem animal, Vogt (2003) apresenta a seda produzida pelo bicho-da-seda e mariposas, como sendo um produto nobre e destaca também a lã de ovinos, que é adequada para fabricação de produtos para inverno. Entre as fibras naturais, a lã é a segunda mais produzida, perdendo apenas para o algodão.

Muitas regiões do mundo têm a cultura de utilizar produtos derivados da lã de ovelha, como blusões, meias, camisas e casacos de lã, durante os períodos de frio. Os longos períodos do inverno gaúcho fez com que se desenvolvesse no estado esse tipo de cultura e também da prática artesanal de vestimentas típicas do gaúcho como o pala, a bombacha, os chiripás, os xales, entre outros que tem como matéria-prima tecidos de lã de ovinos.

Aliado a essa realidade, se desenvolveu no Rio Grande do Sul o cultivo de ovinos, que se adaptaram ao clima e pastagem da região e servindo tanto para o consumo de carne na culinária gaúcha como matéria-prima do setor têxtil.

Segundo dados do FIERGS (2014), no Rio Grande do Sul, a criação de ovelhas perde apenas para a de aves (galinhas e frangos) e de bovinos. Conforme dados da Associação Brasileira de Criadores de Ovinos (ARCO, 2015), as ovelhas são criadas em várias regiões do RS, sendo caracterizada por uma cultura pastoril. Uma vez por ano, sempre no verão, são efetuadas as tosquiadas, processo que consiste na retirada da lã. Também no verão ocorrem as aplicações de remédios para controle de insetos parasitas e para vermífugos.

Segundo dados do FIERGS (2014), a região sudoeste do estado, onde está localizado o município de Bagé, é a que tem maior destaque na cultura de ovinos. Os principais municípios produtores de lã são o de Santana do Livramento, o de Alegrete, o de Uruguaiana, o de Dom Pedrito e o de Quaraí, representando 34,2% do total do estado. Também se destaca na criação de ovinos e produção de lã a região sudeste. Nessas regiões a criação de ovinos perde apenas para a criação de bovinos.

Devido às condições como são criadas as ovelhas, a lã chega à indústria com excesso de impurezas como do tipo: terra, esterco, remédios e gorduras. Isto torna o processamento industrial da lã indispensável para obtenção de um produto de qualidade.

2.3 Geração, Caracterização e Tratamento dos Efluentes na Indústria Têxtil

Beltrame (2000) chama atenção que a indústria têxtil é uma das maiores responsáveis pela poluição de águas das regiões em que atua. De forma simplificada, a cadeia produtiva têxtil compreende os processos de preparação da matéria-prima, fiação, tecelagem, malharia, preparação para tingimento, tingimento, acabamento/beneficiamento e confecção.

A grande parte dos efluentes têxteis é proveniente dos processos de preparação da matéria-prima e tinturaria. Estima-se que sejam necessários 80 L de água para cada 1 kg de tecido processado, onde cerca de 80 % torna-se efluente. Essas indústrias geram em média 50 m³/h de resíduo, podendo atingir 300 m³/h, em uma empresa de grande porte (RESENDE, 2012).

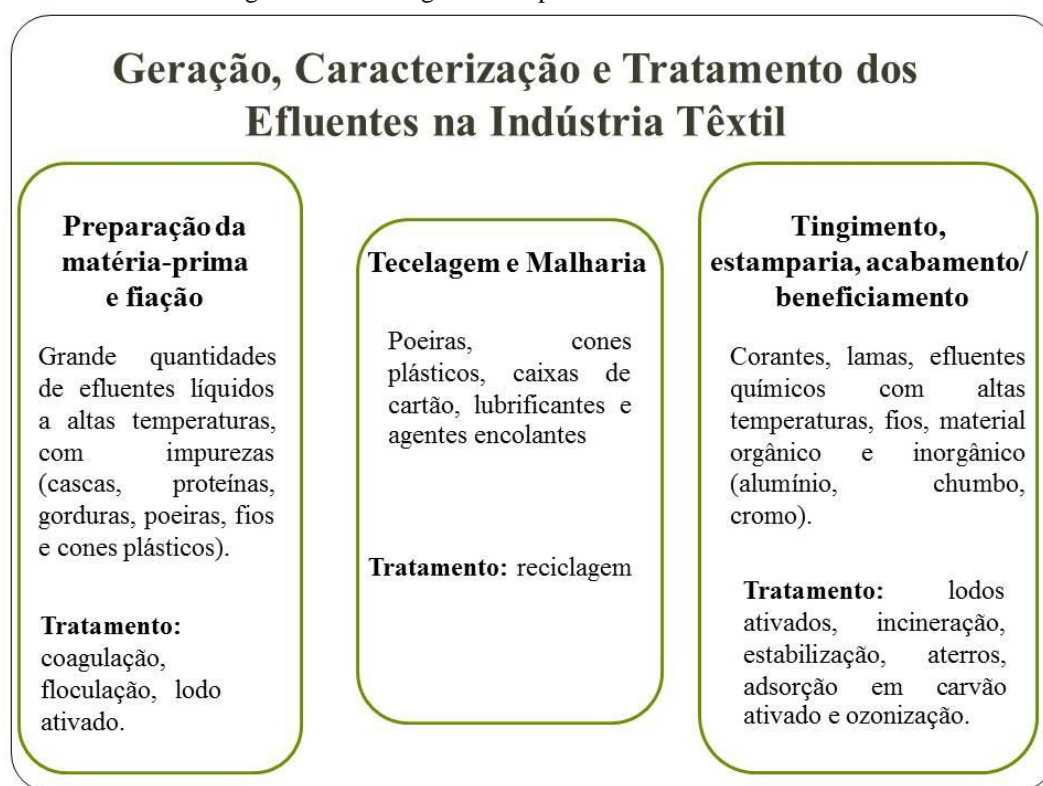
Segundo Beltrame (2000), a questão da reciclagem, na indústria têxtil tem grande relevância, uma vez que existe um grande consumo de água nos processos de lavagem e tingimento. A escassez de água provoca aumento do valor desse produto. Além da água, outros produtos podem ser reciclados e utilizados em outros setores industriais. É o caso da lanolina, citado por Flores (2014) nas indústrias de cosméticos e farmacêuticos, a soda, citado por Beltrame (2000), na fabricação de sabão e outros produtos de limpeza, também os lodos

como citados por Chao et al. (2004), Ucker et al. (2010) e Moreira et al. (2001) para indústrias materiais de construção e agropecuária.

Segundo Cogo (2011), as técnicas existentes atualmente para tratamento de efluentes têxteis estão fundamentadas em princípios físico-químicos e biológicos. A geração diária de resíduos pela indústria têxtil, em todos os seus níveis de produção, é inevitável e seu volume está relacionado tanto ao segmento de atuação como o nível produtivo.

A Figura 2.1 apresenta um fluxograma resumido dos três principais processos industriais têxteis que ocorrem e os principais tratamentos dos resíduos e efluentes gerados nesse tipo de indústria.

Figura 2.1 – Fluxograma dos processos da indústria têxtil.



Fonte: Autor, 2015.

2.3.1 Preparação da Matéria-Prima e Fiação

Conforme pode ser visualizado na Figura 2.1, para preparar a matéria-prima ocorre a lavagem da lã em lavanderias, por isso há geração de efluente líquido, com grande quantidade de água a altas temperaturas, fibras (naturais ou artificiais) não processadas, impurezas do tipo cascas (no caso do algodão) e alguns tipos de proteínas e gorduras (no caso da lã). Segundo Cogo (2011), a fiação consiste numa série de operações, onde as fibras são abertas, limpas, paralelizadas e torcidas, para que se prendam umas as outras para formar o fio. Nesse

processo ocorre geração de efluentes com fibras curtas, poeiras e fios e também a presença de cones plásticos, quando a matéria-prima utilizada for sintética e artificial.

Segundo Resende (2012), uma característica comum dos efluentes da indústria têxtil é a difícil degradabilidade. Muitas bactérias utilizadas em tratamento biológico são sensíveis a variação de pH, tornando-o muito alcalino, prejudicando a realização da fotossíntese do sistema. Alta carga de DBO e DQO, que Resende (2012) também cita como uma característica dos efluentes têxteis indica a quantidade de matéria orgânica que pode ser biologicamente degradada ou biodegradada e é um parâmetro utilizado no controle da poluição, podendo indicar a presença de compostos tóxicos no efluente.

Nas características físico-químicas do efluente no processo de lavagem e fiação, Resende (2012) e Beltrame (2000) destacam a presença de restos de fibras, óleos, graxas e altas temperaturas. Durante o processo de lavagem, a turbidez é provocada por sujeiras, causando impacto visual nos cursos d'água. A temperatura tem importância devido ao efeito que causa na vida aquática, pois a sua elevação torna o oxigênio menos solúvel. Os agentes surfactantes estão presentes em sabões e detergentes, que causam espuma e contribuem para a elevação dos níveis de nitrogênio e fósforo nos corpos hídricos. Óleos e graxas são os parâmetros que indicam a presença de óleos minerais, óleos vegetais ou gorduras animais no efluente.

As propriedades físicas da partícula de um efluente apontadas por Cremasco (2012) e Massarani (2002) são importantes na compreensão de fenômenos que regem uma determinada operação unitária. As características físicas de um efluente são definidas pelas suas propriedades específicas e geométricas. Dependendo do tipo de tratamento que será escolhido, ou para pesquisas de novas tecnologias empregadas no tratamento de efluentes têxteis, é importante conhecer as características físicas de um efluente. A massa específica do efluente e do sólido muito próximo da massa específica da água, por exemplo, o que dificulta o tratamento por decantação.

Para aglomerados de partículas sólidas em amostras de sistema aquoso, existem diversas maneiras para representar o tamanho das partículas ou de aglomerados, como por exemplo, os que são apontados por Cremasco (2012) e Massarani (2002), o peneiramento, a sedimentação, a microscopia, a turbidimetria, a resistividade, a elutriação, a permeabilidade e a área superficial.

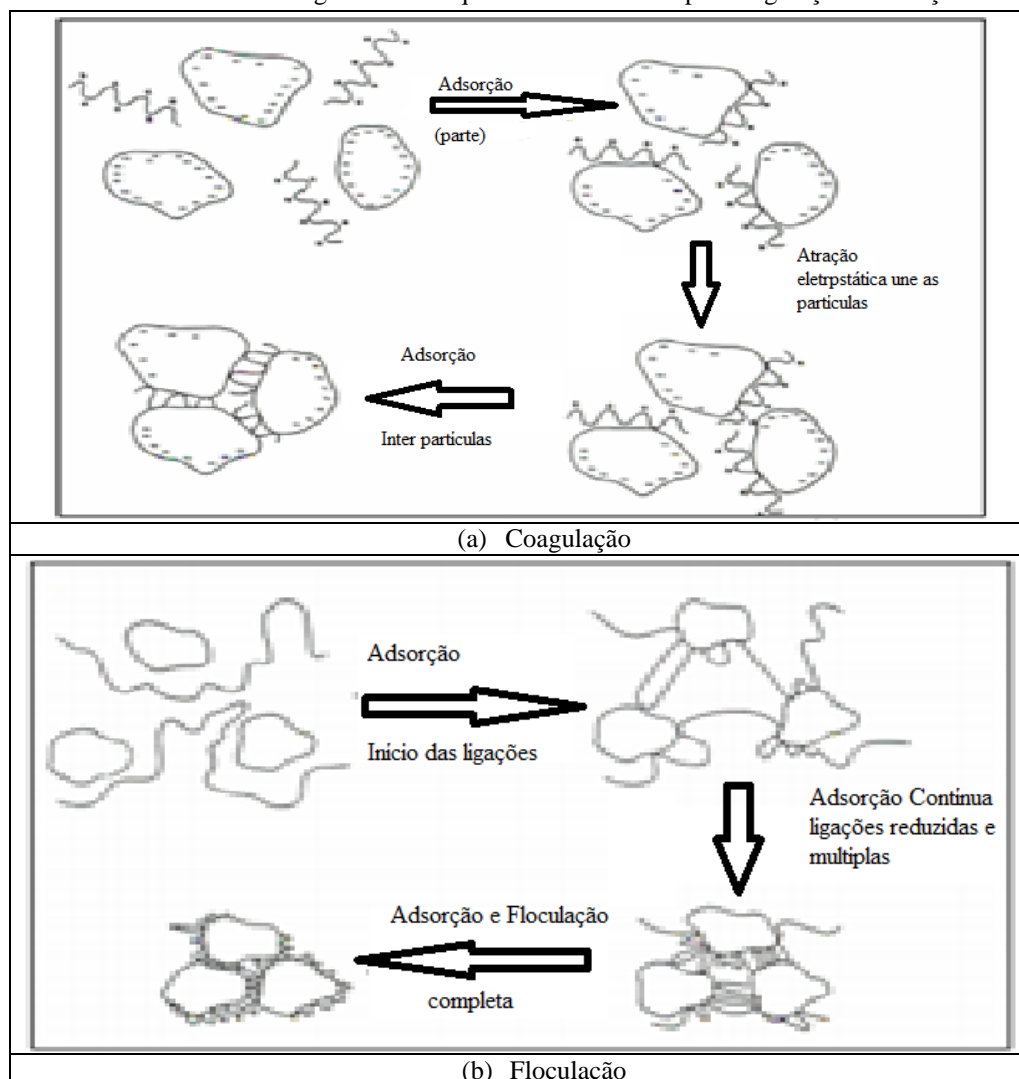
Devido à diversidade de substâncias existentes num efluente provido da indústria têxtil, Beltrame (2000) recomenda que a caracterização biológica deva ser em termos acumulativos, ou de características comuns a substâncias que a compõem, analisando se há

microrganismos do tipo vírus, bactérias, fungos e protozoários presentes no efluente. Além disso, há preocupação também com reproduções dos organismos presentes no ecossistema, como algas, plantas, peixes e aves.

As Figuras 2.2 a 2.4 representam, respectivamente, os processos de tratamento que podem ser utilizadas tanto em Estações de Tratamento de Água (ETA) para consumo, como em algumas indústrias preocupadas em fazer o tratamento da água antes do seu descarte, como no caso de algumas indústrias do ramo têxtil, que possuem ETA para fazer o descarte ecológico da água utilizada nos seus processos.

As Figuras 2.2 (a) e 2.2 (b) representam, respectivamente, os processos de tratamento por coagulação e floculação, muito utilizado em indústrias responsáveis pela lavagem da matéria-prima e da fiação.

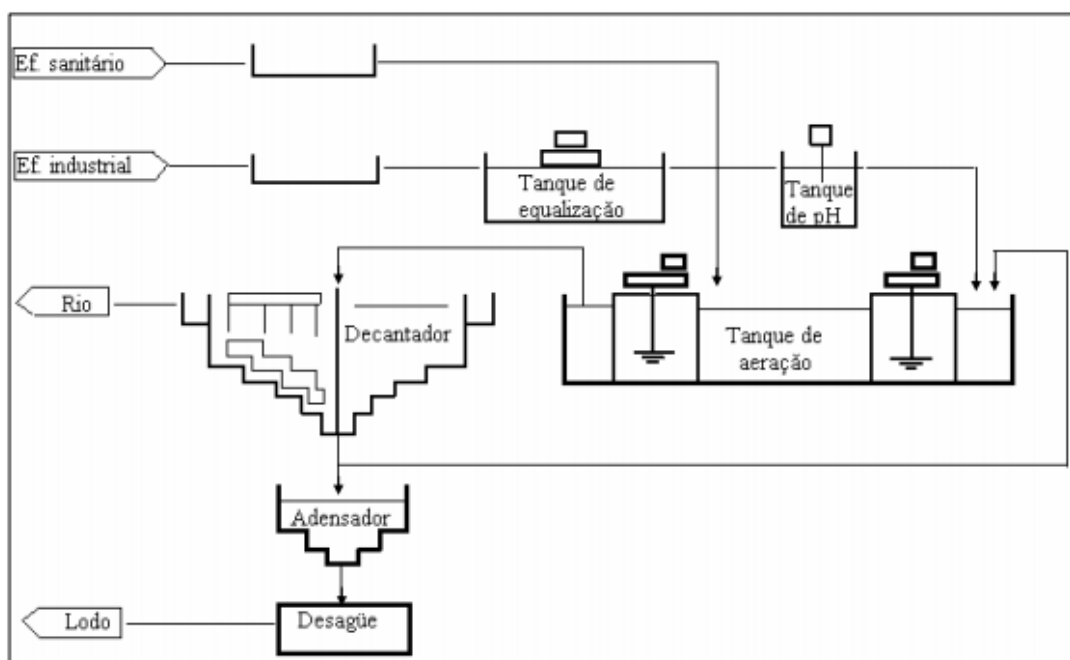
Figura 2.2 – Esquema de tratamento por coagulação/floculação



Fonte: NORMAN E SEDDON (1991) apud BELTRAME (2000).

Conforme apresentado nas Figuras 2.2 (a) e 2.2 (b), a coagulação/floculação consiste em aglomerar as impurezas, finas partículas em suspensão na água, criando agregadores maiores que podem ser removidos por sedimentação, filtração ou flotação. Esse processo geralmente, quando não usado isoladamente, é um dos primeiros processos do tratamento de efluentes. Em estações de tratamento de água e esgoto, por exemplo, é o primeiro procedimento adotado, após a passagem da água ou do efluente pelas grades de contenção de sujeiras grossas. Outro tratamento comum na fase de lavagem e fiação é o tratamento biológico por lodo ativado, conforme o esquema é apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Esquema de tratamento biológico por lodo ativado.



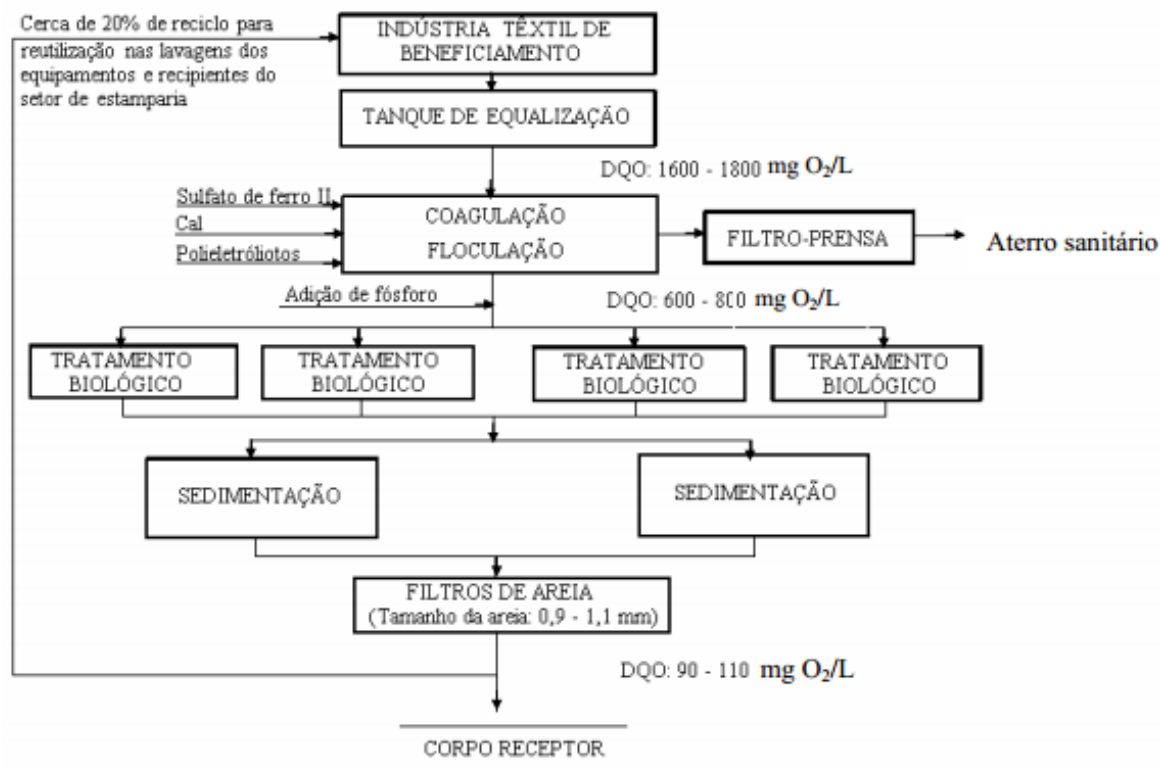
Fonte: NORMAN E SEDDON (1991) apud BELTRAME (2000).

Conforme a Figura 2.3, o tratamento biológico por lodo ativado provoca o desenvolvimento de uma cultura microbiológica na forma de flocos (lodos ativados) em um tanque de aeração que é alimentada pelo efluente a tratar. A finalidade é proporcionar oxigênio aos micro-organismos, evitar a deposição dos flocos bacterianos e os misturar homogeneamente ao efluente. O tanque de aeração tem a função de promover o desenvolvimento de uma colônia microbiológica (biomassa), a qual consumirá a matéria orgânica do efluente.

Nesse processo de tratamento, que pode ocorrer auxiliando outros tratamentos, ocorre a geração dos lodos, que devem ser descartados de forma que agrida menos possível o ambiente natural onde a indústria esteja instalada. A Figura 2.4 apresenta o processo

esquemático de uma indústria têxtil que faz o tratamento do efluente gerado nos processos de lavagem de matéria-prima e fiação, utilizando um sistema de ETA.

Figura 2.4 – Esquema completo do tratamento.



Fonte: NORMAN E SEDDON (1991) apud BELTRAME (2000).

O que é apresentado no esquema da Figura 2.4 ocorre com bastante regularidade no setor primário da indústria têxtil. Esse esquema apresenta ambos os processos de tratamento já citados, primeiramente são retiradas as impurezas mais grosseiras, pelo método de coagulação e floculação, passando para um filtro-prensa e então parte do resíduo vai para um aterro. Os lodos gerados no processo de coagulação e floculação seguem para o tratamento biológico via lodo ativado (COGO, 2011).

Segundo Beltrame (2000), o aterro sanitário, que aparece na Figura 2.4, consiste na técnica de disposição final de resíduos sólidos industriais no solo, para minimizar o risco à degradação ambiental e à saúde pública. Para uma boa eficiência do filtro-prensa, é necessário que o lodo esteja com baixo teor de umidade, sendo necessário e útil muitas vezes atrelar a esse tratamento a secagem ou desidratação do lodo.

A secagem/ desidratação é a máxima eliminação possível de água contido nos resíduos oriundos da lavanderia têxtil. Pode ser por evaporação a partir do calor aplicado em leitos de

secagem (transferência de calor), ou por processos físicos como prensagem (filtro prensa), ou por ação de campo gravitacional e centrífugo (hidrociclones) (VOGT, 2003).

2.3.2 Tecelagem e Malharia

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.1 no processo da tecelagem ocorre a transformação do fio em tecido, podendo passar pelos processos de tecidos planos (tecelagem propriamente dita) ou de malhas (malharias). descreve que nesse processo ocorre bem menos quantidade de geração de efluentes, tendo destaque à presença de poeiras, cones plásticos, caixas de papelão (fibras naturais), lubrificantes e agentes encolantes (fibras artificiais) (COGO, 2011).

As opções de tratamento nesse processo são a reciclagem dos cones plásticos, substituição das caixas de cartão por paletes de plásticos e a escolha criteriosa dos agentes colantes (VOGT, 2003).

2.3.3 Tingimento, Estamparia, Acabamento/Beneficiamento

Conforme apresentado pelo fluxograma da Figura 2.3 e também em Cogo (2011) que define acabamento como todos os processos (físicos e químicos) que um tecido é submetido, após a tecelagem, com a finalidade de melhorar as características físicas, químicas e visuais para atender determinada finalidade.

Uma característica comum no processo de tinturaria e acabamento é a presença de material orgânico e inorgânico, entre eles corantes contendo alumínio, chumbo, cromo e outros metais pesados, sendo extremamente perigoso devido a alta toxicidade e persistência no meio ambiente (COGO, 2011).

No processo de tinturaria e acabamento também é comum o tratamento biológico via lodos ativados, incineração, estabilização e disposição em aterros. Outra opção de tratamento é adsorção em carvão ativado que consiste na retenção, à superfície de um sólido, de partículas líquidas ou gasosas, devido a uma atração entre as moléculas da superfície do adsorvente e as do fluido.

Em algumas indústrias têxteis, de acabamento e beneficiamento, é comum encontrar tratamento por ozonização, onde é injetado ozônio, por meio de um difusor, através do efluente. A escolha do tratamento, além das questões legais, consiste no bom senso, levando em conta a produção de resíduos diversos e a produção de efluentes, sempre a fim de minimizar os impactos que possam interferir na saúde do ambiente e da população.

2.4 Hidrociclones e sua Aplicação na Indústria Têxtil

Observando os itens anteriores, nota-se que o reaproveitamento da água é uma das maiores preocupações no tratamento dos efluentes da indústria têxtil. Nesse sentido, os equipamentos de separação de misturas se tornam uma ferramenta importante em todos os processos da indústria têxtil. Existem muitos exemplos de separadores de misturas como peneiramento, sedimentação, flotação, hidrociclones, entre outros.

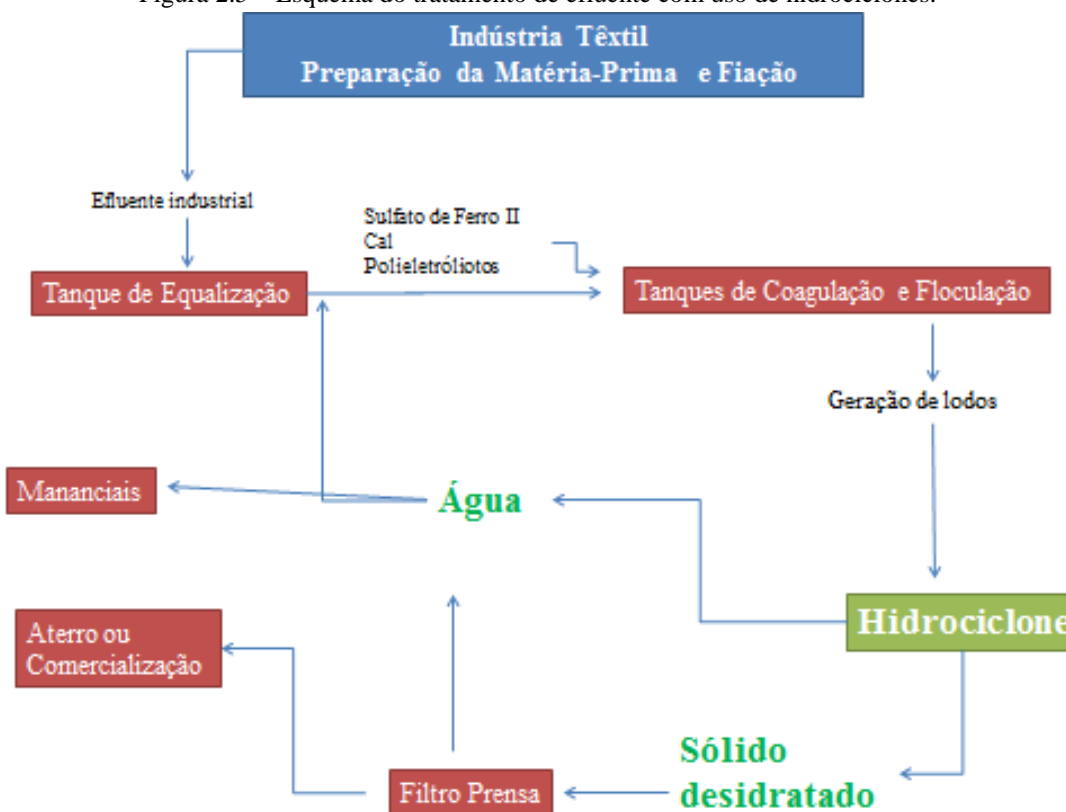
No setor têxtil são citados alguns métodos de separação, com base na decantação e a destilação fracionada. Um equipamento que pode contribuir consideravelmente para separação das impurezas da água é o hidrociclone. Segundo Silva (2012) os hidrociclones pertencem a um importante grupo de equipamentos destinados a separação de sólido-líquido ou líquido-líquido. Esse equipamento pode ser utilizado em todos os níveis da indústria têxtil, pois é capaz tanto de remover sólidos, como outros líquidos presentes em água. Mas, a sua contribuição é mais aplicável no setor de efluentes do setor de tratamento da matéria-prima e fiação.

A principal vantagem do uso de hidrociclones nas indústrias têxteis está no fato de separar a água dos poluentes, assim oportunizando o reuso da água e a comercialização ou descarte das impurezas, bem como ocorre em outros setores industriais, conforme se encontra em várias aplicações como nos trabalhos de Cruz (2008), Silva (1989), Castilho e Medronho (2000) e Souza et al. (2000) para descrever a aplicação dos hidrociclones, também chamados de ciclone hidráulico, ciclone líquido, cones de separação e separadores centrífugos. Esses autores relatam que os hidrociclones pertencem a uma classe importante de equipamentos destinados principalmente à separação de misturas sólido-líquidos, Cruz (2008) ainda cita outras aplicações desses equipamentos, como o caso do trabalho de Klima e Kim (1998) na separação de sólido-sólido, para separação de partículas de metais pesados do solo. No caso do trabalho de Smyth e Thew (1996), na separação líquido-líquido com densidades diferentes ou no caso do trabalho de Marti (1996) na separação de gás-líquido, para retirar gás de alguns líquidos.

Dependendo do ramo da indústria têxtil, o hidrociclone poderá ter diferentes utilidades. Na fase das lavagens e fiações, os hidrociclones se tornam essenciais para separar sólidos (sujeiras) do líquido (água). Nas fases de acabamento e beneficiamento, os hidrociclones desempenham o papel tanto na separação sólido-líquido como também líquido-líquido.

Um esquema mais completo no tratamento da indústria têxtil acrescentando o uso de hidrociclones pode ser visualizado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Esquema do tratamento de efluente com uso de hidrociclones.



Fonte: AUTOR, 2015.

Conforme visualizado na Figura 2.5, as vantagens no uso do hidrociclones em indústrias têxteis se deve principalmente para separar as impurezas (sólido) da água nos lodos gerados durante o processo de tratamento, sem inclusão de aditivos químicos. Também conforme a Figura 2.5, outra vantagem importante é referente à contribuição do hidrociclone para melhorar o desempenho do filtro-prensa, onde após a separação da água e dos sólidos contidos no lodo, esses podem ser reutilizados pela própria indústria ou comercializados em outros setores industriais como na indústria de matérias de construção e na agricultura.

2.4.1 Surgimento do hidrociclone e suas atuais vantagens

Os hidrociclones foram desenvolvidos no final do século XIX, para separação sólido-líquido por diferença de densidade, o que com o tempo ampliou sua capacidade para separação de líquido-líquido. Segundo Silva (2012) eles foram patenteados pela primeira vez em 1891 por *Bretney* para uso na indústria de mineração. Depois de algumas décadas, na qual

eram utilizados para poucas atividades, teve seu contexto transformado por volta de 1940. Os hidrociclones tornaram-se uma importante operação unitária para materiais da indústria mineradora e junto com o desenvolvimento de fenômenos particulados, aderiu inúmeros estudos científicos e assim colaborando cada vez mais na utilização desse equipamento.

Autores como Arruda (2008), Freitas (2009), Silva (2012) e Cruz (2008), citam algumas vantagens no uso dos hidrociclones. A primeira delas refere-se à diversidade de aplicações, desde clarificações de líquidos, concentração de pastas, separação de líquidos imiscíveis, retirar gás de líquidos e classificar sólidos. Outra vantagem é quanto a economia financeira, pois são equipamentos de baixo custo e de fácil manutenção. Apresentam também economia do espaço físico, pois são equipamentos leves e pequenos. Por fim, a existência de forças de rupturas elevadas no escoamento é uma vantagem na classificação de sólidos, devido à quebra de aglomerados e também no tratamento de pastas do tipo fluido *Newtoniano*, pseudoplásticos e de *Bingham*. Freitas (2009) cita que os hidrociclones passaram a contribuir também com a indústria química, petroquímica, geração de energia, metalúrgica e têxtil.

No início da década de 70 ocorreu na Inglaterra grande incentivo à pesquisa de equipamentos que coletassem águas contaminadas e conseguissem fazer uma rápida recuperação. Isso aconteceu devido a um acidente com um petroleiro, na cidade de Cornuália, onde houve grande vazamento de óleo (MORAES, 2006). Os hidrociclones se mostram muito úteis por apresentarem um ramo de vantagens que vai desde sua economia de aquisição e manutenção até a facilidade de manipulação. Segundo Freitas (2009), os hidrociclones são equipamentos que não exigem muitos atributos para sua projeção.

Alguns autores, como Freitas (2009), Arruda (2008), Cruz (2008) enumeram algumas desvantagens no uso de hidrociclones. Esses equipamentos, quando estão em operação são inflexíveis, pois tem forte dependência com a vazão e com a concentração na alimentação, assim, se ocorre flutuação na concentração a eficiência de separação será comprometida. Esses equipamentos são susceptíveis à corrosão, mas tal efeito é corrigido com uso de produtos anticorrosivos. Por fim, a existência de ruptura dos flocos pode algumas vezes se tornar uma desvantagem devido à floculação não poder ser usada para realçar a separação.

Freitas (2009) destaca o uso de hidrociclones nas plataformas de petróleo, principalmente nas *offshore* (tipo de plataforma de extração de petróleo utilizada em alto mar), dando destaque ao seu uso na perfuração dos poços, onde esses equipamentos são utilizados para aliviar os tanques de armazenagem de processamento primário. Freitas (2009)

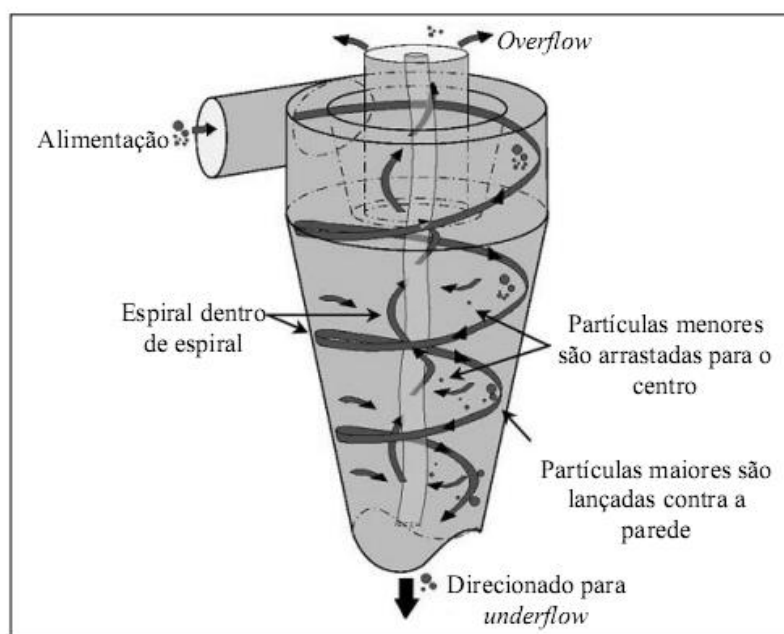
também relata a aplicação dos hidrociclones em setores da indústria têxtil, agrícola e de materiais de construção.

Segundo Svarovsky (2000), a aplicação dos hidrociclones em cada setor industrial vai depender das necessidades e objetivos particulares, exigindo mudanças no projeto e operação. A separação das partículas sólidas das fases suspensa e contínua vai depender profundamente das características físico-químicas das fases como das propriedades geométricas, como tamanho de partícula da fase suspensa.

2.4.2 Funcionamento de um hidrociclone e o seu formato físico

Os hidrociclones são formados por uma parte cilíndrica superior, que é proporcional a capacidade de processamento, e outra cônica inferior, que é responsável pela eficiência de coleta de sólido. A Figura 2.6 mostra como ocorre o movimento das fases dentro de um hidrociclone.

Figura 2.6– Separação de misturas em um hidrociclone.



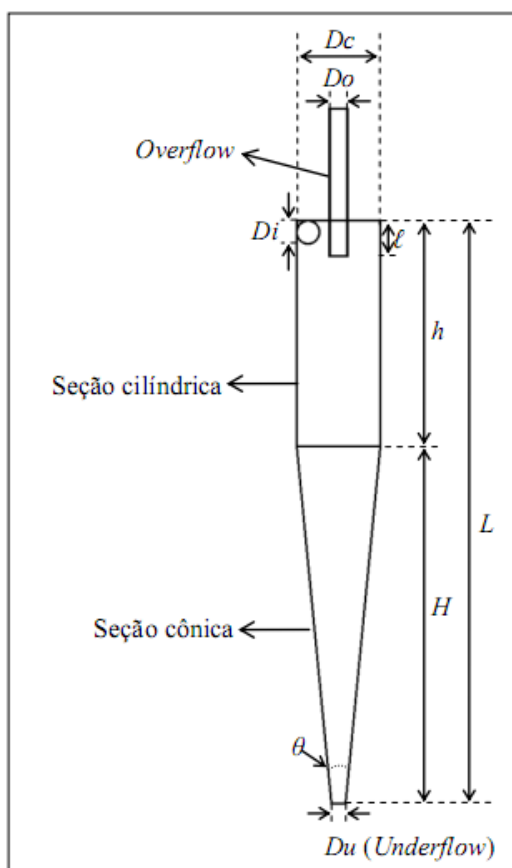
Fonte: CULLIVAN et al. (2004), apud SILVA (2012)

De acordo com a Figura 2.6, a alimentação é injetada tangencialmente no hidrociclone em alta velocidade para produzir um campo de força centrífuga. Desse modo, na entrada do hidrociclone a mistura adquire movimento em espiral que se estende até a base. Neste processo, a fase mais densa se direciona para a parede do equipamento impondo um movimento circular com trajetória helicoidal e assim saindo pelo orifício do *underflow*. Simultaneamente, a fase menos densa se movimenta em espiral, porém circundando o eixo

central até o orifício de saída do *overflow*. Atuam sobre a trajetória helicoidal as forças de arraste, centrífuga, da gravidade e de atrito e sobre o escoamento em espiral as componentes das velocidades tangencial, axial e radial (SILVA, 2012).

De acordo com Massarani (2002) os parâmetros geométricos dos hidrociclones são de fundamental importância tanto para a determinação da sua eficiência de separação como também para classificar estes equipamentos dentro de famílias geométricas. Na Figura 2.10 é apresentado um diagrama esquemático da configuração geométrica de um hidrociclone (SILVA, 2005).

Figura 2.7 – Configuração geométrica de um hidrociclone.



Fonte: SILVA, 2012

Os hidrociclones, conforme mostra a Figura 2.7, são formados por uma parte cilíndrica superior com diâmetro “ D_c ”, por um sistema de alimentação com diâmetro “ D_i ”. Além disso, os hidrociclones têm dois sistemas de descargas, o *overflow*, com diâmetro “ D_o ”, onde ocorre a saída da fase menos densa e o *underflow*, com diâmetro “ D_u ”, onde ocorre a saída da fase mais densa. Na parte cônica inferior, a Figura 2.7 mostra o ângulo “ θ ” da parte cônica que é responsável pela redução da seção cilíndrica transversal. Ainda na Figura 2.7, é mostrada a

altura da parte cilíndrica “ h ”, a altura da parte cônica “ H ”, a altura total do equipamento “ L ” e altura de entrada da secção de *overflow* “ l ” denominada *vórtex finder*.

Dentre os parâmetros citados e visualizados na Figura 2.7, Medronho (1984) cita que o diâmetro da parte cilíndrica “ D_c ” é o que tem maior relevância para o projeto dos hidrociclones. Segundo este autor, e como será visto adiante, o diâmetro da parte cilíndrica “ D_c ” está intimamente relacionado com a eficiência do hidrociclone e por isso é a dimensão base para a determinação das demais dimensões características do equipamento e respectiva classificação dentro de famílias geométricas.

Segundo Culliman (2004), uma família de hidrociclones consiste em um conjunto específico de separadores que mantém entre si uma proporção constante de suas dimensões geométricas relacionadas com o diâmetro da parte cilíndrica “ D_c ”. Na Tabela 2.2 são apresentadas as principais famílias de hidrociclones estudadas na literatura.

Tabela 2.2- Família de hidrociclones.

Família	D_i/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L/D_c	θ
<i>AKW</i>	0,200	0,320	0,800	6,240	15°
<i>Bradley</i>	0,133	0,200	0,330	6,850	9°
<i>DEMCO I</i>	0,217	0,500	1,000	4,700	25°
<i>DEMCO II</i>	0,244	0,313	0,833	3,900	20°
<i>Hi-Klone</i>	0,175	0,250	0,920	5,600	10°
<i>Krebs</i>	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
<i>Mosley I</i>	0,154	0,214	0,570	7,430	6°
<i>Mosley II</i>	0,160	0,250	0,570	7,71	6°
<i>Rietema</i>	0,280	0,340	0,400	5,00	20°
<i>RW 2515</i>	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
<i>Warman</i>	0,290	0,200	0,310	4,00	15°

Fontes: Vieira (2006), Cruz (2008) e Silva (2012).

As proporções apresentadas na Tabela 2.2 são de extrema importância no processo de separação, uma vez que estão diretamente relacionadas com a capacidade de separação do hidrociclone (SILVA, 2012). Como foi descrito, observa-se na Tabela 2.2 que o diâmetro da parte cilíndrica “ D_c ” é fundamental no projeto de um hidrociclones, já que todas as propriedades geométricas estão relacionadas ao diâmetro da parte cilíndrica. Para Silva (2012), quanto maior o diâmetro da secção cilíndrica, maior é a capacidade de processamento, enquanto que as que têm altura da parte cônica maior induzem uma maior eficiência de coleta.

De acordo com Freitas (2009), Silva (2012), Cremasco (2012), Massarani (2002) esses efeitos são analisados, em relação ao diâmetro de corte “ D^* ”. Segundo esses autores, esse parâmetro representa uma referência ao potencial de classificação do hidrociclones e é

definido como o tamanho de partícula que pode ser separada da fase contínua pelo hidrociclone com 50 % de eficiência. Com base nisso, afirma-se que quanto menor o valor de “ D^* ”, maior será a eficiência de separação.

Silva (2012) descreve que de acordo com a definição apresentada, partículas maiores que o diâmetro de corte possui maiores probabilidades de serem coletadas com uma eficiência superior a 50 %, enquanto que as menores serão coletadas com uma eficiência abaixo disso.

2.4.3 Projeto de Hidrociclone e variáveis envolvidas

O projeto de um hidrociclone é baseado em duas etapas, ambas focadas no estudo da mecânica dos fluidos. A primeira utiliza os dados das características físicas das fases a serem separadas e as relações geométricas entre as dimensões do hidrociclone. A segunda é fundamentada nas equações da conservação do momento e da energia, para descrever como ocorre o movimento das fases dentro do equipamento.

As condições operacionais dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*, que são os mais indicados para separação de líquido-sólido e a previsão de sua eficiência podem ser efetuadas pelas equações de projetos, propostas por Massarani (2002) e Cremasco (2012).

Cada equação do projeto descreve parâmetros fundamentais que servem para calcular a eficiência do hidrociclone. Segundo Massarani (2002), a eficiência individual de coleta relativa à partícula, vai ser uma função que vai depender tanto do diâmetro médio de partícula “ d_p ”, como do diâmetro de corte “ D^* ”, e será expressa pela relação empírica da Equação 2.1:

$$\eta \left(\frac{d_p}{D^*} \right) = \frac{\exp(5d_p/D^*) - 1}{\exp(5d_p/D^*) + 146} \quad (2.1)$$

onde “ η ” é a eficiência granulométrica do hidrociclone.

Segundo Silva (2012), a eficiência de um hidrociclone está fortemente relacionada ao escoamento do fluido no seu interior. Alguns parâmetros são necessários e descritos por Massarani (2002) para projetar um hidrociclone, como os que são apontados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Parâmetros de configuração do hidrociclone e condições operacionais recomendadas

Família	K	A	B	C	β	Re	D_u/D_c
<i>Rietema</i>	0,039	1,73	145	4,75	1200	5.10^3 a 5.10^4	0,1 – 0,3
<i>Bradley</i>	0,016	1,73	55,3	2,63	7500	3.10^3 a 2.10^4	0,07 – 0,15

Fonte: MASSARANI (2002)

Na Tabela 2.3, as constantes K , A , B , C , β , são adimensionais utilizadas nas equações que seguem para determinar as funções da razão de fluido e da concentração volumétrica. A constante Re se refere à faixa do número de *Reynolds* que está submetido o sistema,

demonstrando assim ser um processo turbulento. Por fim, D_u/D_c relaciona razão entre o diâmetro de *underflow* e o diâmetro da secção cilíndrica do hidrociclone.

O princípio de projeto de um hidrociclone está em determinar o diâmetro da parte cilíndrica, utilizando os parâmetros da Tabela 2.4 e a Equação 2.2 proposta por Massarani (2002):

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot f(R_f) \cdot g(C_v) \quad (2.2)$$

onde “ Q ” é a vazão volumétrica de fluido, “ μ ” é a viscosidade do fluido, “ ρ ” é a massa específica do fluido, “ ρ_s ” é a massa específica dos sólidos, “ c_v ” é a concentração volumétrica e “ f ” é um fator de correção para a razão de fluido e é dada pela Equação 2.3.

$$f(R_f) = 1 + AR_f \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3), a razão de fluido “ R_f ”, citado por Silva (1989), Massarani (2002) e Silva (2012), ocorre na separação de misturas sólido-líquido na qual parte da massa de sólido não é separado somente sob a ação da ação centrífuga. Trata-se de um parâmetro que relaciona as taxas mássicas de água coletada no *underflow* e a taxa mássica de água presente na alimentação do hidrociclones. Está razão pode ser obtida pela relação da Equação 2.4.

$$R_f = B(D_u/D_c)^C \quad (2.4)$$

Silva (2012) relata que o efeito da razão de fluido é semelhante a um efeito “ T ” que ocorre em conexões de tubulações, onde a corrente inicialmente alimentada dá origem às outras duas correntes.

Na Equação 2.2 também há o fator “ g ”, que segundo Massarani (2002) pode ser calculado pela Equação 2.5:

$$g(C_v) = \frac{1}{[4,8(1 - c_v)^2 - 3,8(1 - c_v)]^{0,5}} \quad (2.5)$$

o fator “ g ” leva em conta a concentração volumétrica, c_v , de sólido na alimentação. A concentração de sólidos presentes no efluente também interfere na eficiência do hidrociclone. Medronho (1984) apud Freitas (2009) relata que a concentrações de sólidos acima de 1 % em volume faz com que a velocidade de arraste da partícula comece a sofrer sensível decréscimo, diminuindo assim a eficiência de separação.

Segundo Freitas (2009), os principais parâmetros utilizados no projeto de um hidrociclone são a queda de pressão, a razão de fluido e o diâmetro de corte. Outros fatores importantes como a distribuição de tamanho médio de partícula, concentração de sólidos e vazão de *overflow*, auxiliam para gerar as curvas de eficiências de um hidrociclone.

Sendo conhecidos os parâmetros apresentados nas Equações 2.3 a 2.5 e conhecendo o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, é possível utilizar a Tabela 2.3 para calcular o

diâmetro da secção de alimentação, de *overflow* e de *underflow*. Também é possível a partir do valor de “ D_c ” e da Tabela 2.3, calcular a altura da parte cilíndrica ou a altura total e a altura do *vortex finder* do hidrociclone, dependendo da configuração ou família de hidrociclone que se deseja projetar.

Além das propriedades geométricas interferirem na eficiência do hidrociclone, há também a interferência de outros fatores. Tendo a viscosidade (μ) definida por Bird (2010) como uma medida do atrito interno do fluido, isto é, da resistência à deformação, Fox et al. (2006) determinam que a viscosidade está relacionada à tensão de cisalhamento (τ_{xy}) e à taxa de deformação (dv_x/dy) através da relação da Equação (2.6)

$$\tau_{xy} = \frac{dv_x}{dy} \quad (2.6)$$

essa é uma equação válida para fluidos newtonianos (como a água e o ar), em condições normais.

Conforme a segunda lei de Newton, no instante em que uma partícula adquire movimento constante, sem aceleração, tem-se uma condição de equilíbrio de forças dada pela Equação (2.7):

$$F_p = F_a + E \quad (2.7)$$

onde F_p é a força peso e E é a força de empuxo sobre a partícula. O arrasto sobre a partícula pode ser dividido em duas parcelas, correspondentes ao arrasto de pressão e o de atrito. No caso específico no qual os números de Reynolds envolvidos são bastante baixos ($Re \leq 1$), verifica-se que não há separação da camada limite no escoamento sobre a partícula e, conseqüentemente, chama-se de Regime de Stokes ou regime laminar e o arrasto é predominantemente o arrasto de atrito. Para este caso, Stokes mostrou analiticamente que a força " F_a " pode ser calculada através da Equação (2.8), conhecida como Lei de Stokes:

$$F_a = 3\pi\mu v_x d_p \quad (2.8)$$

sabendo-se que o peso da esfera é calculado pela 2ª Lei de Newton, dada pela Equação (2.9):

$$F_p = mg = V\rho g \quad (2.9)$$

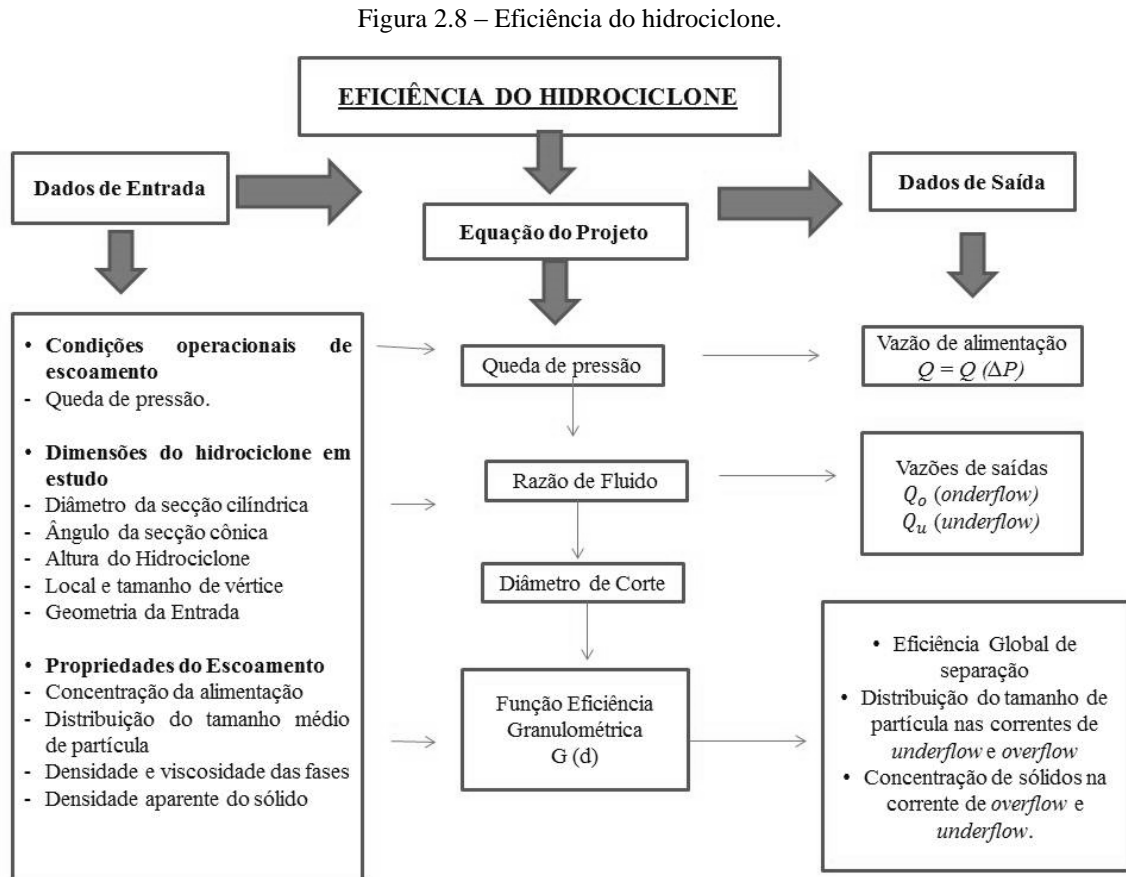
sendo ρ a massa específica do material da esfera, V o volume da mesma e g a aceleração local da gravidade. Também pela aplicação da 2ª Lei de Newton para força de empuxo, pode ser obtida pela Equação (2.10):

$$F_a = m_f g = V\rho_f g \quad (2.10)$$

onde “ m_f ” a massa do fluido deslocado pela partícula e “ ρ_f ” a massa específica do fluido. Ao se igualar os termos da Equação 2.8 com a Equação 2.10 e isolando a viscosidade dinâmica chega-se a Equação (2.19):

$$\mu = \frac{(\rho - \rho_f)gd_p^2}{18v_x} \quad (2.11)$$

A Figura 2.8 apresenta um diagrama de forma simplificada para análise da eficiência de um hidrociclone.



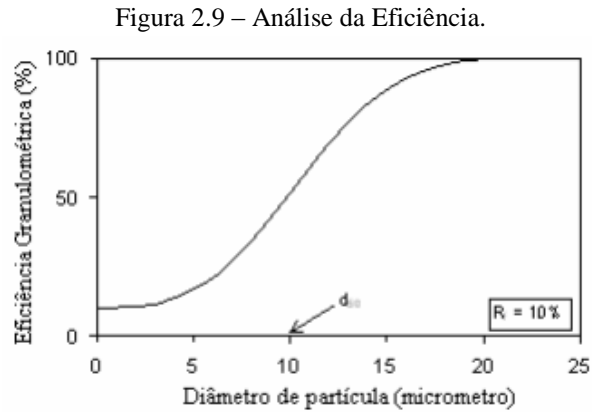
Fonte: Autor (2015), adaptado de FREITAS (2009)

A partir do esquema apresentado na Figura 2.8, no estudo de hidrociclones o principal objetivo é a separação de impurezas diluídas em água. O processamento do efluente vai depender do nível de produção. No caso de misturas sólido-líquido, o sólido, por ter maior massa específica será coletado no orifício de *underflow* e a água no orifício de *overflow*. No caso de mistura líquido-líquido, pode ocorrer de haver coleta de água tanto no orifício de *underflow*, no caso da água ser o fluido mais pesado, como no *overflow*, se a água for o fluido mais leve. Assim, as definições de eficiência granulométrica (ou eficiência individual por tamanho de partícula) vão depender do tipo de fases que estarão envolvidas no processo.

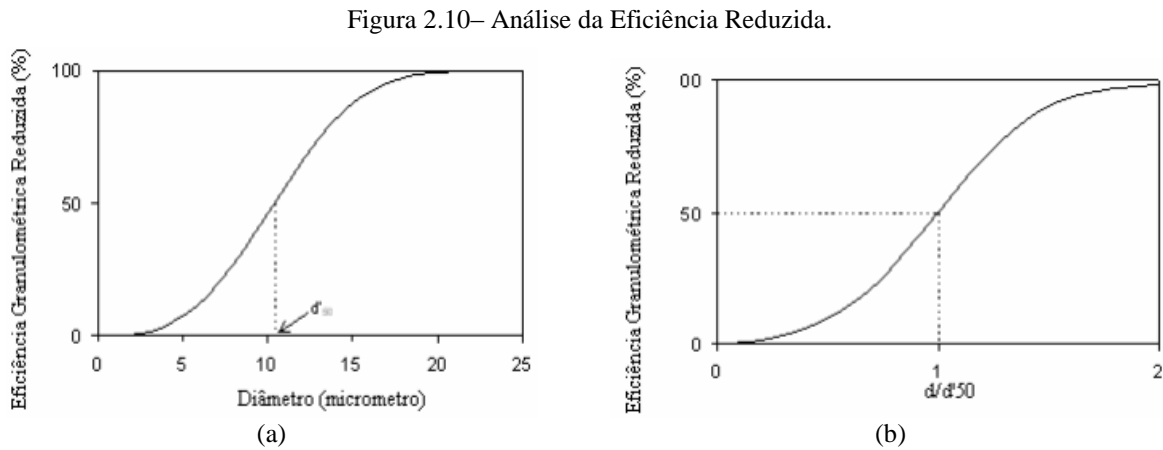
Segundo Freitas (2009), a eficiência granulométrica reduzida leva em conta somente a quantidade de sólido que é coletada no *underflow* pela ação centrífuga do hidrociclone, assim desconsiderando o efeito divisor de vazões, ou o efeito “T” como é definido por Silva (2012). A Equação (2.12) mostra a relação da eficiência granulométrica reduzida “ η' ”.

$$\eta' = \frac{\eta - R_f}{1 - R_f} \quad (2.12)$$

onde “ R_f ” é a razão de fluido. A Figura 2.9 apresenta uma curva típica de eficiência granulométrica para hidrociclones.



Conforme mostra a Figura 2.9, quanto maior for o valor o tamanho médio da partícula, maior será a eficiência granulométrica. Na Figura 2.10 é apresentado curvas típicas de eficiência granulométrica em função do tamanho médio de partícula (a) e do diâmetro de corte (b).



A diferença entre a Figura 2.9 e 2.10 é que a primeira não corta o eixo das abcissas o que aponta que o hidrociclone sempre gerará uma eficiência mínima que é muito próximo do valor de R_f (FREITAS, 2009).

2.5 Modelagem Matemática e Métodos Numéricos em Fluidodinâmica

Os fluidos estão presentes em todo o meio ambiente, desde as grandes obras da engenharia e arquitetura, na constituição da maior porção tanto dos organismos vivos, na forma de respiração ou ainda na corrente sanguínea como também constituem a maior parte do planeta, no ar, no vento, nas águas, nas correntes e nas marés. Tudo que rodeia a natureza é constituído por fluidos e pela sua facilidade de escoamento.

O estudo dos transportes de momento (mecânica dos fluidos), energia (transferência de calor) e de massa de espécies químicas (transferência de massa) são de grande importância na área da engenharia, sendo que a ocorrência de qualquer um desses processos isoladamente é uma exceção à regra (BIRD, 2010).

Esses fenômenos por sua vez, estão relacionados com o movimento de fluidos e a descrição dos problemas físicos que envolvem essas situações e as grandezas físicas, que atuam sobre os sistemas exemplificados podem ser modeladas matematicamente.

Para o estudo de determinado fenômeno físico, se pode optar por métodos teóricos ou ensaios em laboratório, que devem ser embasados em análise teórica previa. Então a modelagem matemática é definida como sendo a determinação das grandezas físicas que atuam e influenciam um sistema. Dessa forma, o engenheiro responsável por um problema físico tem a sua disposição as seguintes opções: métodos teóricos (analíticos ou numéricos) ou experimentação em laboratório (FREITAS, 2009).

É bastante complexo descrever matematicamente como ocorre o escoamento e a separação de duas fases em um hidrociclone, pois embora sejam equipamentos tubulares estáticos, sua geometria apresenta trechos cilíndricos e cônicos justapostos, onde o movimento de rotação do fluido é promovido unicamente pela alimentação normal ao eixo do equipamento e tangencial a parede curva da secção transversal do equipamento, dificultando aplicação das hipóteses simplificadoras.

O regime de escoamento com o qual estão submetidos os fluidos durante o funcionamento do equipamento é turbulento. Assim, o método numérico é a solução mais viável, sendo sua validação proposta por Freitas (2009), como uma das opções:

- Validação Numérica - comparam-se os resultados obtidos com outras soluções. São analisadas a precisão da resolução e a convergência do algoritmo utilizado, e
- Validação Física - comparam-se os resultados obtidos com os resultados experimentais. A maior preocupação é com a fidelidade com o fenômeno físico.

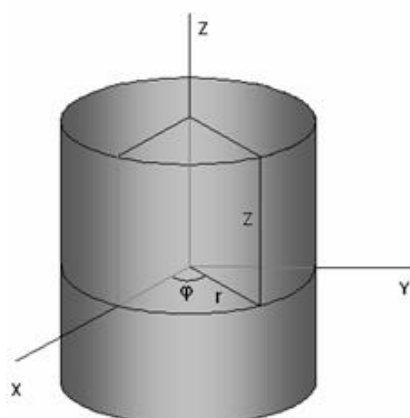
A separação de fases no hidrociclone decorre da transformação da energia estática do fluido (pressão) em energia dinâmica do fluido (velocidade) a partir do princípio de sedimentação centrífuga. Nestes, as partículas suspensas são submetidas à aceleração centrífuga, separando-as do fluido (MEDRONHO, 1984).

Apesar de parecer simples, a construção dos perfis de escoamento no interior do hidrociclone apresenta características bastante complexas, tais como linhas de corrente com curva acentuada, forças de campo intensas, turbulência anisotrópica e a presença de duas ou mais fases.

2.5.1 Problema físico e a modelagem matemática no escoamento de hidrociclone

Para descrever as equações o movimento das fases em um hidrociclone, o sistema de coordenadas adotado é representado num espaço tridimensional em coordenadas cilíndricas conforme a Figura 2.11.

Figura 2.11 – Coordenadas cilíndricas.



Fonte: Autor, 2015.

O sistema presente na Figura 2.11 é chamado de coordenada cilíndrica e consiste basicamente do sistema de um sub-sistema polar na base de um cilindro circular, assim as coordenadas desse tipo de sistema são compostos pelo raio do cilindro, “ r ”, a altura, “ z ”, e a angulação “ φ ”.

Nos problemas físicos, para trabalhar com esse tipo de geometria, é necessário a transformação de uma coordenada cilíndrica em retangular através das relações:

$$x = r \cos\varphi \quad (2.13)$$

$$y = r \sin\varphi \quad (2.14)$$

$$z = z \quad (2.15)$$

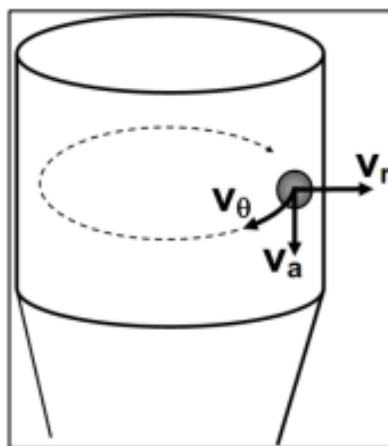
onde “x”, “y” e “z” são as coordenadas no plano cartesiano (retangular). Da mesma forma, em situações bem específicas é definido as relações inversas, que nos dão os parâmetros de uma coordenada cilíndrica a partir de uma coordenada retangular:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (2.16)$$

$$\varphi = \text{tag}^{-1} \frac{x}{y} \quad (2.17)$$

O escoamento de um hidrociclone é complexo e altamente turbulento, devido as flutuações de velocidade do fluido no tempo e espaço, no qual gera altos valores de *Reynolds*. Além de turbulento, escoamento no interior do hidrociclone é estritamente tridimensional e transiente, possui uma multiplicidade de escalas, é rotacional possuindo grandes vórtices e bastante sensível às condições iniciais, o que descreve um processo caótico (BERGSTRÖM, 2006 apud SILVA, 2012). Na Figura 2.12, são apresentadas as três componentes da velocidade, axial, radial e tangencial.

Figura 2.12 – Componentes da velocidade.

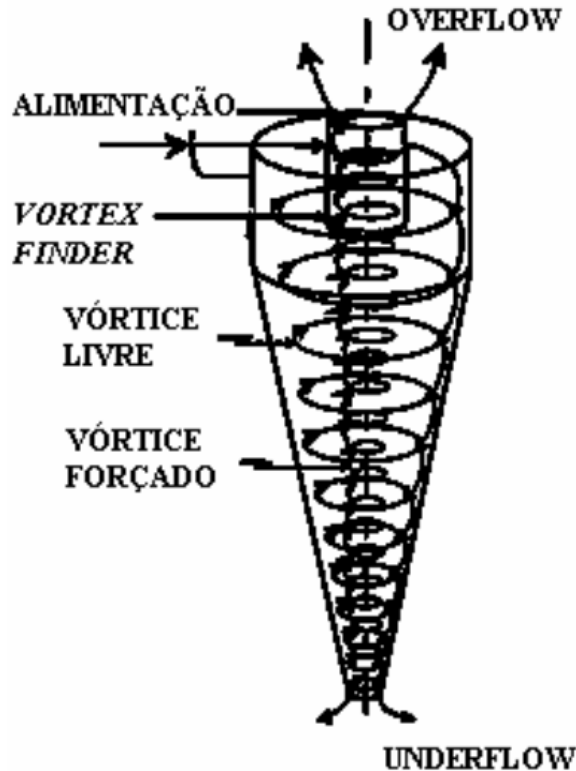


Fonte: Bergström (2006) apud Silva (2012).

A velocidade representada pela resultante das velocidades que atuam nos três campos de direção do hidrociclone, mostrada na Figura 2.12, a velocidade radial, a velocidade tangencial e a velocidade axial é denominada por Medronho (1984) como sendo a velocidade global.

Bergström (2006) apud Silva (2012) descreve que a componente tangencial é extremamente relevante, pois ela é responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento. Medronho (2005) descreve que a alimentação tangencial produz dois tipos de vórtices, o vórtice livre e o vórtice forçado que podem ser visualizados mais detalhadamente na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Escoamento interno do fluido dentro do hidrociclone.



Fonte: Medronho (2005) apud Freitas (2009).

Conforme a Figura 2.13, o vórtice livre aparece mais localizado na extremidade, enquanto que o vórtice forçado está mais localizado no interior, próximo ao eixo do hidrociclone.

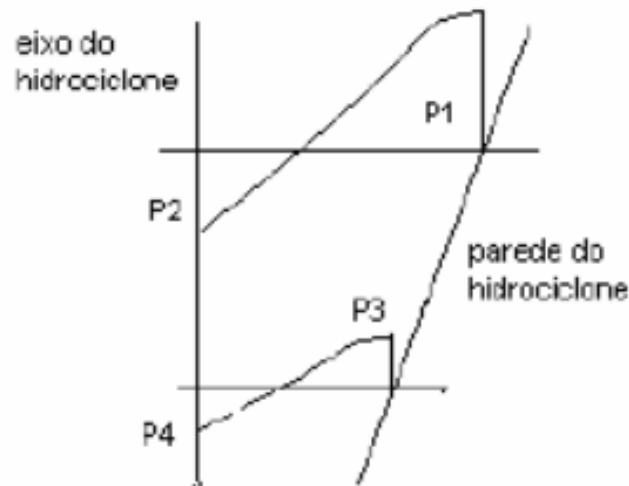
Cruz (2008) referencia que Daniel Bernoulli estabeleceu em 1738, que a soma das energias piezométricas, cinéticas e geométricas que ocorrem ao longo de qualquer linha de corrente é constante. O “Teorema de Bernoulli” traduz em termos analíticos o princípio da conservação da energia, dado pela Equação (2.18):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta p \quad (2.18)$$

onde $\frac{P_1}{\gamma}$ e $\frac{P_2}{\gamma}$ são as cargas piezométricas, $\frac{v_1^2}{2g}$ e $\frac{v_2^2}{2g}$ são as cargas cinéticas, z_1 e z_2 são as cargas geométricas e " Δp " é a perda de carga.

Na Figura 2.14, observa-se o fenômeno que foi descrito, indicando como P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , sendo os valores da pressão sobre o fluido, próximo ao eixo do hidrociclone e próximo a parede da secção cônica.

Figura 2.14 – Distribuição radial da pressão no interior do hidrociclone.



Fonte: MARINS, 2007.

Na Figura 2.14, logo que o fluido chega à seção cônica, a pressão P_1 é maior que P_2 , devido à aceleração centrífuga que empurra o fluido contra a parede do equipamento. Pelo mesmo motivo, P_3 é maior que P_4 . Enquanto que P_2 é menor do que P_4 , resultando num escoamento reverso junto ao eixo.

Já o estudo teórico para o escoamento de fluidos é feito através das equações de conservação de massa e momento. Essas equações escritas no sistema de coordenadas cilíndricas são definidas segundo a literatura, Massarani (2002), Medronho (2003), Bergström (2006), apud Coelho (2011), Freitas (2009) e Silva (2012), entre outros, pelo sistema de Equações (2.19) a (2.21) e são conhecidas no estudo de escoamento de fluidos como Equações de *Navier-Stokes* para coordenadas cilíndricas, utilizadas para qualquer regime.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K}{c_p} + \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (2.21)$$

onde “ S ” é a soma das forças que atuam no escoamento, “ u ” é a velocidade e “ $\rho u_j u_i$ ” simboliza efeitos de turbulência, os quais são denominados tensores de *Reynolds* e necessitam modelos de turbulência para descrevê-los (SILVA, 2012).

Essas equações são classificadas como parciais e não lineares e por isso a sua resolução de forma analítica requer muito tempo e ainda assim pode não ser confiável ou até não se chegar numa solução, mesmo que aproximada, por isso o conhecimento acerca de métodos numéricos de solução de equações se faz de grande importância.

O estudo da mecânica dos fluidos mostra que a velocidade das partículas no escoamento está relacionada ao número de *Reynolds*, e como no hidrociclone temos três perfis de velocidade, a geometria do equipamento é quem vai indicar o *Reynolds*, que por sua vez, para altos valores implica-se em altas frequências ou estruturas viscosas muito pequenas.

Para obter os fluxos de momento e a distribuição das velocidades, é feita a integração das equações onde vão surgir diversas constantes de integração que serão determinadas pelos problemas de valor inicial, retiradas das hipóteses e as condições de controle, retiradas dos valores das velocidades ou tensões nas fronteiras do sistema. Em interface sólido - líquido, a velocidade do fluido iguala-se a velocidade com a qual a superfície sólida se move; isto se aplica a ambas as componentes, tangencial e normal, do vetor velocidade. A igualdade das componentes tangenciais é referida como condição de não deslizamento (BIRD, 2010).

As Equações 2.19 a 2.21 podem ser escritas em um campo escalar geral, ϕ , expandido os termos como na Equação 2.22:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

onde o primeiro termo da Equação (2.22) é o termo temporal e serve para avançar a solução no tempo. Fisicamente, representa a variação da propriedade ϕ dentro do volume de controle. Os outros termos do lado esquerdo da equação representam o balanço convectivo da variável ϕ . Para o tratamento são os mais complexos, devido a não linearidade. Os três primeiros termos do lado direito representam o balanço dos fluxos difusivos, enquanto o termo Γ^ϕ é responsável por acomodar todos os termos que não se encaixam na equação. Quando o termo ϕ representar os componentes do vetor velocidade, o termo Γ^ϕ conterá o gradiente de pressão.

A Equação 2.22 representa a conservação de massa quando $S^\phi = 0$ e $\phi = 1$. As equações do movimento nas três direções são obtidas fazendo $\phi = T$. O produto da difusividade pela massa específica da propriedade transportada em consideração é representada por Γ^ϕ . Para as equações de *Navier-Stokes*, $\Gamma^\phi = \mu$ e para equação de energia $\Gamma^\phi = \frac{k}{c_p}$. Para o escoamento laminar é igual a $\mu_{efetivo}$ e para o escoamento turbulento é

$$\left(\frac{k}{c_p}\right)_{efetivo}.$$

Freitas (2009) cita que a Equação 2.22 pode ainda representar a conservação de outras propriedades físicas, como a energia cinética turbulenta (k), a dissipação da energia cinética

turbulenta (ε), gerando outras duas equações diferenciais que se acrescentam ao sistema, quando o modelo ($k - \varepsilon$) é usado para modelar problemas de escoamento turbulento.

Medronho (2003) apud Freitas (2009) diz que em separadores em que a força de campo mais significativo é a centrífuga, a expressão de *Stokes* continua válida, só que neste caso, a aceleração gravitacional é substituída pela aceleração centrípeta, dada por $\frac{v^2}{r}$, onde “ v ” é a velocidade tangencial do fluido contínuo ao redor de um eixo e “ r ” é a distância a esse eixo.

No caso de um hidrociclone, supondo que a fase contínua, seja constituída por água e a fase diluída por sólidos suspensos, a velocidade terminal da água será na direção do eixo do equipamento. A medida que o fluido se aproxima do orifício de *underflow*, a velocidade de rotação aumenta, e assim a aceleração centrípeta aumenta bastante, acarretando um grande aumento na velocidade terminal e facilitando a separação.

Entre as ferramentas disponíveis ao engenheiro para resolução do problema físico, a validação numérica tem como vantagem a rapidez na solução e a economia de materiais e equipamentos de laboratório.

2.5.2 Modelos de Turbulência

Medronho (1984) apud Freitas (2009) descreve que nos escoamentos turbulentos, perturbações geram instabilidades no escoamento médio, acabando por produzir vórtices turbulentos. Esses vórtices vão se “quebrando” em estruturas cada vez menores até que os vórtices de menores escalas sejam dissipados pelas forças viscosas.

A presença da turbulência do escoamento em um hidrociclone e a escolha de um modelo turbulento adequado em soluções numéricas são fatores extremamente importantes em uma simulação, o modelo turbulento $k-\varepsilon$ usa a hipótese da viscosidade turbulenta (as tensões de Reynolds podem ser relacionadas linearmente com os gradientes médios de velocidade) e o modelo turbulento RNG $k-\varepsilon$ para fluxos com alto número de Reynolds, as constantes deste modelo são obtidas teoricamente e não empiricamente, como no modelo $k-\varepsilon$ tradicional (SIMÕES, 2005).

Segundo Silva (2012) o conceito de viscosidade turbulenta, é um conceito do escoamento no espaço e tempo, enquanto que a viscosidade molecular é uma propriedade do fluido. Os modelos de turbulência são classificados pela dependência ou não de viscosidade turbulenta. Os pesquisadores na área de engenharia podem optar por quatro modelos de turbulência para solução de problemas físicos, modelos algébricos, modelos diferenciais de

duas equações, modelo diferencial de quatro equações ($k-\varepsilon$ de múltipla escolha) ou modelos que não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta (modelos de tensores de *Reynolds*).

Nos itens a seguir serão detalhados os dois modelos que são mais utilizados na simulação de hidrociclones, o modelo $k-\varepsilon$ por ser um dos mais aplicados e difundidos no meio científico e na indústria da engenharia e o modelo tensão de *Reynolds* (*SSG*) por propor o cálculo de cada componente do Tensor de *Reynolds*, sendo um aplicativo importantíssimo no ANSYS – CFX.

I - Modelo $k-\varepsilon$

Segundo Freitas (2009) a principal vantagem desse modelo de turbulência é a sua simplicidade, quando fornecido as suas condições iniciais e de contorno, também a validade e por ser bem estabelecido. Além de um excelente desempenho, sendo ideal para escoamentos industriais.

A sua desvantagem, também apontada por Freitas (2009) está no seu fraco desempenho, para grandes variedades de casos, como escoamentos livres e com grandes restrições (leis de contorno, curvas e escoamentos em redemoinho), escoamentos rotacionais e escoamentos completamente desenvolvidos em dutos retos.

Freitas (2009) descreve que o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ se caracteriza pela energia cinética turbulenta, representada por k e cuja a dimensão é $[L^2T^2]$ e ε representa a dissipação da energia cinética turbulenta, cuja a dimensão é $[L^2T^{-3}]$.

Segundo Freitas (2009), no modelo $k-\varepsilon$ são introduzidas duas novas variáveis ao sistema de Equações 2.19 a 2.21. Essas equações são apresentadas a seguir, como Equação 2.23 e 2.24:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \cdot \nabla U)^T + B \quad (2.24)$$

onde, “ B ” é a soma das forças que atuam sobre o corpo, “ μ_{eff} ” é a viscosidade efetiva devido a turbulência e “ p' ” é a pressão modificada, dada pela Equação 2.25:

$$p' = p + \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \nabla \cdot U) \quad (2.25)$$

O modelo $k - \varepsilon$, considerado como um modelo a zero equação é baseado no conceito da viscosidade turbulenta, no qual $\mu_{eff} = \mu_t + \mu$, onde “ μ_t ” é a viscosidade turbulenta.

Segundo Medronho (1984) apud Freitas (2009), este modelo deduz que a viscosidade turbulenta é função da energia cinética turbulenta e a sua dissipação. A Equação 2.26, a seguir, representa essa relação.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.26)$$

onde “ C_μ ” representa a constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ [adimensional].

Os parâmetros k e ε são expressos pelas equações de conservação:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} - (C_{\varepsilon 1} \cdot P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (2.28)$$

onde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_ε são as constantes do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ [adimensionais], de tal forma que $C_{\varepsilon 1}$ varia de 1,44 a 1,55, $C_{\varepsilon 2}$ varia de 1,92 a 2,00, $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Conforme é apontado por Medronho (2003) apud Freitas (2009), o modelo $k - \varepsilon$ gera uma turbulência isotrópica, sendo imprópria para escoamentos circulares complexos, como o que ocorre em hidrociclones, já que superestima a tensão turbulenta, prevendo de forma errada as velocidades tangenciais e axial (ANSYS, CFX, 2006).

II – Modelo SSG (Tensores de *Reynolds*)

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), apud Freitas (2009), as vantagens apresentadas referem-se ao potencial do modelo, a solicitação apenas dos dados das condições iniciais e de contorno, e a precisão dos cálculos para escoamentos mais complexos como os bocais de saída, canais assimétricos e escoamentos em curvas. A desvantagem mais relevante é o alto custo computacional, além em alguns escoamentos específicos ser inferior a outros modelos.

Segundo Medronho (2003), o modelo dos tensores de *Reynolds* padrão não consegue traçar corretamente os perfis de velocidade, devido às altas rotações. Por isso, no programa ANSYS CFX (2006), apresenta três variantes para modelos de tensores de *Reynolds* (*Reynolds Stress Models*), o *Reynolds Stress Model* (LRR-IP), o *QI Reynolds Stress Model* (LRR-IQ) e o *Reynolds Stress Model* (SSG).

Freitas (2009) relata que esses modelos se diferenciam pelos valores de suas constantes e em geral, o SSG apresenta resultado mais preciso que o LRR.

2.5.3 Resolução numérica do escoamento em hidrociclones

Sobre a hipótese de um escoamento laminar e isotérmico em três dimensões, aplica-se 4 equações, sendo uma da continuidade e três do momento. Na presença de turbulência, pode-se utilizar o método $k - \varepsilon$, assim chegando a seis equações, sendo uma da continuidade, três do momento e duas de turbulência.

A escolha entre os algoritmos para resolução de problemas envolvendo escoamento de fluidos em hidrociclones é muito importante. Entre os algoritmos mais utilizados em problemas de transferência de momento, massa e energia, destaca-se:

- Método das diferenças finitas: os valores das variáveis são calculados somente em nós específicos da malha computacional, inexistindo qualquer descrição de comportamento entre um nó e outro. Possuem abordagem estritamente matemática, visto que na discretização das equações diferenciais é aplicada uma expansão em série de Taylor truncada até os termos lineares. Devido a isto, não existem volumes de controle mas pontos de discretização. Os valores das variáveis são armazenadas nestes pontos, porém, quando aplicadas a expansão da série de *Taylor*, esta é aplicada em torno de um ponto e, este ponto, depende de sua vizinhança que necessariamente pode ser um lugar em que não há armazenamento de dados, sendo necessário o uso de funções de interpolações.
- Método dos elementos finitos: os valores de uma variável são calculados em pontos específicos da malha, sendo que funções de interpolação são posteriormente utilizadas para descrevê-las entre os respectivos pontos. Esse método era mais aplicado a simulação de estruturas e não de fluidos, mas devido a complexidade geométrica das estruturas, ele desenvolveu muito a aplicação em malhas irregulares, sendo atualmente utilizada para qualquer tipo de malha.
- Método dos volumes finitos: a característica mais atrativa desse algoritmo é que a solução do resultado possibilita a conservação integral da quantidade de massa, momento e energia, satisfeitos sobre qualquer grupo de volumes de controle e, sobretudo no domínio inteiro. Esse método é estritamente físico, pois as equações discretizadas são obtidas por meio de balanços das variáveis transportadas através de um volume de controle. Logo, garantem a conservação da propriedade desde o início. Utilizam também funções de interpolação para trazer as variáveis das faces para o centro do volume de controle.

2.5.4 Simulação computacional do escoamento em hidrociclone

Segundo Simões (2005), o barateamento dos computadores nos últimos 40 anos e o avanço das técnicas computacionais aliando ao que cita Silva (2012), quanto a capacidade dos computadores em armazenar dados para resolução de problemas, forneceu uma terceira alternativa para análise de movimento dos fluídos via simulação numérica. Esse novo ramo de

conhecimento tem característica interdisciplinar que complementa as análises teóricas e as técnicas experimentais da mecânica dos fluidos recebeu o nome de Fluidodinâmica Computacional ou do inglês, *Computation Fluid Dynamics* (CFD) (SIMÕES, 2005).

Autores, como Freitas (2009), Silva (2012), Simões (2005) Vieira (2005) entre tantos outros que utilizam das técnicas de CFD em seus trabalhos, definem a Fluidodinâmica computacional como sendo um instrumento computacional utilizado para analisar o comportamento, via simulação, do escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. Em CFD ocorre por meio de análise numérica a resolução das equações de escoamento de fluidos sobre uma região de interesse, desde que com as condições iniciais e de contorno sejam conhecidas.

As equações de Navier-Stokes são utilizadas em CFD para prever o escoamento de fluidos. Conforme já foi visto, essas equações são derivadas parciais que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento. Estas equações diferenciais foram descritas no início do século XIX e não possuem soluções gerais analíticas, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

O cálculo numérico das Equações 2.22 a 2.24, em CFD necessitam da codificação de um programa em uma linguagem estruturada, como FORTRAN, C:, JAVA, entre outros, que resulta em um código computacional responsável pela obtenção dos resultados. Alguns softwares comerciais como ANSYS, FIDAP, PHOENICS, FEMLAB, FLEXP, MATLAB estão disponíveis para a solução dessas equações e são utilizados nos trabalhos que foram citados.

Nos casos de escoamentos laminares, os modelos são relativamente simples, pois as equações de Navier-Stokes podem ser resolvidas. Entretanto, a maioria dos escoamentos que acontecem na natureza e no meio industrial são turbulentos, e estes têm um alto grau de complexidade. Nesses casos as soluções para a equação de Navier-Stokes são frequentemente encontradas com a ajuda de computadores, justificando a utilização do CFD (SILVA, 2012).

Hargreaves e Silvestre (1990) definem o uso de Fluidodinâmica Computacional, a seguinte sequência de passos deve ser considerada:

- decidir as fronteiras do objeto ou espaço a ser analisado;
- dividir o volume de controle em células ou elementos apropriados;
- decidir as condições de contorno nas fronteiras do volume de controle;
- resolver o conjunto de equações de conservação; e
- estocar os resultados para todas as variáveis de controle.

No caso de escoamento incompressível, o software ANSYS FLUENT disponibiliza os algoritmos para o acoplamento pressão-velocidade, SIMPLE, SIMPLEC e PISO que são detalhados nos itens que segue:

- SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation*): o acoplamento é efetuado através de uma relação que permite corrigir a pressão a cada nova iteração de velocidade;
- SIMPLEC (SIMPLE – *Consistent*): diferencia-se do anterior apenas na expressão responsável pela correção da pressão, e
- PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): satisfaz de maneira mais adequada os balanços de momento após as correção de pressão.

O ANSYS FLUENT apresenta vários esquemas de interpolação. No esquema de interpolação padrão, os valores de pressão nas faces dos volumes de controle são interpolados através dos coeficientes da equação do movimento. Indicando onde a variação de pressão entre os centros das células computacionais não é tão brusca. O esquema linear de interpolação a pressão é calculada na face como a média dos valores entre as células fronteiriças. No esquema de interpolação de segunda ordem pode ser usado como a ressalva de que não haja escoamentos com gradientes de pressão descontínuos, devido a presença de meio poroso, ou uso de modelos multifásicos. Por fim, no esquema de forças de campo equilibradas, calcula-se a pressão na face, assumindo que o gradiente normal da diferença entre a pressão e as forças de campo, seja constante.

Leva-se também em consideração a existência de malhas co-localizadas, no qual são necessária as funções de interpolação para a pressão, pois todas as variáveis são armazenadas em um mesmo ponto (centro de volumes). Há também as malhas deslocadas, no qual não é necessário as funções de interpolação para a pressão, pois as variáveis são armazenadas no centro de uma malha principal e as componentes das velocidades são armazenadas nas faces das malha principal.

A maior dificuldade do aplicativo está na questão dele ser um *software* comercial. Mas tem ótima interface ferramenta-usuário, com a possibilidade de incluir sub-rotinas em linguagem FORTRAN e, além disso é flexível a inclusão de equações para o cálculo de certas variáveis.

O pacote ANSYS vem com cinco programas interligados. São eles:

- geometria – *Design Modeler* – utilizada para fazer as construções geométricas. Também é o domínio onde as equações de transferência de fluidos são resolvidas e obtidas as soluções;
- malhador – *Meshing App* – utilizado para a geração dos volumes finitos ou elementos da malha numérica, podem ser criadas diferentes secções, com o objetivo de encontrar o melhor resultado com o menor número de elementos;
- modelagem – CFX-Pre ou FLUENTE – utilizada para definição do modelo físico, propriedades dos materiais ou condições de contorno, onde ocorre o ajuste dos parâmetros de simulação;
- solução – CFX/FLUENTE-*Solver* – utilizado para resolução das equações e obtenção dos resultados, que podem ser gerados utilizando um ou vários processadores que irão promover um arquivo solução do problema, e
- análise do resultado – CFX/FLUENTE-*Post* – utilizado para análise dos resultados, que processa e apresenta dos dados graficamente, podendo o usuário, criar diferentes tipos de figuras e gráficos para melhor análise dos resultados.

Com base nos itens apontados, é possível verificar que tanto o uso do programa ANSYS CFX como FLUENTE, contempla adequadamente as necessidades de projeto, análise e simulação de um hidrociclone, utilizado para separação de misturas geradas em efluentes de indústria têxteis.

2.6 Estado da arte da aplicação dos hidrociclones

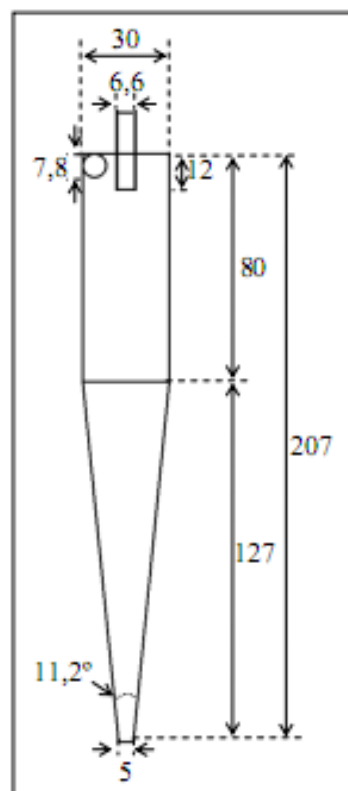
Em seu trabalho, Freitas (2009) propôs a recuperação de resíduos de óleo por meio da separação óleo-água decorrente da extração de petróleo. Para a análise do comportamento fluidodinâmico do hidrociclone proposto para essa separação, foi utilizado técnicas de CFD a partir da ferramenta computacional ANSYS CFX, com a construção da geometria, desenho da malha, ajuste dos parâmetros de simulação, resolução e análise dos resultados. Além disso, Freitas (2009) realizou um planejamento experimental com o objetivo verificar quais as dimensões geométricas mais interferem na eficiência de separação do hidrociclone. Para avaliar o desempenho do hidrociclone foi calculada a razão de fluido, “ R_f ” e a eficiência granulométrica reduzida, “ η ”, para cada geometria, optando pela análise da interação entre as diversas variáveis geométricas do hidrociclone.

Assim, Freitas (2009) realizou 19 experimentos computacionais, as simulações foram iniciadas com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e SSG. A partir da análise de *Essential*

Regression, Freitas (2009) mostrou que as variáveis que mais influenciaram foi o diâmetro de *overflow* e *underflow*. As eficiências granulométricas reduzidas ficaram adequadas para uma faixa de 96 % com gotas de 250 μm enquanto que os maiores valores de razão de fluido foi de 1,0 para razão entre o diâmetro de *overflow* pelo diâmetro de *underflow* e o menor foi 0,2 para o diâmetro de *overflow* pelo diâmetro de *underflow*. Freitas (2009) concluiu que nos intervalos estudados, os maiores valores de eficiência granulométrica reduzida foram obtidos com os maiores valores de “ D_o ” e os menores valores de “ D_u ” enquanto que os menores resultados de razão de fluido foram obtidos com os menores valores de “ D_o ” e os maiores valores de “ D_u ”.

Depois de um projeto de hidrociclone realizado é comum o estudo de mudanças na geometria do hidrociclone. Silva (2012) aproveitou o trabalho de Vieira (2006) para fazer uma otimização da geometria projetada, no qual fez um estudo da influência das variáveis geométricas no desempenho de hidrociclones, utilizando técnicas de CFD e de superfície de resposta para encontrar uma melhor configuração de hidrociclone, dentre vinte e cinco configurações analisadas para separação sólido-líquido. A configuração ótima encontrada pelo autor conciliava alto desempenho e baixo consumo energético e foi denominada HC11. As características desse hidrociclone podem ser vistas na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Hidrociclone HC11 com suas configurações características (em mm).



Fonte: Vieira, 2006.

Alguns aspectos são de extrema importância na escolha das configurações de um hidrociclone como o consumo de energia, concentração e desempenho que devem sempre ser observados em relação à viabilidade do equipamento. Frente à importância industrial, é de grande valia o alto desempenho com baixo consumo de energia e elevada concentração na corrente de *underflow* (SILVA 2012).

No trabalho de Silva (2012) foram propostas novas alterações geométricas no HC11, sendo alterada a espessura da parede do *vortex finder*, alteração do modelo do *vortex finder* para o tipo coifa, uso da rampa de alimentação e da alimentação rotacional. Suas novas eficiências foram avaliadas experimentalmente através de técnicas de CFD resultando em índices ainda melhores do que o que foi proposto por Vieira (2006).

Assim, três novas configurações geométricas de hidrociclone foram encontradas através do uso da técnica de superfície de resposta combinada com o algoritmo de Evolução Diferencial (ED). Os resultados obtidos através das técnicas de otimização foram validados com dados experimentais. As três configurações otimizadas de hidrociclone encontradas foram o hidrociclone HCOT1, com alta eficiência de separação, 85,5 %, hidrociclone HCOT2, com baixa razão de líquido, 9,37 % e o hidrociclone HCOT3 com baixo número de Euler, 788 e baixa razão de líquido, 5,08 %.

Almeida (2008) também propôs modificações no comprimento do *vortex finder* e no diâmetro de *underflow* do hidrociclone projetado por Vieira (2006). Através de planejamento fatorial, medidas experimentais e fluidodinâmicas computacionais, Almeida (2008) verificou que o número de *Euler* e o diâmetro de corte são inversamente proporcionais as variações de diâmetro de *underflow*. Porém, na sua análise, o número de *Euler* é diretamente proporcional as modificações de *vortex finder*. Por fim, Almeida (2008) verificou que a influência do comprimento do *vortex finder* sobre o diâmetro de corte proporcionaram as maiores eficiências de coleta de material particulado.

Outra possibilidade de trabalhos após o projeto de um hidrociclone é a avaliação das influências das variáveis, por meio das técnicas de CFD. Por exemplo, após projeto de um hidrociclone para separação de óleo-água, proposta por Marins (2007), foi feito por Coelho (2011) a avaliação dos perfis de velocidade tangencial e a eficiência de separação desse hidrociclone. Utilizando o modelo *langrangeano* e *euleriano*, foi construída três curvas de dispersão de óleo em água com medianas de distribuição de 21 μm , 45 μm e 130 μm . Coelho (2011) encontrou uma eficiência de separação para o modelo *langrangeano* de 32,3 %, 80,4 % e 96 % e para *euleriano* foi de 35,1 %, 80,3 % e 96 %.

Cruz (2008) também aplicou o estudo da perda de carga e da avaliação do desempenho de um hidrociclone do tipo *Rietema* utilizado como pré-filtro de partículas sólidas. Obteve como resultado uma perda máxima de carga de 52 *kPa* para suspensão aquosa de areia e 47 *kPa* para suspensão aquosa de solo. Obteve melhor desempenho operando com suspensão aquosa de areia, apresentando eficiência total de 92,3 % para vazão de 26,97 m^3/h afirmando assim a boa eficiência e aplicabilidade dos hidrociclones para pré-filtro em sistemas de irrigação.

Arruda (2008) cita os estudos de Souza et al. (1999) e Vieira et al. (2000) para apontar que os hidrociclones pertencentes à família *Bradley* proporcionam nas mesmas condições operacionais de um equipamento convencional, acréscimos na vazão de alimentação e decréscimo nos números de Euler. Na família *Rietema*, constatou um comportamento oposto a esse.

No trabalho de Corrêa Junior (2008) foram abordados aspectos sobre o tratamento de águas oleosas através de hidrociclones em uma planta de processamento primário de petróleo. Após a modelagem das equações, foi estudado as causas da quebra de gotas no interior do hidrociclone. Assim foi desenvolvido e verificado a eficiência de separação de um modelo de hidrociclone para indústria petrolífera utilizando modelagem computacional com o *software* MATLAB.

A tese de doutorado de Pinto (2007), no qual foi feito um estudo do uso de hidrociclone na separação de células animais da linhagem CHO (*chinese hamster ovary*). Pinto (2007) empregou diferentes técnicas para avaliar os efeitos do uso dos hidrociclones sobre a viabilidade de células CHO. K1 e CHO rhGM-CSF cultivadas a baixas concentrações de soro fetal bovino. O trabalho foi dividido em duas fases, a primeira delas, com a parte da modelagem matemática para descrever o desempenho dos hidrociclones em função de três variáveis (queda de pressão, diâmetro de *overflow* e *underflow*), onde se constatou altas eficiências. Ainda na fase de modelagem matemática foi utilizado as geometrias com melhores eficiências para serem testadas quanto à capacidade de se manter a viabilidade da cultura, tendo sido constatadas baixas quedas na viabilidade celular. Na segunda parte do trabalho, os hidrociclones foram testados em biorreatores agitados em perfusão para promover a retenção celular, não alcançando altas densidades celulares em biorreatores de pequena escala, mas foi verificado considerável crescimento da cultura, além de não ter sido constatado indução de apoptose. Em teste com biorreator industrial, o hidrociclone manteve alta eficiência de separação sem influenciar no metabolismo e viabilidade da cultura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para caracterização do lodo do efluente provido de uma indústria têxtil do município de Bagé, RS. Foram realizadas duas etapas de caracterização do lodo. A primeira delas foi à caracterização química, que contribuiu para se ter um conhecimento sobre as características químicas do material presente no lodo. Já a caracterização física forneceu os resultados dos parâmetros físicos que foram utilizados nas equações de projeto dos hidrociclones. Ressalta-se que todos os experimentos realizados na caracterização do lodo foram realizados em triplicata para garantir a confiabilidade dos dados.

Também neste capítulo do trabalho é apresentada a metodologia e os procedimentos de cálculos utilizados para o projeto e análise de sensibilidade dos parâmetros dos hidrociclones com geometria *Rietema e Bradley*.

Por fim esse capítulo apresentará as etapas que se referem à simulação, por meio de fluidodinâmica computacional, dos hidrociclones projetados, a partir do software *ANSYS*.

3.1 Matéria-Prima e Contextualização

Durante o processo de lavagem e fiação das lãs de ovinos de uma indústria têxtil do município de Bagé, RS, ocorre a geração de um efluente industrial, conforme mostra o esquema na Figura 3.1.

Figura 3.1- Esquema de Processo de Geração de Lodo em Indústria Têxtil.



(a) Origem da Matéria Prima



(b) Indústria Têxtil



(c) Lavagem da matéria prima (lã).



(d) Tratamento do Efluente



(e) Filtro Prensa



(f) Reaproveitamento

Na Figura 3.1, apresenta um esquema da geração do lodo após o tratamento do efluente. Na criação dos ovinos, Figura 3.1 (a) ocorre a formação de sujeira nas lãs por meio de sólidos, como poeira, remédios, fungicidas, terra, esterco, entre outros variantes de clima e região da onde se origina a lã do ovino. Após a tosquia desses animais a lã segue para a indústria têxtil, Figura 3.1 (b) onde, segundo Flores (2014), passará por uma triagem para selecionar as melhores lãs e formar os tops de lã. Após essa etapa as lãs selecionadas são encaminhadas para as lavanderias, Figura 3.1 (c), onde as lãs serão lavadas e será gerado grande quantidade de efluente e outros produtos de limpeza. O efluente vai seguir para o processo de tratamento, Figura 3.1 (d), onde há os tanques de equalização e posteriormente para os tanques de floculação e coagulação, conforme esquema da Figura 2.4, onde são acrescentados alguns componentes químicos como Sulfato de Alumínio ou Sulfato de Ferro II que atua na coagulação e cal que atua no equilíbrio do pH. Por fim a sujeira decantada, lodo gerado, é filtrado, Figura 3.1 (e) e segue para um filtro prensa onde ocorre a separação da parte sólida da parte líquida, Figura 3.1 (f).

Ocorre que para uma boa eficiência do filtro-prensa é imprescindível que o lodo gerado no tratamento do efluente chegue com o menor teor possível de umidade, o que em alguns casos pode se optar por incluir mais um processo físico de separação de sólidos-líquidos, como o uso de hidrociclones. Por isso, para a realização deste trabalho, foi utilizado o lodo do efluente resultante da lavagem da lã de ovinos de uma indústria têxtil do município de Bagé – RS. Na Figura 3.2 é apresentada uma fotografia ilustrativa do lodo utilizado.

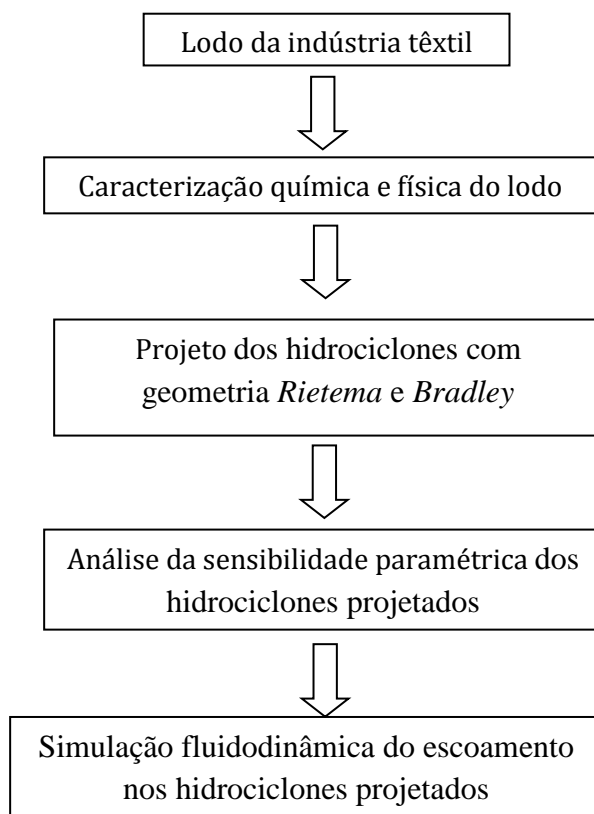
Figura 3.2- Lodo de efluente gerado em indústria têxtil do município de Bagé.



Fonte: Autor, 2015.

Para compreender melhor as etapas e procedimentos adotados durante a parte experimental, foi elaborado um fluxograma para contextualização, conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3– Fluxograma resumido das etapas do trabalho.



Fonte: Autor, 2015.

Conforme ilustra o fluxograma da Figura 3.3 as etapas que consistiram o desenvolvimento deste trabalho foram as caracterizações química e física do lodo, o projeto geométrico dos hidrociclones das famílias *Rietema* e *Bradley*, a análise da sensibilidade paramétrica dos hidrociclones projetados e a simulação computacional do escoamento do lodo nos hidrociclones projetados.

Todas as análises, químicas e físicas, realizadas para caracterizar o lodo, foram feitas com um mesmo lote, com o intuito de garantir um material com as mesmas características iniciais. A segunda etapa, referente ao conhecimento das características químicas e físicas do lodo foram importantes para conhecer o material no qual a indústria tem a disposição. Conhecendo as características químicas como pH, condutividade, DQO e quantidade de matéria orgânica é possível ter uma breve noção se o sólido contido no lodo pode ser reutilizado por outro setor industrial, como na área de cosméticos, materiais de construção ou

até como fertilizantes na agricultura. As características físicas como a viscosidade, concentração, massa específica e o diâmetro médio de partícula contribuíram para determinar o diâmetro de corte, esta última quando relacionada com a eficiência se tornam as variáveis mais importantes para realização do projeto geométrico dos hidrociclones (MASSARANI, 2002).

Na terceira etapa foi optado pela realização do projeto dos hidrociclones de geometria *Rietema* e *Bradley* por estes terem maior aplicação entre os trabalhos, como de Silva (2012), Vieira (2000) e Freitas (2009), envolvendo misturas de líquido-líquido ou de sólido-líquido. Em todos esses trabalhos, após a realização do projeto dos hidrociclones, são realizados os estudos de como ocorre o movimento dos fluidos no interior do hidrociclone.

Na última etapa foi realizada a simulação fluidodinâmica computacional do escoamento das fases no interior dos hidrociclones com base nas equações de Navier-Stokes. Devido a boa performance, visualização geométrica e apresentação gráfica dos resultados da simulação, foi optado pelo aplicativo *FLUENT* do software *ANSYS* para a realização das simulações (FREITAS, 2009).

3.2 Caracterização Química e Física do Lodo da Indústria Têxtil

Conforme mostra a Figura 3.1 e foi descrito anteriormente, o lodo provém do efluente de uma indústria têxtil, composta por lavanderias de lãs de ovinos e de fiação. Foi realizada uma coleta do efluente no interior da indústria após saída do tanque de floculação e coagulação, antes de passar pelo filtro prensa. As amostras foram coletadas e preservadas de acordo com as normas brasileiras NBR 13402, NBR 9898 e APHA, 1995. As caracterizações químicas e físicas foram realizadas nos laboratórios de Sistemas Particulados, Fenômeno de Transportes e de Química da Universidade Federal do Pampa.

A vazão, determinada junto com a coleta, foi medida através de vertedouro triangular, em local também utilizado pela própria empresa. Devido a diversidade de substâncias, principalmente diferentes sólidos que compõem o lodo, ele foi caracterizado em termos de padrões acumulativos, ou de características comuns às substâncias que o compõem.

Neste trabalho a caracterização química do lodo consistiu na obtenção dos parâmetros de condutividade, pH, DQO e quantidade de matéria orgânica. Estas análises químicas foram realizadas com o objetivo de comparar os valores das propriedades químicas do lodo com os exigidos pela Resolução 430, artigo 16 (CONAMA, 2011).

A condutividade do lodo foi obtida utilizando um condutivímetro da marca GEHAKA modelo CG 1800. Como padrão de comparação utilizou-se água destilada, que apresenta condutividade de 0,5 a 3,0 *S/cm* (BELTRAME, 2000).

O pH é um parâmetro importante na determinação da qualidade de despejos industriais, pois condiciona as reações químicas do meio. Muitas bactérias utilizadas em tratamento biológico são sensíveis a variação de pH além dos limites de 6,0 a 9,0. Também a fotossíntese pode ser reduzida pela elevação acentuada do pH (BELTRAME, 2000). Para a determinação do pH, foi utilizado pHmetro da marca HANNA modelo HI 2221.

Para isso, utilizou-se o método do refluxo aberto Beltrame (2000) com 25 *mL* de ácido sulfúrico para 1 *mL* de lodo e mais 5 *mL* de dicromato de potássio por uma hora e, após seu resfriamento, titulada com 1 *mL* de indicador de ferroína e sulfato ferroso amoniacal até mudar da cor verde para vermelho telha para a quantificação da DQO.

A concentração de sulfato ferroso amoniacal foi determinado pela Equação (3.1):

$$M = \frac{V_1 \cdot 0,1}{V_2} \quad (3.1)$$

onde V_1 é o volume de da solução titulada e V_2 é o volume da solução de sulfato ferroso amoniacal usado na titulação. O cálculo da DQO foi determinada pela Equação (3.2):

$$DQO = \frac{(V_A - V_B) \cdot M \cdot 8000}{V_{amostra}} \quad (3.2)$$

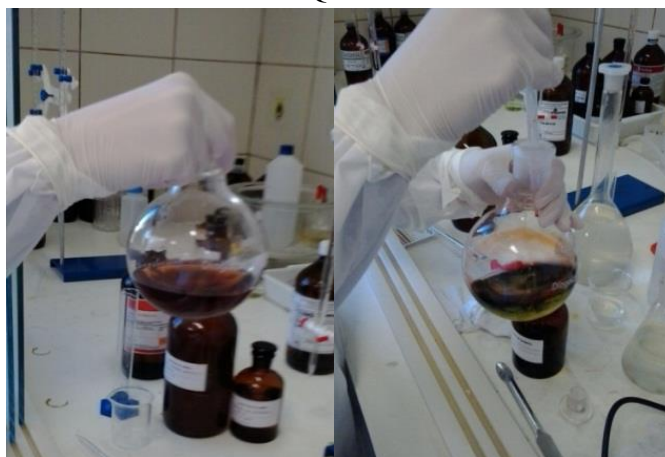
onde V_A é o volume de sulfato ferroso amoniacal usado no branco e V_B é o volume de sulfato ferroso amoniacal usado na amostra e $V_{amostra}$ é o volume da amostra.

Uma fotografia ilustrativa da realização, da análise da DQO é apresentada na Figura 3.4, na qual é possível verificar os materiais, reagentes e os procedimentos que foram utilizados no laboratório durante essa prática.

Figura 3.4 - Fotografia ilustrativa da análise da DQO.



(a) Etapa Refluxo da análise de DQO.



(b) Etapa da Titulação do Lodo Digerido.

Fonte: Autor, 2015.

O método escolhido para verificar o teor de óleos e graxas escolhido foi o de análise gravimétrico baseado nos documentos de análise da Petrobrás PE-37-0513 e APHA, 1995. A determinação da matéria orgânica foi realizada apart ir do uso de 1,0 ml do lodo diluído em 1 L de água destilada, em procedimento de oxidação com 1,0 ml de dicromato de potássio $0,042 \text{ mol L}^{-1}$ e 5,0 ml de ácido sulfúrico concentrado, com aquecimento em manta de aquecimento a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora e posterior titulação com sulfato ferroso amoniacal $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$, utilizando-se o indicador de ferroína. Primeiramente determina-se a massa de hidrocarbonetos existentes na amostra original pela Equação (3.3):

$$M_{Hc} = 1000 \cdot (M_f - M_i) \quad (3.3)$$

onde M_{Hc} é a massa de hidrocarbonetos, M_f é a massa final de solução após evaporação do solvente e M_i é a massa inicial na análise. Para determinar a concentração de hidrocarbonetos na amostra original, foi usada a Equação (3.4):

$$Conc = \frac{1000 \cdot (V_A - V_B)}{V_{amostra}} \quad (3.4)$$

onde $Conc$ é a concentração.

Uma fotografia ilustrativa do procedimento pode ser visualizada na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Fotografia ilustrativa da análise da matéria orgânica.



Fonte: Autor, 2015.

Quanto à caracterização física do lodo, foram feitas análises para a determinação da massa específica da suspensão, concentração volumétrica e mássica do sólido em suspensão, massa específica dos sólidos contidos na suspensão, viscosidade da suspensão e distribuição do tamanho médio das partículas contidas na suspensão. Essas análises serviram de base para o projeto dos hidrociclones das famílias *Rietema* e *Bradley*, devido que as dimensões, em

especial o diâmetro da secção cilíndrica e altura da secção cônica, vão depender do tamanho médio da partícula suspensa no lodo que será espessado nos hidrociclones.

Para a determinação da massa específica da suspensão de lodo, utilizou-se a técnica da picnometria líquida (BUENO, 1980). Nas medidas, a determinação do volume foi obtida com o uso de um picnômetro de 50 mL, previamente calibrado com água destilada, com o uso de uma balança analítica da marca SHIMADZU e modelo AUY220. O cálculo da massa específica foi feito com o uso da Equação 3.1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

onde, ρ , é massa específica, m é a massa e V é o volume do fluido.

A concentração volumétrica da suspensão foi determinada pela técnica da estufa a 105 °C por 24 h (PIVELI, 1996). Nessa técnica um volume de 50 mL foi inserido em uma placa de Petri. Esse volume, que teve sua massa determinada na mesma balança analítica usada na determinação da massa específica, foi deixado em estufa a 105 °C por 24 horas para a obtenção da massa o sólido seco contido no lodo. A concentração volumétrica do lodo foi obtida com o uso da Equação 3.6:

$$C_v = \frac{m_s}{V} \quad (3.6)$$

Para determinação da concentração mássica, " C_m ", foi utilizado a Equação 3.7.

$$C_m = 1 - \left(\frac{m_a - m_s}{m_a} \right) \quad (3.7)$$

onde " C_v " é a concentração volumétrica, " m_s " é a massa de sólido seco e " m_a " é a massa de água evaporada no lodo.

A massa específica dos sólidos contidos na suspensão, " ρ_s ", foi feita, conhecendo a concentração volumétrica da suspensão, " C_v ", a massa específica da suspensão, " ρ ", e a massa específica da água, " ρ_{H_2O} ", seguindo a Equação 3.8:

$$\rho_s = \frac{C_v}{\frac{1}{\rho} - \frac{(1-C_v)}{\rho_{H_2O}}} \quad (3.8)$$

onde " ρ_s " é a média harmônica das proporções de material sólido e água presentes no lodo.

Na determinação da viscosidade do lodo foi utilizado um viscosímetro do tipo copo FORD da marca Petrodidática. Nesse viscosímetro o orifício utilizado foi o de abertura de 3 mm cuja a equação para o cálculo da viscosidade cinemática é dada pela Equação 3.9:

$$v_c = 1,5765 t - 11,01 \quad (3.9)$$

onde " v_c " é a viscosidade cinemática em mm²/s e " t " é o tempo de escoamento em s. Para esta equação o tempo mínimo de escoamento do volume de líquido contido no viscosímetro deve ser de 20 s e o tempo máximo de 120 s.

Com o valor da viscosidade cinemática, a viscosidade absoluta da suspensão de lodo, “ μ ”, foi calculada com o uso da Equação 3.10.

$$\mu = \frac{v_c}{\rho} \quad (3.10)$$

Na determinação da distribuição do tamanho médio das partículas contidas na suspensão, utilizou-se a técnica da elutriação (ENGLERT & RUBIO). O elutriador utilizado nesta análise contém um tubo cilíndrico de 2,7 cm de diâmetro e 30 cm de altura. A Figura 3.6 mostra uma fotografia ilustrativa do elutriador e de todos os sistemas periféricos utilizados na elutriação, como a bomba peristáltica da marca MARCONI, a bomba de vácuo da marca SPARMAX, o funil de *buchner*, o *kitassato*, o elevador tipo *Jack* e o papeis de filtro.

Figura 3.6 - Fotografia ilustrativa do elutriador.



Fonte: Autor, 2015.

Na análise por elutriação, a determinação das frações da distribuição do diâmetro médio das partículas está embasada na diferença existente na velocidade terminal das partículas em regime de escoamento de Stokes. Nesse sentido, as frações coletadas no sistema de filtração do aparato de elutriação correspondem aos sólidos com diâmetro de partícula calculados através da Equação 3.11:

$$d_p = \left[\frac{18\mu v_a}{(\rho_s - \rho)g} \right]^{0,5} \quad (3.11)$$

onde “ d_p ” é o diâmetro médio da partícula, “ v_a ” é a velocidade de arraste na de elutriação e “ g ” é a aceleração da gravidade.

Na Tabela 3.1 é apresentado as vazões e os tempos de cada fase dos ensaios de elutriação. Com base nessa tabela observa-se que a elutriação foi realizada em duplicata, chamada análise 1 que foi dividida em cinco fases de elutriação e a análise 2 que foi dividida em nove fases de elutriação.

Tabela 3.1 - Vazões e o tempos de cada fase dos ensaios de elutriação.

Análise 1		Análise 2	
Q . 10 ⁻⁷ (m ³ /s)	t (s)	Q . 10 ⁻⁷ (m ³ /s)	t (s)
10,103	900	9,948	900
19,807	900	14,933	900
30,043	900	20,190	900
40,883	900	24,989	900
51,053	900	29,742	900
-	-	34,831	900
-	-	40,835	900
-	-	45,511	900
-	-	50,494	900

Fonte: Autor, 2015.

Na elutriação, a velocidade da partícula tem o mesmo sentido da velocidade da corrente do fluido sob ação de um campo gravitacional em movimento uniforme. O coeficiente de arraste é uma função do número de *Reynolds* da partícula e assim para verificar se o sistema se encontra em regime de Stokes (laminar), foi tomado o cuidado para que o “ Re_p ” se mantivesse abaixo de um, fato que foi verificado com o uso do método de Perry (1973).

Com base nos dados do diâmetro da partícula e das frações de sólidos retidas em cada fase da elutriação, determinou-se as curvas da distribuição do tamanho médio das partículas contidas na suspensão e o diâmetro de *Sauter*, “ D_s ”, dado pela Equação 3.13:

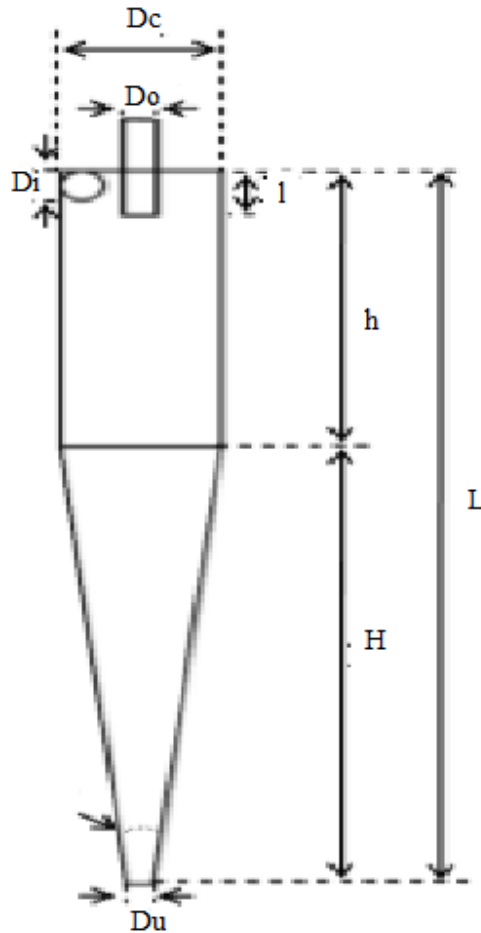
$$D_s = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{d_{pi}}} \quad (3.13)$$

onde “ X_i ” representa a fração de sólidos retida em cada elutriação e “ d_{pi} ” o diâmetro de *Stokes* de cada elutriação.

3.3 Projeto dos Hidrociclones da Família *Rietema* e *Bradley* e Análise da Sensibilidade Paramétrica

O projeto dos hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley* realizado neste trabalho foi embasado na metodologia proposta por Massarani (2002). A Figura 3.7 apresenta as dimensões de ambos os hidrociclones projetados nesse trabalho.

Figura 3.7 - Hidrociclones projetados.



Fonte: Massarani, 2002.

Desse modo, a eficiência individual de coleta, “ η ”, dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley*, relativa ao diâmetro médio das partículas, “ d_p ”, e do diâmetro de corte “ D^* ” foi expressa pela relação empírica da Equação 3.14:

$$\eta\left(\frac{d_p}{D^*}\right) = \frac{\exp(5d_p/D^*) - 1}{\exp(5d_p/D^*) + 146} \quad (3.14)$$

onde fixando um valor para “ η ” e conhecendo o “ d_p ”, calculou-se o valor do “ D^* ”. Conhecendo o valor do “ D^* ”, foi possível obter o valor do diâmetro da parte cilíndrica dos hidrociclones “ D_c ” com o uso das Equações 3.15 a 3.18, também propostas por Massarani (2002)

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} f(R_L) g(C_v) \quad (3.15)$$

$$f(R_L) = 1 + AR_L \quad (3.16)$$

$$R_L = B \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^C \quad (3.17)$$

$$g(C_v) = \frac{1}{[4,8(1 - C_v)^2 - 3,8(1 - C_v)]^{0,5}} \quad (3.18)$$

onde “ Q ” corresponde a vazão de alimentação da fase fluida na entrada do hidrociclone, “ $f(R_L)$ ” é um fator de correção que leva em conta o fato que uma fração das partículas sólidas é coletada no *underflow* sem a ação do campo centrífugo e está relacionado ao quociente entre as vazões de fluido no *underflow* e na alimentação “ R_L ”, sendo “ R_L ” calculado com o uso da Equação 3.15. Também na Equação 3.15, o termo “ $g(C_v)$ ”, que é obtido através da Equação 3.18, é um fator que leva em conta a concentração volumétrica “ C_v ” na alimentação. Os termos “ K ”, “ A ”, “ B ”, e “ C ” das Equações 3.15 a 3.17 são parâmetros tabelados para cada família de hidrociclones, onde seus valores podem ser encontrados na Tabela 2.3.

Com o valor de “ D_c ”, os hidrociclones foram projetados com o auxílio das relações propostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Razão em função do diâmetro da seção cilíndrica das famílias de hidrociclones.

Família	D_i/D_c	D_o/D_c	L/D_c	h/D_c	l/D_c	θ
Rietema	0,28	0,34	5	-	0,40	10° - 20°
Bradley	1/7	1/5	-	1/2	1/3	9°

Fonte: Massarani, 2002.

Com os dados de projeto dos hidrociclones, efetuou-se uma análise da sensibilidade paramétrica através da observação da eficiência de coleta dos hidrociclones frente a variações na “ Q ”, “ ρ_s ”, “ C_v ” e “ d_p ”. Também se efetuou uma análise da queda de pressão nos hidrociclones, “ ΔP ”, frente a variações na vazão de alimentação, “ Q ”, para regime turbulento. Para essa análise foi utilizada as Equações (3.15) e (3.16), propostas por Massarani (2002):

$$\beta = \frac{-\Delta P}{\rho \left(\frac{u_c^2}{2} \right)} \quad (3.19)$$

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (3.20)$$

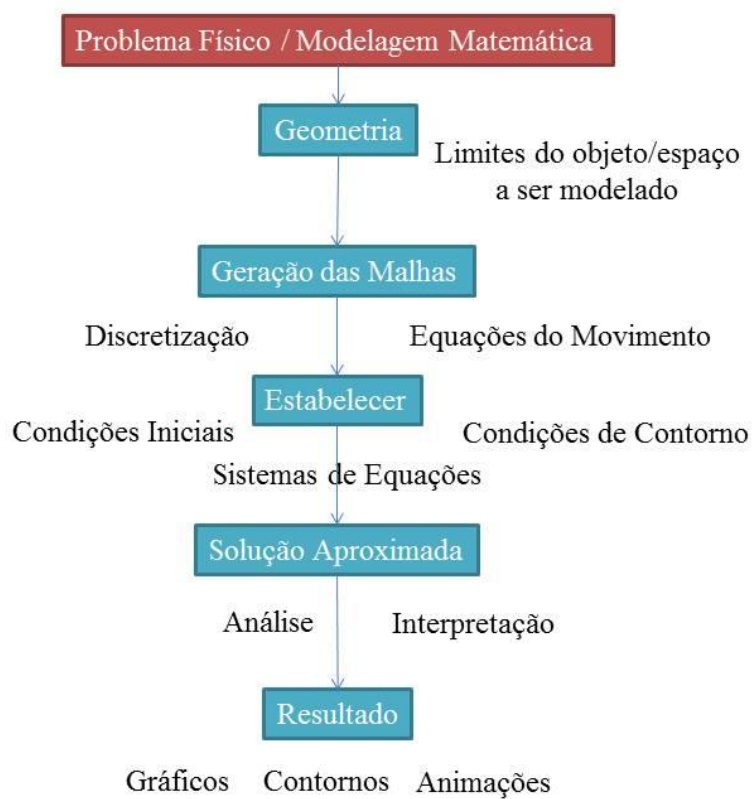
onde “ u_c ” corresponde a velocidade média na seção cilíndrica e β é um adimensional que relaciona forças de pressão com força de inércia.

3.4 Simulação dos Hidrociclones Projetados

Na intenção de estudar o desempenho dos hidrociclones projetados, simulações numéricas tridimensionais foram efetuadas para a determinação de algumas características do escoamento no interior desses separadores. Para tal, foi utilizado o pacote computacional comercial ANSYS FLUENT, versão 14.5. Esse pacote computacional foi processado em microcomputador com configurações básicas de processador de *Pentium core i3 (Inspirion 14 Série 3000)*, com memória de 4 GB DDR3 e disco rígido de 1TB.

As simulações em um *software* ANSYS em CFD segue a sequência demonstrada no fluxograma da Figura 3.8

Figura 3.8 - Fluxograma dos passos para simulação em CFD.



Fonte: Autor, 2015.

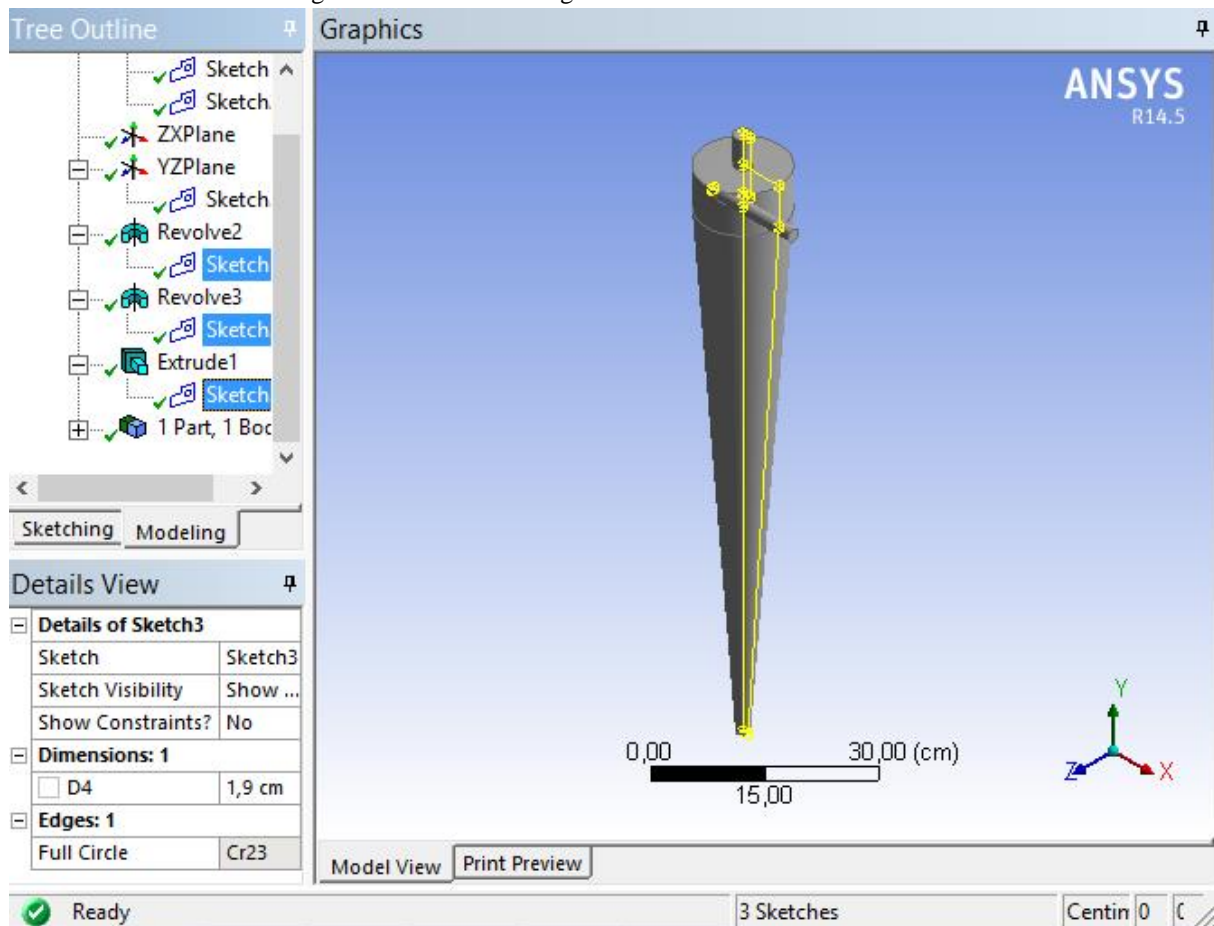
Conforme apresentado na Figura 3.8, em geral uma simulação em CFD pode ser dividida basicamente em três etapas principais: o pré-processador que refere-se à construção da geometria e geração das malhas, a etapa *solver* que corresponde a estabelecer as condições

iniciais e de contorno e a geração das equações do movimento e os sistemas de equações, no fim o pós-processador que corresponde as análises e interpretações do problema e apresentação dos resultados que podem ser por gráficos, contornos vetoriais ou animações (COELHO, 2011).

3.4.1 Geometria e Criação de Malhas

A etapa correspondente ao pré-processador consistiu em estudar e entender os problemas físicos envolvidos no processo como as variáveis do problema, a geometria a ser utilizada e o tipo de escoamento do fluido. A primeira etapa para iniciar uma simulação em CFD foi criar a geometria. A Figura 3.9 apresenta um exemplo de geometria criada no software ANSYS.

Figura 3.9- Hidrociclone geometrizado no software ANSYS.



Fonte: Autor, 2015.

Conforme visualizado na Figura 3.12, a geometria realizada nesse exemplo foi um hidrociclone. Dependendo do escoamento em questão, é possível escolher entre os sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas, esféricas, ortogonal e não-ortogonal, que podem ser fixos ou em movimento.

Os hidrociclones de configuração *Rietema* e *Bradley*, foram projetados para o tratamento de lodos providos de indústrias têxteis. Estes dois hidrociclones apresentam diferenças no diâmetro da secção cilíndrica e na altura da secção cônica, porém ambos possuem diâmetro de *overflow*, onde ocorrerá saída de líquido, maior que o diâmetro de *underflow*, onde ocorrerá a saída de sólidos.

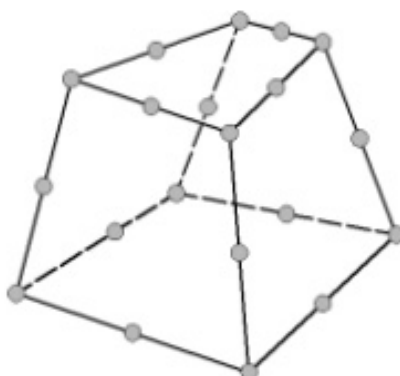
A construção das geometrias para as simulações nestas seções foram feitas com base na estrutura interior dos hidrociclones, denominada tubo interno. O tubo interno facilitou a montagem da estrutura do hidrociclone e a utilização dos elementos de malha em todas as partes do equipamento.

A presença do tubo interno facilita a construção de uma malha com o máximo possível de elementos com característica hexaédrica, pois permite a inserção de um tipo de elemento na face do *overflow* que termina na face de *underflow* (SILVA, 2012).

O domínio definido é então discretizado, sendo dividido em sub-regiões, ou elementos, onde serão obtidas as soluções para as equações em questão. O conjunto de elementos presentes é chamado de malhas. O tipo de complexidade do escoamento e a geometria foram fatores essenciais na escolha da malha a ser utilizada na resolução do problema (LEAHY-DIOS, 2003).

A Figura 3.10 apresenta uma malha hexaédrica com 20 nós.

Figura 3.10- Exemplo de malha hexaédrica.



Fonte: FERAREZ, et al, 2015.

3.4.2 Construção das Malhas

As malhas estruturadas foram geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos que, geralmente, são hexaedros, no qual permite a realização de cálculos mais precisos e seguros, representando com maior fidelidade os fenômenos interfaciais. Porém, um maior esforço computacional é necessário para representar tais fenômenos.

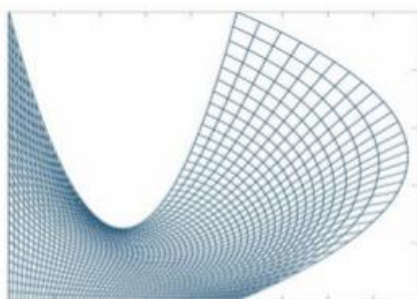
As geometrias estudadas foram subdivididas em pequenos volumes (domínios menores), onde as equações de balanço foram aplicadas. As equações que descrevem o fenômeno físico do problema foram resolvidas em cada volume, e a solução de um volume foi utilizada como condição de contorno para o volume vizinho.

No aplicativo do ANSYS foi possível criar diversos tipos de malhas para representar uma solução cada vez mais real, podendo ser classificadas, segundo Coelho (2011) em duas espécies:

- Malhas Estruturadas: localmente ortogonais que obedecem a um sistema de coordenadas. Cada ponto do interior da malha é adjacente ao mesmo número de elementos. A posição de qualquer ponto da malha é identificada unicamente por dois índices (i, j) ou três índices (i, j, k), para problemas em duas e três dimensões, respectivamente, podendo ser facilmente armazenados em uma matriz.
- Malhas Não Estruturadas: não tem restrição ao número de elementos vizinhos a um determinado elemento. Devido ao fato de ser mais flexível, esse tipo de malha geralmente é utilizada em geometrias mais complexas, pois pode ser aplicada em qualquer domínio estabelecido.

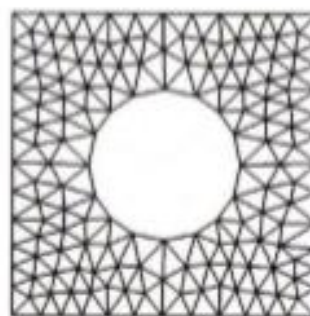
Uma visualização na diferença entre os dois tipos de malha apresentados pode ser visualizado na Figura 3.14.

Figura 3.11- Diferença entre malha estruturada e não estruturada.



(a) Organização dos pontos de uma malha estruturada.

(GALANTE, 2006)



(b) Malha não estruturada com elementos triangulares.

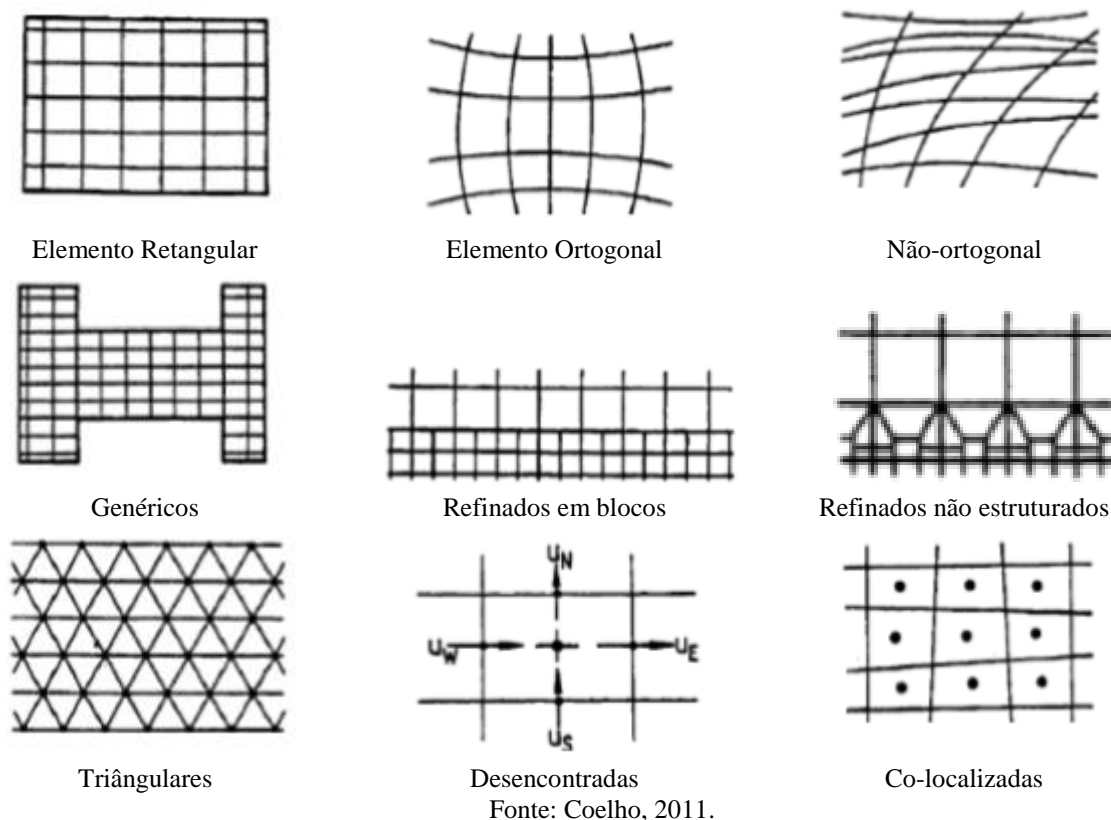
(AGUIRRE, 2010)

Com a complexidade da geometria dos hidrociclones, foi optado pelas malhas do tipo não estruturadas. Para esse tipo de malha, o *software* ANSYS apresentou algumas opções de elementos que poderiam ser utilizados. Segundo Leahy-Dios (2003), os elementos disponíveis para elaboração de malhas não estruturadas são descritos nos itens que se seguem.

- Retangulares: utilizado em geometrias simples, com contornos retangulares. Seu uso em geometrias mais complexas implica no desligamento de alguns elementos. Porém, mesmo esses elementos são guardados e incluídos formalmente no processo de solução, gerando assim maior consumo de memória computacional que o requerido.
- Ortogonais: nesse tipo de malha os elementos não são retangulares, mas são ajustados para que todos os ângulos de canto sejam retos.
- Não-Ortogonais: os elementos nessa malha têm ainda menos restrições que os elementos ortogonais, já que os ângulos não são fixados, porém os limites externos devem ser topologicamente ortogonais.
- Genéricos: esses elementos são característicos de malhas não estruturadas, não apresentando as restrições mencionadas acima. É altamente econômico na representação de formas complexas.
- Refinados em Blocos: os elementos dessa malha devem se encaixar na geometria básica e também considerar variações locais na intensidade do campo de escoamento. Esse tipo de refinamento se dá em blocos de uma malha estruturada.
- Refinados não estruturados: o refinamento local de malha faz uso das várias opções do ambiente não estruturado.
- Triangulares: os elementos dessa malha são triangulares, proveniente de elementos quadriláteros ou hexahédricos. Essa opção é mais flexível quanto ao tipo de geometria utilizada.
- Desencontrada: nessa malha, os elementos são diferentes para diferentes variáveis, garantindo a estabilidade numérica, e sendo usada com a informação de velocidade atribuída a cada lado (2D) ou face (3D) de um elemento. Exige vasta memória e é difícil de ser incorporada em uma malha severamente distorcida.
- Co-localizada: esse tipo de malha tem as propriedades avaliadas no mesmo ponto de cada elemento.

A Figura 3.12 apresenta a ilustração de todos os elementos utilizados nesse trabalho.

Figura 3.12- Elementos de Malha.



Durante o processo de simulação, foi utilizado programado para que as malhas fossem geradas no modelo não estruturado e com elementos retangulares, conforme sugere a maioria dos trabalhos nessa área, como Silva (2009), Coelho (2011), Freitas (2009), Medronho (2003) entre outros que fizeram simulação em hidrociclones utilizando o software Ansys.

Devido a geometria do hidrociclone, porém, nem todos os elementos criados foram retangulares. Houve uma predominância desse tipo de elemento, com alguns elementos triangulares devido a convergência da geometria, principalmente na transição da secção cilíndrica para cônica.

3.4.3 Testes de Malha – Simulação Monofásica

Após a construção da malha, foi realizado um teste de malha com a geometria a fim de garantir que a malha não estivesse influenciando os resultados e que, por outro lado, não

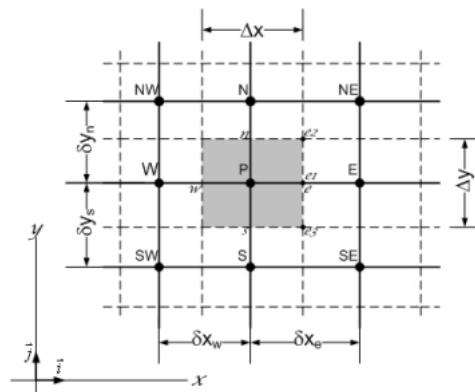
aumentasse desnecessariamente o esforço computacional. Para analisar a melhor malha foi observado o perfil de velocidade tangencial, utilizando as Equações (2.25) a (2.28) definidas na secção 2 desse trabalho por Equações de Navier-Stokes. Assim, velocidade determinou o campo centrífugo no interior do hidrociclone, item fundamental na separação das fases no interior do equipamento.

A curva da velocidade tangencial para cada configuração do hidrociclone foi dado em função do raio do hidrociclone.

Segundo Medronho (1984), quando não é possível a solução analítica, pode-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, para um determinado erro. Quanto mais elementos e nós tiver a malha gerada no projeto, mais a solução numérica, determinada pela simulação fluidodinâmica, se aproximará da solução real.

Após a geração das malhas, foi utilizado uma ferramenta numérica para determinar a resolução das Equações (2.25) a (2.28). Essa ferramenta foi necessária para discretizar o domínio em estudo, proporcionando a transformando das equações diferenciais em sistemas de equações algébricas, conforme mostra a Figura 3.13:

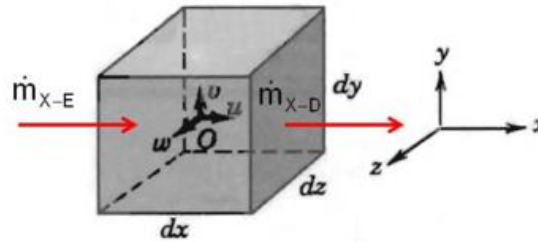
Figura 3.13- Discretização de um domínio em um sistema de equações algébricas.



Fonte: Carvalho e Marchi, 2009.

Em CFD foi possível optar pelo método dos Volumes Finitos (MVF), que é caracterizado pela utilização da forma integral das equações de conservação. Essas equações são aplicadas no centroide de cada um dos finitos volumes de controle gerados com subdivisões do domínio, conforme mostra a Figura 3.14:

Figura 3.14- Esquema da aplicação do balanço de conservação do movimento em um volume de controle.



Fonte: Apartado de Maliska, 2004.

O método apresentado na Figura 3.14 raramente gera casos de instabilidade. De acordo com Medronho (1984) convergências são mais comuns de acontecer, pois é possível garantir que cada volume de controle obedece a lei de conservação.

No ANSYS, na condição *opening* o escoamento se encontra livre para entrar ou sair do equipamento. Na condição de escoamento *inlet*, só ocorre entrada de fluido e *outlet* só saída. As condições de contorno para *overflow* e para *underflow* foi pressão manométrica igual a zero. O principal critério para verificar se a simulação iria convergir foi a obtenção de um erro no fechamento do balanço de massa de sólido e água inferior a 0,5 %.

Para reduzir o tempo de processamento, os testes de malha foram simulados com uma fase contínua, água, com o modelo de turbulência RSM (*Reynold Stress Model*) e a massa específica da água usada na simulação foi $998,2 \text{ kg/m}^3$ e a viscosidade foi 1.034 Ns/m^2 (MASSARANI, 2000).

Segundo Medronho (1984), conhecendo as características físicas do material a ser simulado, se estabelece as condições iniciais e de contorno, sendo os principais deles, a vazão volumétrica do fluido na alimentação, a pressão no *overflow* e no *underflow*, utilizando os recursos da função *pressure outlet* ou *pressure input*, dependendo do domínio que pretende-se estabelecer.

3.4.4 Simulação Bifásica

Para a simulação bifásica, o lodo industrial foi encarado como uma mistura de sólidos diluídos em água, no qual foi utilizado a função *Discrete Phase Model* que segundo Medronho (2003), utiliza a distribuição de partículas para o cálculo das trajetórias das suas trajetórias e assim calcular as eficiências. Para isso foram adicionadas ao programa as propriedades físicas do lodo e do sólido contido nele.

A última etapa de uma simulação, pós-processador, em CFD foi a análise dos resultados obtidos. O ANSYS permitiu uma gama de ferramentas para analisar os resultados, como a construção de gráficos, vetores de perfis de velocidade, pressão e concentração. A dinâmica desse *software* também possibilitou comparar várias simulações obtidas, visualizar a trajetória das partículas, linha de corrente, criar animações para entender melhor o fenômeno, importar e exportar dados de outros programas.

3.4.5 Cálculo da Eficiência

Para verificar qual hidrociclone teve melhor eficiência, utilizou-se o método *Lagrangeano* para uma distribuição de partículas simuladas no software Ansys, no aplicativo Fluent. Tal análise foi realizada a partir da distribuição de partículas gerada por uma curva de eficiência.

Através das Equações 2.1 e 2.12, seguindo o modelo *Lagrangeano*, se obtém a relação da Equação 3.21 entre a eficiência granulométrica reduzida e as dimensões da partícula da fase suspensa:

$$\eta' = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{d_p}{D^*} \right)^n \right] \quad 3.17$$

onde “ η' ” representa a eficiência granulométrica reduzida, “ d_p ” é o tamanho médio das partículas e “ D^* ” é o diâmetro de corte. Assim, a linearização dessa equação resulta em:

$$\ln(-\ln(1 - \eta')) = \ln(0,693) + n \cdot \ln \left(\frac{d_p}{D^*} \right) \quad 3.18$$

no qual foi realizado a visualização gráfica das equações.

Assim, conforme Coelho (2011), da Equação 3.18 e com os dados gráficos gerados, foi possível encontrar o valor de n , e assim, gerar a curva de eficiência “ η ” em função do tamanho médio da partícula para as configurações de hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* projetados para espessamento do lodo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo do trabalho apresenta os principais resultados encontrados durante a pesquisa de mestrado, sendo que os resultados referente a simulação computacional serão apresentados na versão final do trabalho de dissertação.

4.1 Caracterização do Lodo

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da análise química do lodo do efluente da indústria têxtil. Para poder comparar com os padrões da legislação, foi colocado na mesma tabela os valores sugeridos pelo CONAMA para lançamento de efluentes em fontes hídricas.

Tabela 4.1 - Resultados da análise química do lodo do efluente da indústria têxtil.

Amostra	CONAMA	Resultado
pH	5 – 9	$7,89 \pm 0,02$
DQO	Até 150 mg/L	$61,6 \pm 4,7$ mg/L
Condutividade	Até 1500 $\mu S/cm$	$797,3 \pm 305,24$ $\mu S/cm$
Óleos e Graxas	50 mg/L	$130,66 \pm 9,17$ mg/L

Fonte: Autor, 2015.

Entre as características químicas do lodo apresentadas na Tabela 4.1, conforme determinação da legislação Resolução 430 (CONAMA, 2011) demonstra que o lodo do efluente da indústria têxtil apresenta quantidade de óleos e graxas que não estão conforme as normas padrão da legislação para lançamento de efluente em fontes hídricas.

O resultado levemente alcalino do pH apresentado na Tabela 4.1 é decorrente ao lançamento de hidróxido de sódio durante a lavagem das lãs dos ovinos. Para neutralizar esses valores é necessário o uso de substâncias ácidas no tratamento do efluente, chamados banhos alcalinos (BELTRAME, 2000).

O baixo nível de poluente por demanda de oxigênio apresentado na Tabela 4.1 é esperado para indústrias de setor têxtil primário, sendo um fator mais preocupante nas de beneficiamento devido aos processos de tingimento. Segundo Beltrame (2000) o aumento de DQO está relacionado a concentração de sal que pode estar presente em algumas variedades de lãs, dependendo da raça do ovino.

O resultado acima do indicado pela Resolução 430 (CONAMA, 2011) referente a óleos e graxas apresentado na Tabela 4.1 decorre dos dispersantes, desluzantes e outros produtos a base de ácidos graxos utilizados como auxiliares na lavagem. Também podem

contribuir com resultados que elevam o nível de óleos e graxas o uso de amaciantes, dos óleos de ensimagem e dos despejos da cozinha industrial (BELTRAME, 2000).

É realizada durante o procedimento de tratamento do efluente industrial a separação da lanolina, um tipo de gordura obtida da lã, e que é muito difundida na indústria de cosméticos para fabricação de produtos de higiene, beleza e pomadas terapêuticas (CARREIRA, 2006).

Na Tabela 4.2 são apresentados os dados da caracterização física do lodo do efluente da indústria têxtil.

Tabela 4.2 - Caracterização física do lodo do efluente da indústria têxtil.

ρ (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	C_v (%)	C_m (kg/m ³)	μ (Ns/m ²)	d_p (μm)
1000,05 ± 0,9	1002,64 ± 0,9	4,02 ± 0,15	0,419 ± 0,02	0,0017 ± 0,004	586,15 ± 1,11

Fonte: Autor, 2015.

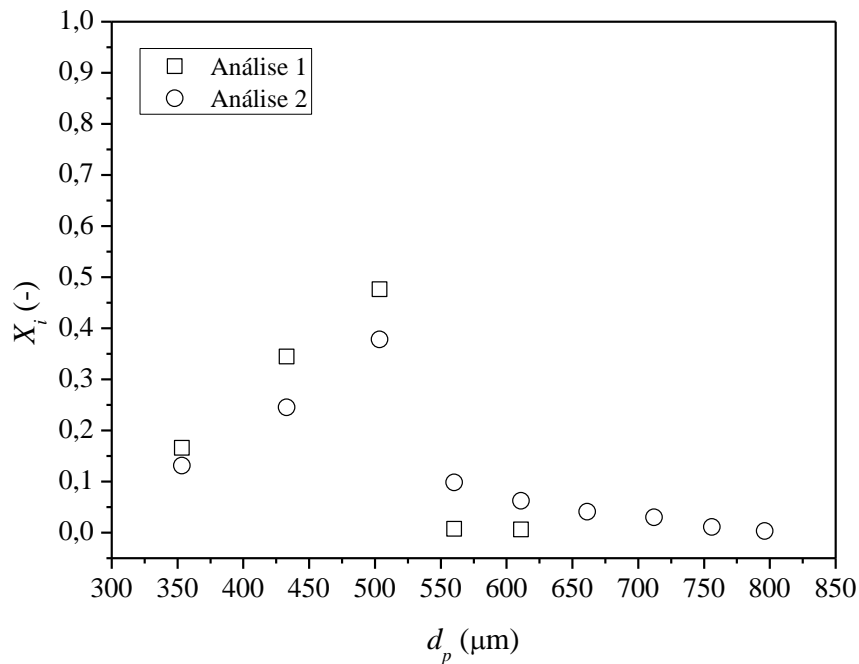
Observa-se na Tabela 4.2 que “ ρ ” é bastante próxima a “ ρ_s ”. Esta proximidade pode ser um aspecto negativo para a eficiência de separação dos hidrociclones, visto que o princípio de separação do equipamento se dá pela ação da força centrípeta.

Em relação a “ C_v ”, é verificado que o lodo encontra-se em uma fase bastante diluída. Este valor aparentemente baixo para indústria têxtil deve-se a matéria-prima utilizada e sua forma de tratamento (BELTRAME, 2000). A forma de tratamento da lã para preparação dos fios utiliza uma grande quantidade de água e detergentes, deixando o lodo bastante diluído. Os processos que elevam “ C_m ” para níveis acima de 0,10 mL/L são os processos de purga e desengomagem, presentes no setor primário da indústria têxtil.

Conforme mostra a Tabela 4.2, o valor de “ d_p ” encontrado foi de aproximadamente 586 μm. No trabalho de Caliar e Teixeira (2009) foi verificado que valores de “ d_p ” estão relacionados com a turbidez da água, justificada pela influencia dos aglomerados de sólidos. Esse é um fator relevante na vida aquática, principalmente para as plantas, pois essas necessitam de pouca turbidez na água para receber a luz do sol e realizar a fotossíntese.

Para uma melhor visualização da distribuição do tamanho médio de partículas do sólido contido no lodo é apresentada a Figura 4.1 que foi obtida através da elutriação.

Figura 4.1- Fração ponderal retida em função do diâmetro das partículas.



Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Figura 4.1 que as partículas sólidas contidas no lodo do efluente da indústria têxtil apresentam um comportamento típico de distribuição granulométrica diferencial, com formato de curva de distribuição normal (Foust et al. 1982). Para as análises 1 e 2 aproximadamente 40 % dos sólidos apresentaram um diâmetro de partícula de 500 μm .

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, nos tanques de coagulação/floculação, o lodo passa por um sistema de tratamento onde todo sólido contido é decantado e será novamente utilizado na prensa hidráulica para formar as tortas. Um valor relativamente alto do diâmetro médio de partículas é esperado, uma vez que grande parte das partículas finas presentes no efluente atravessa o filtro e não estão contidas no lodo.

Diferenças nessa variável podem ocorrer, segundo Pereira (2010) dependendo da origem do fluido e dos tratamentos utilizados na preparação da matéria-prima industrial e das diferentes condições de operações com os equipamentos industriais podem ocorrer sólidos com tamanhos de diâmetros mais grossos ou mais finos.

A distribuição granulométrica de frequência dos sólidos coletados no elutriador se observou apenas um diâmetro médio, ocorrendo próximo a 500 μm , segundo Pereira (2010), isso indica que a porcentagem de partículas com diâmetro 500 μm é maior. As correntes no elutriador apresentam distribuição modal, ou seja, há sempre pelo menos um diâmetro médio.

Assim, no lodo analisado, ha presença de pelo menos dois tipos de sólidos diferentes, uns mais finos e outros mais grossos.

4.2 Projeto dos Hidrociclones da Família *Rietema* e *Bradley* e Análise da Sensibilidade Paramétrica

Na Tabela 4.3 é apresentado os valores “ R_L ”, “ $f(R_L)$ ”, “ $g(C_v)$ ” e β obtidos para os hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* operando em uma vazão de alimentação “ Q ” de 0,014 m³/s, baseado nos resultados de vazão de lodo da indústria.

Tabela 4.3 - Valores “ R_f ”, “ $f(R_f)$ ”, “ $g(C_v)$ ” e β calculados para os hidrociclones *Rietema* e *Bradley*.

<i>Rietema</i>			<i>Bradley</i>				
R_f	$f(R_f)$	$g(C_v)$	$B5$	R_L	$f(R_f)$	$g(C_v)$	β
0,069	1,120	1,1365	1200	0,167	1,288	1,1360	75000

Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Tabela 4.3 que a razão de fluido “ R_f ” no hidrociclone do tipo *Rietema* é menor que a encontrada no hidrociclone do tipo *Bradley*. Isso indica que hidrociclone do tipo *Rietema* possui uma capacidade maior para o espessamento do lodo, pois quanto menor for o valor de R_L menor é quantidade de líquido saindo no *underflow* (Massarani; 2002).

Na Tabela 4.4 é apresentado os valores das dimensões características dos hidrociclones do tipo *Rietema* e *Bradley* projetados neste trabalho, tendo como base os valores “ R_f ”, “ $f(R_f)$ ”, “ $g(C_v)$ ” e β calculados e apresentados na Tabela 4.3 e uma eficiência individual de coleta “ η ” de 80 %.

Tabela 4.4 - Dimensões dos hidrociclones tipo *Rietema* e *Bradley* projetados.

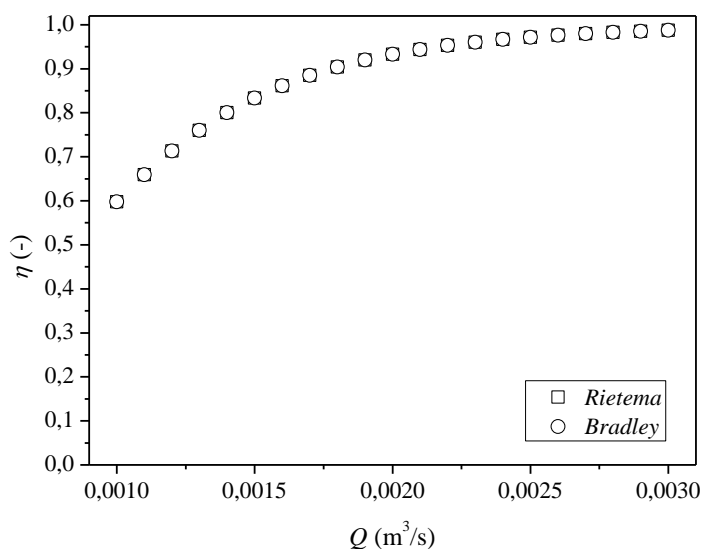
Família	D_c (cm)	D_i (cm)	D_o (cm)	L (cm)	h (cm)	l (cm)
<i>Rietema</i>	8,10	2,27	2,75	40,5	-	3,24
<i>Bradley</i>	13,37	1,91	2,67	-	6,68	4,46

Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Tabela 4.4 que os hidrociclones projetados apresentam diferenças significativas nas suas dimensões características, principalmente no valor de “ D_c ”. Para essa dimensão o hidrociclone do tipo *Rietema* apresentou um valor de aproximadamente 1,6 vezes menor que o encontrado para o hidrociclone do tipo *Bradley*.

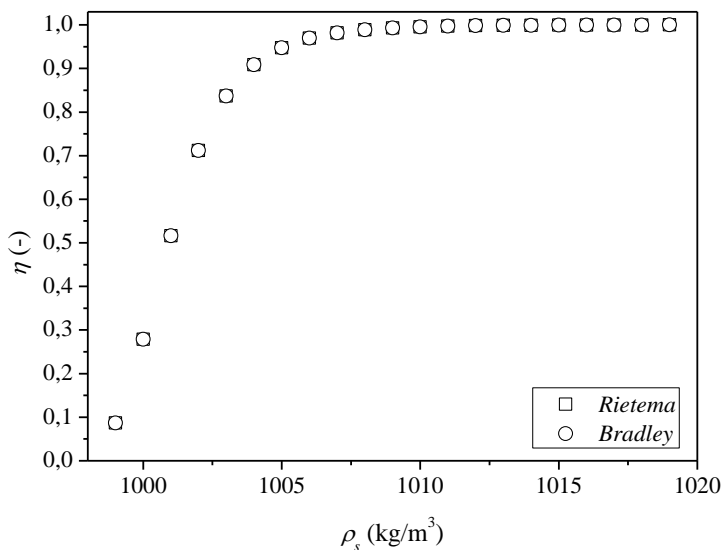
Nas Figuras 4.2 a 4.5 são apresentados os resultados obtidos na análise de sensibilidade paramétrica dos hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley* projetados.

Figura 4.2- Eficiência de coleta em função da vazão de alimentação.



Fonte: Autor, 2015.

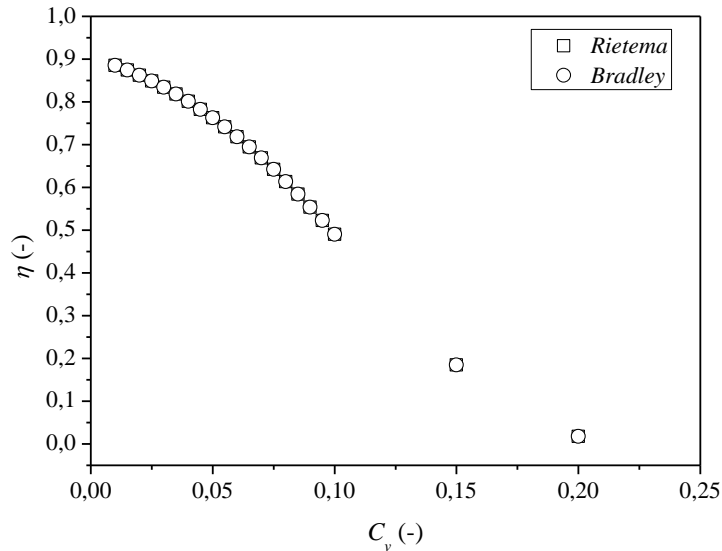
Figura 4.3 - Eficiência de coleta em função da massa específica do sólido.



Fonte: Autor, 2015.

As curvas das Figuras 4.2 e 4.3 mostram que o aumento nos valores da “ Q ”, “ ρ_s ” promovem um aumento no valor da “ η ” para ambos os hidrociclones projetados. Este resultado condiz com o esperado fisicamente, visto que o aumento dessas variáveis promove um aumento na força centrípeta e, conseqüentemente, uma elevação na eficiência de separação.

Figura 4.4- Eficiência de coleta em função da concentração de sólido.

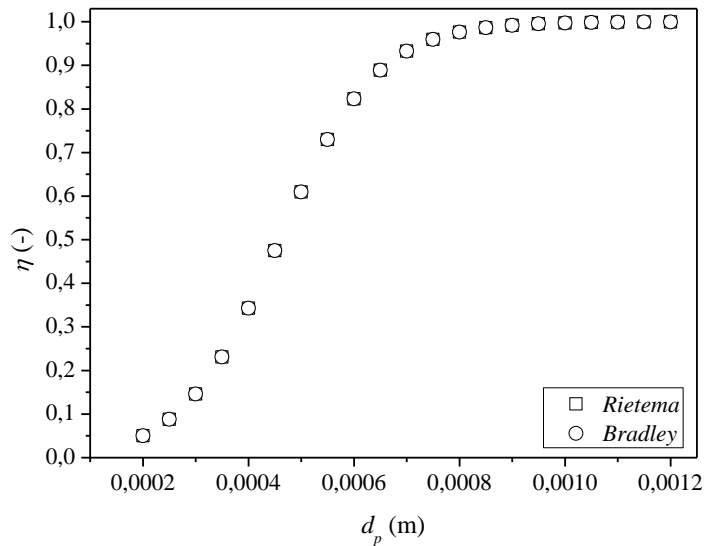


Fonte: Autor, 2015.

Conforme apresentado na Figura 4.4, para o aumento no valor da “ C_v ” é verificado na uma diminuição no valor da “ η ”, em ambos os hidrociclones projetados. Novamente, este fenômeno está de acordo com o esperado. Segundo Massarani (2002) a concentração de sólido no efluente é inversamente proporcional à eficiência, pois a velocidade terminal da partícula sofre uma redução devido à presença de outras partículas. Sendo assim, a concentração de sólido influencia substancialmente na velocidade de uma partícula, fazendo com que a eficiência de coleta do equipamento sofra uma redução.

Variações no diâmetro de partícula são bastante comuns em efluentes providos da indústria têxtil, uma vez que há características diferentes na matéria prima utilizada para realização do processo primário desse tipo de indústria modifica as características de suspensão contidos no efluente e conseqüentemente no lodo resultante do processo de tratamento. Nos trabalhos de Medronho (2003), Vieira (2006) e Coelho (2011) observou-se que a eficiência do hidrociclone aumenta com o aumento do valor do diâmetro de partícula. A Figura 4.5 apresenta uma análise da eficiência dos hidrociclones de configuração *Rietema* e *Bradley* que foram projetados com uma variação no valor do diâmetro de partícula.

Figura 4.5- Eficiência em função do diâmetro de partícula.

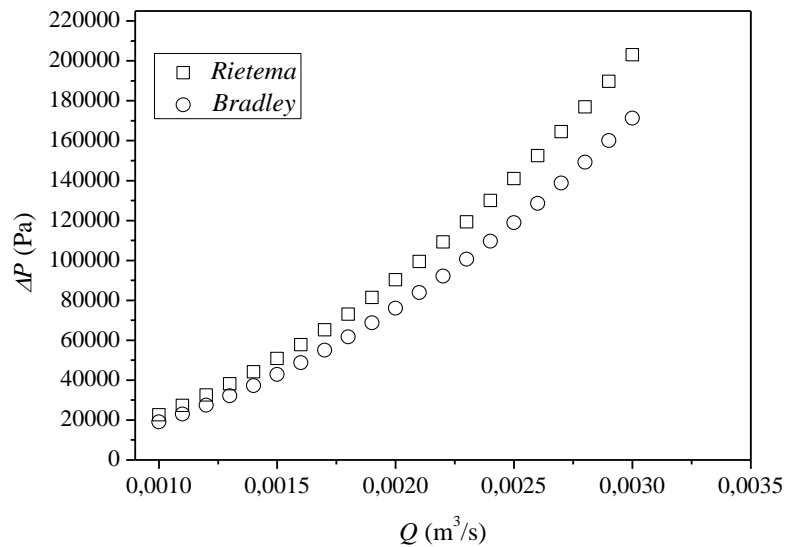


Fonte: Autor, 2015.

Um aspecto importante também observado nas curvas das Figuras 4.2 a 4.5 é a faixa granulométrica dos sólidos contidos no lodo estudado. Como o diâmetro das partículas é relativamente alto, maior que 100 μm (Mihelcic e Zimmerman; 2012), os dois tipos de hidrociclone operam de maneira muito semelhante e apresentam valores na eficiência individual de coleta muito próximos um do outro.

Na Figura 4.6 é mostrada a análise da perda de carga “ ΔP ” nos hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley* projetados em função da vazão de alimentação do lodo (“ Q ”).

Figura 4.6- Perda de carga nos hidrociclones projetados em função da vazão de alimentação do lodo.



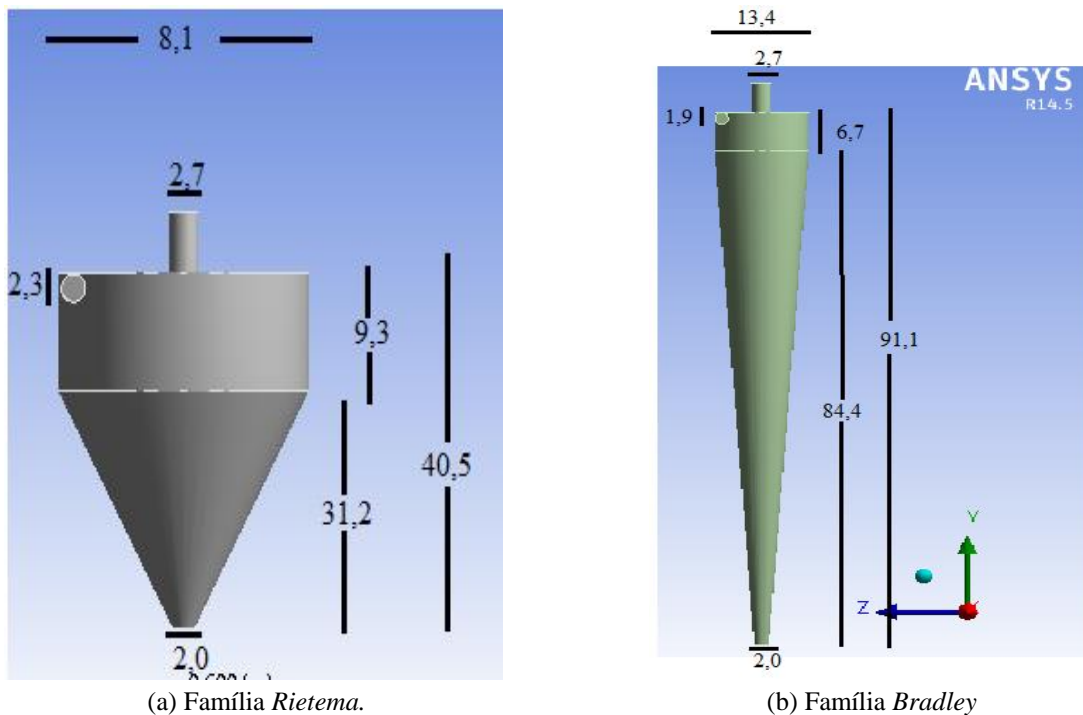
Fonte: Autor, 2015.

Observa-se na Figura 4.6 que a “ ΔP ” sofre um aumento significativo com o aumento da “ Q ” para ambos os hidrociclones projetados. Esse fato, aliado aos dados da Figura 4.2, mostra que aumentando-se o valor de “ Q ” aumenta-se a “ η ”, porém aumenta-se também a “ ΔP ” dos hidrociclones. Outro aspecto importante observado nas curvas da Figura 4.6 foi que o aumento no valor da “ ΔP ” em função da “ Q ” foi mais pronunciado para o hidrociclone da família *Rietema* que possui um valor de “ D_c ” menor.

4.3 Geometrias Usadas nas Simulações

Conhecendo as características do lodo, resultante do tratamento do efluente da indústria têxtil e que poderá ser espessado por meio da hidrociclonagem foi descrito o projeto de dois hidrociclones, com base nas configurações da família *Rietema* e *Bradley* e das equações propostas por Massarani (2001). Assim, pode-se realizar a sensibilidade paramétrica dos hidrociclones projetados. Por tanto, a etapa da simulação foi responsável por interpretar, via fluidodinâmica computacional, como ocorre, matematicamente o escoamento da fase líquida (água) e da fase suspensa (sólidos) no interior do equipamento. Para isso, uma modelagem geométrica das dimensões, expostas na Tabela 4.4, criadas no *software* Ansys, são apresentadas na Figura 4.7, em cm.

Figura 4.7 - Fotografia ilustrativa dos hidrociclones projetados.



Fonte: Autor, 2015.

Conforme apresentada na Figura 4.7, segundo Massarani (2002) o hidrociclone do tipo *Rietema* apresenta D_c menor que o hidrociclone da família *Bradley*, o que indica uma melhor eficiência. Porém, o hidrociclone do tipo *Bradley* apresenta maior altura da secção cônica, o que pode proporcionar menor consumo de energia. Conforme já apresentado pela análise de sensibilidade paramétrica, ambos os hidrociclones operam com eficiência muito semelhante.

4.4 Simulação Monofásica - Testes de Malhas

A intensão da simulação computacional foi descrever a fluidodinâmica dos hidrociclones projetados, sendo discretizado o movimento das fases no seu interior.

Para realizar as simulações foram geradas as malhas em pequenos elementos hexaedros. A malha com característica hexaédrica permitiu a realização de cálculos mais precisos e seguros, representando com maior fidelidade os fenômenos interfaciais. Porém, um maior esforço computacional foi necessário para representar tais fenômenos. A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos testes de malha para os hidrociclones de configuração *Rietema* e *Bradley* projetados. O primeiro teste de malha foi gerado sem adicionar tamanho de elemento (elemento *sinze*) e com modelo de elementos quadrangulares e triangulares. O segundo teste de malha foi realizado com malhas quadrangulares com tamanho de elemento de 0,006 m. Já o terceiro teste de malha foi feito um refino para 0,003 m.

Tabela 4.5 – Construção das malhas para simulação computacional.

Construção das malhas para hidrociclone do tipo <i>Rietema</i> .			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Elementos	14.698	89.881	386.458
Nós	11.634	72.758	314722
Secção	Elementos	Elementos	Elementos
<i>Overflow</i>	9	16	21
<i>Underflow</i>	11	18	21
Alimentação	7	10	9
Construção das malhas para hidrociclone do tipo <i>Bradley</i> .			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Elementos	22.886	93.408	422.279
Nós	17.976	75.794	350.119
Secção	Elementos	Elementos	Elementos
<i>Overflow</i>	9	16	21
<i>Underflow</i>	11	18	21
Alimentação	9	10	18

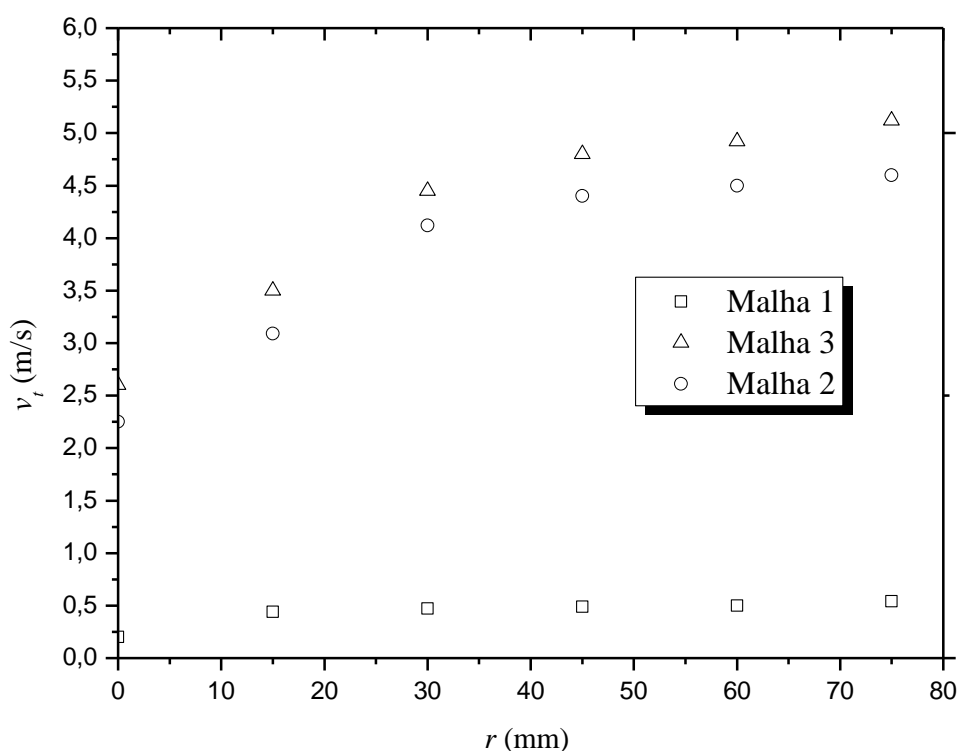
Fonte: Autor, 2015.

Para cada malha apresentada na Tabela 4.5, foi realizada a simulação com uma fase contínua, mas usando como condições de contorno as características físicas da água e das

configurações geométricas dos hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley*. Na entrada do fluido foi estabelecido como vazão o valor de $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No *overflow* e no *underflow* foi utilizada a função *pressure outlet* que permite que o fluido entre e saia do domínio estabelecido.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os perfis de velocidade tangencial em função do raio do equipamento ao longo da região cônica. Esse processo foi repetido para as três malhas criadas e para as duas configurações de hidrociclones, *Rietema* e *Bradley*.

Figura 4.8 – Testes de malha para geometria *Rietema*.

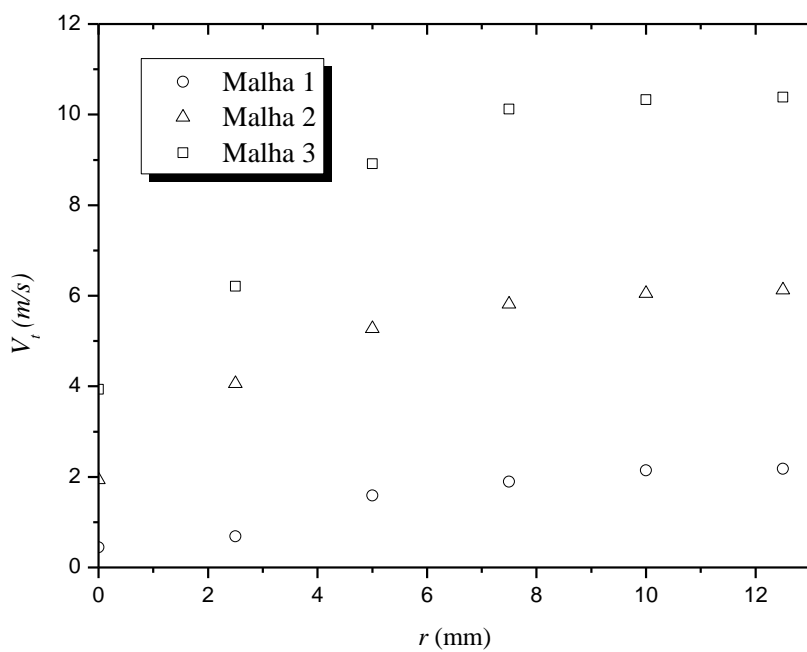


Autor, 2015

No que foi apresentado na Figura 4.8, para configurações *Rietema*, a primeira malha apresentou um “ V_t ” constante, o que fez o método divergir e não apresentar a simulação desejada. Já a malha 2 e a malha 3 apresentaram uma resposta gráfica muito semelhante. Conforme Medronho (2003), quanto maior o número de elementos e nós maior é a garantia de uma resposta mais próxima da realidade e melhores são as convergências nas respostas das simulações. Por outro lado, um número excessivo de nós e malhas correspondem a um maior desgaste computacional. Assim, as malhas 2 e 3 quando comparadas para a escolha da melhor

malha se levou em conta a que teve menor consumo computacional, já que as respostas das simulações são muito próximas.

Figura 4.9 – Testes de malha para geometria *Bradley*.



Fonte: Autor, 2015.

A Figura 4.9 corresponde aos testes de malhas 1 a 3 que foram construídas para o projeto do hidrociclone de geometria da família *Bradley*, a primeira e a segunda malha apresentaram respostas mais distantes do que a da malha 3. Como a malha 3 apresenta maior número de elementos e de nós, apresentou uma resposta, na simulação, mais condizente com a realidade física do problema. Nesse caso se levou em conta a melhor resposta na fluidodinâmica e não do consumo computacional para garantir uma resposta mais próxima do problema físico real.

As diferenças entre as respostas computacionais e físicas do problema, de cada uma das três malhas, para ambas as configurações de hidrociclones, *Rietema* e *Bradley*, foram testadas por meio de simulações monofásicas, usando apenas água, seguidas pelas equações de Navier-Stokes e discretizadas por fluidodinâmica computacional com o recurso do FLUET-ANSYS.

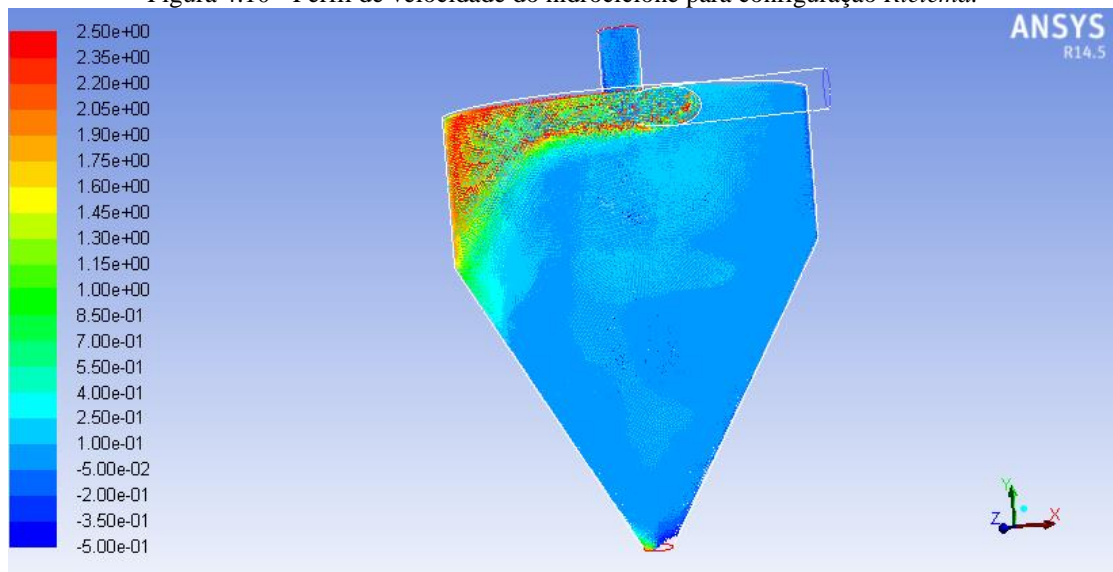
O primeiro teste de malha realizado foi análise do perfil de velocidade tangencial. No hidrociclone da família *Rietema* não houve convergência do método, pois o número de nós e

elementos da malha não foram o suficiente para apresentar resposta. As malhas 2 e 3 para esse hidrociclone apresentaram respostas muito semelhantes.

Já no hidrociclone da família *Bradley*, as respostas dos três modelos de malha tiveram respostas bastantes diferentes umas das outras, sendo encarado com mais proximidade com o problema físico, a malha 3.

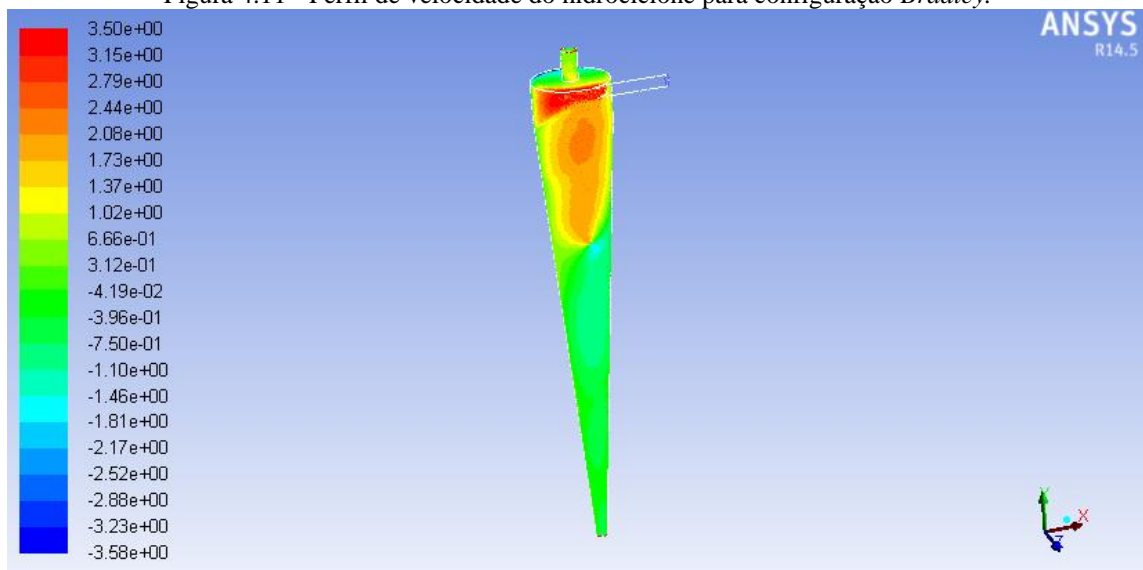
A Figura 4.10 ilustra a simulação monofásica, utilizando a malha 2, do perfil de velocidade tangencial, em m/s, para o hidrociclone da família *Rietema*. Já a Figura 4.11 ilustra a mesma simulação, realizada na malha 3 do hidrociclone da família *Bradley*.

Figura 4.10 - Perfil de velocidade do hidrociclone para configuração *Rietema*.



Autor, 2015.

Figura 4.11 - Perfil de velocidade do hidrociclone para configuração *Bradley*.

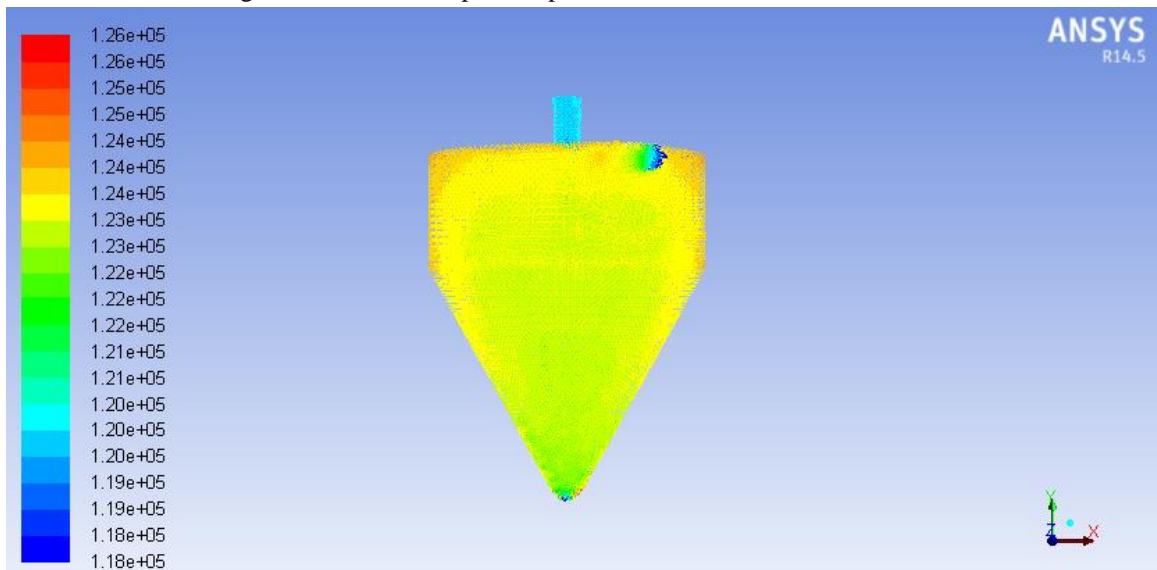


Autor, 2015

Conforme apresentado pelas Figuras 4.10 e 4.11, como já era previsto por Svarovsky, (1984) e Heiskanen (1993), o perfil de velocidade no escoamento aumenta tanto no trecho cônico como no eixo central do hidrociclone, pois a velocidade tangencial é inversamente proporcional ao raio da região circular. Essa questão, como é colocado por Silva (2012), é fundamental na eficiência da separação.

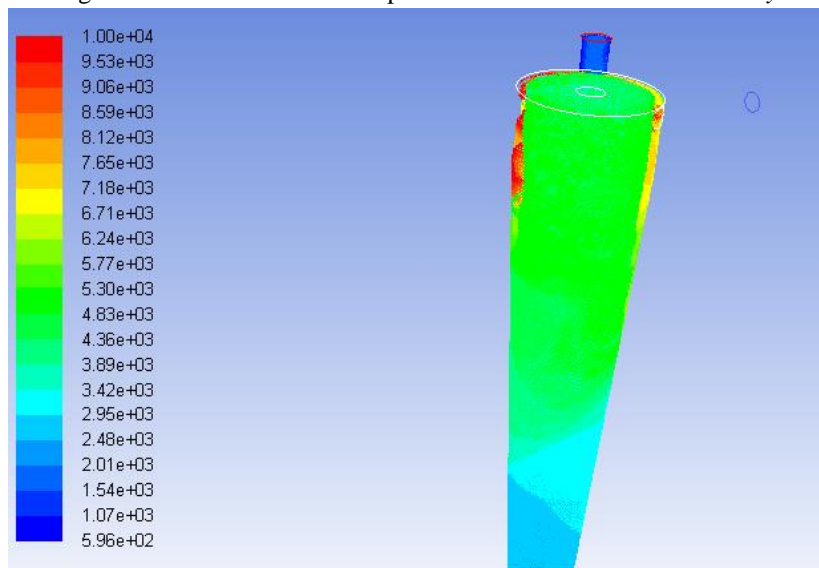
As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam o perfil de pressão em Pa que ocorre dentro dos hidrociclones de configuração *Rietema* e *Bradley*.

Figura 4.12 - Perfil de pressão para hidrociclone da família *Rietema*.



Autor, 2015.

Figura 4.13 - Perfil de Pressão para hidrociclone da família *Bradley*.



Autor, 2015

Conforme pode ser visualizada nas Figuras 4.12 e 4.13 a pressão é maior próximo a parede do hidrociclone que no centro do hidrociclone. Isso significa que a pressão vai diminuindo no sentido das paredes para a região central. Esse gradiente de pressão é o responsável pela separação das fases em um hidrociclone, pois a pressão menor no centro desloca a fase menos densa para essa região.

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação entre os valores simulados nas diferentes malhas para a pressão na entrada do hidrociclone e a razão de quedas de pressão “DPR”. A razão de queda de pressão é dada pela Equação 4.1:

$$DPR = \frac{(P_i - P_o)}{(P_i - P_u)} \quad (4.1)$$

onde “ P_i ” é a pressão na alimentação do hidrociclone, “ P_o ” é a pressão no *overflow* e “ P_u ” é a pressão no *underflow*.

Tabela 4.6 – Testes de malhas para simulação computacional.

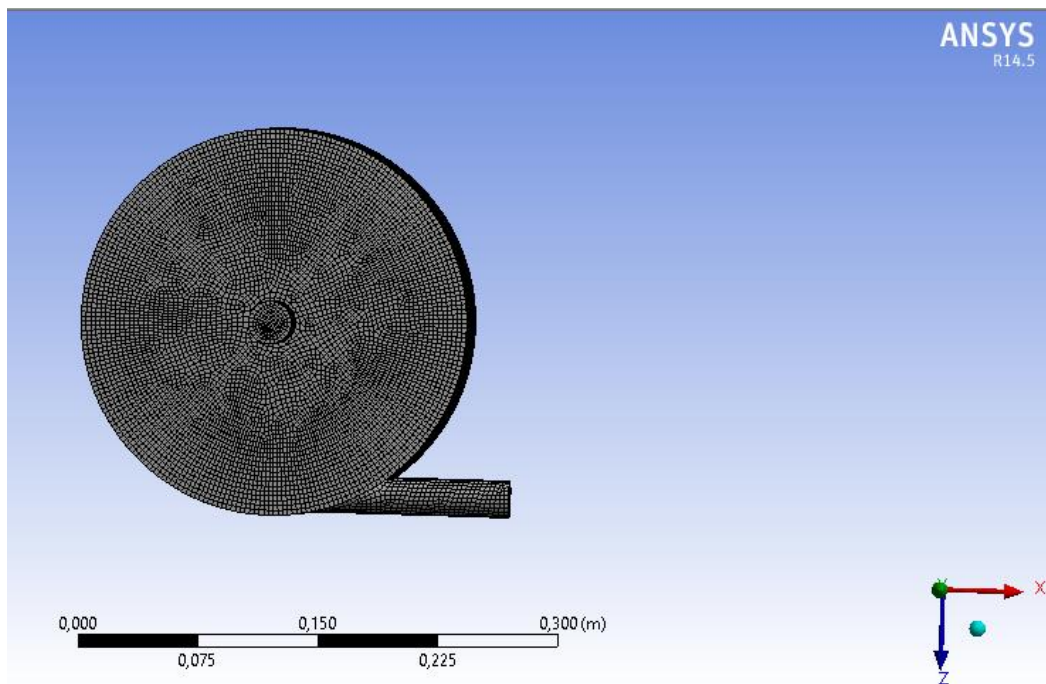
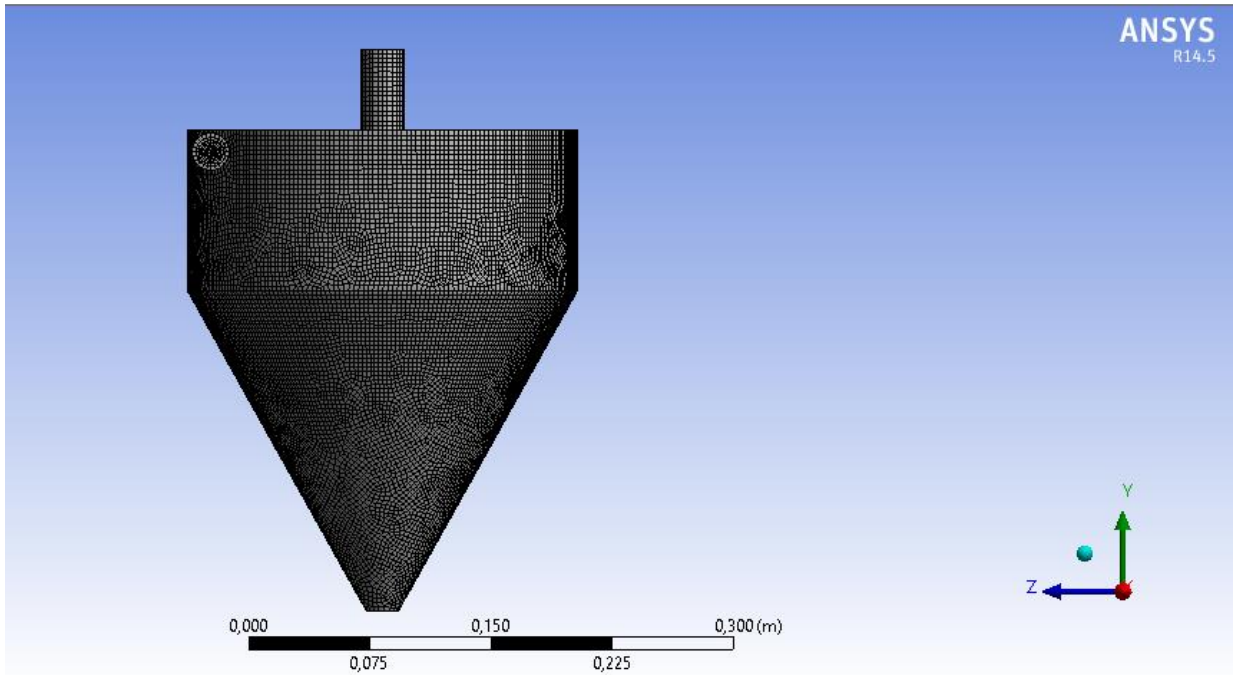
Resultados do teste de malha para hidrociclone <i>Rietema</i> .			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Elementos	14.698	89.881	386.458
P_i (KPa)	X	118,1	118,7
DPR	X	7,12	6,98
Resultados do teste de malha para hidrociclone <i>Bradley</i> .			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Elementos	22.886	93.408	422.279
P_i (KPa)	115,5	118,9	120,7
DPR	7,3	4,2	2,8

Autor, 2015.

Conforme apresentado na Tabela 4.6, para o hidrociclone da família *Rietema*, embora o número de elementos nas malhas seja consideravelmente menor na malha 2 do que na malha 3, ambas apresentaram as respostas da “ DPR ” muito próximas. Assim, para dar procedimento nas simulações, parte bifásica, foi optado pela malha 2. Ainda conforme a Tabela 4.6, para o hidrociclone da Família *Bradley*, pode-se observar que a diferença no número de elemento nas malhas feitas nessa geometria influenciaram consideravelmente nas respostas da “ DPR ” e como segundo Medronho (2003) quanto maior o número de elementos mais próximo o calculo numérico estará do problema físico real. Para geometria da família *Bradley*, optou-se pela malha 3.

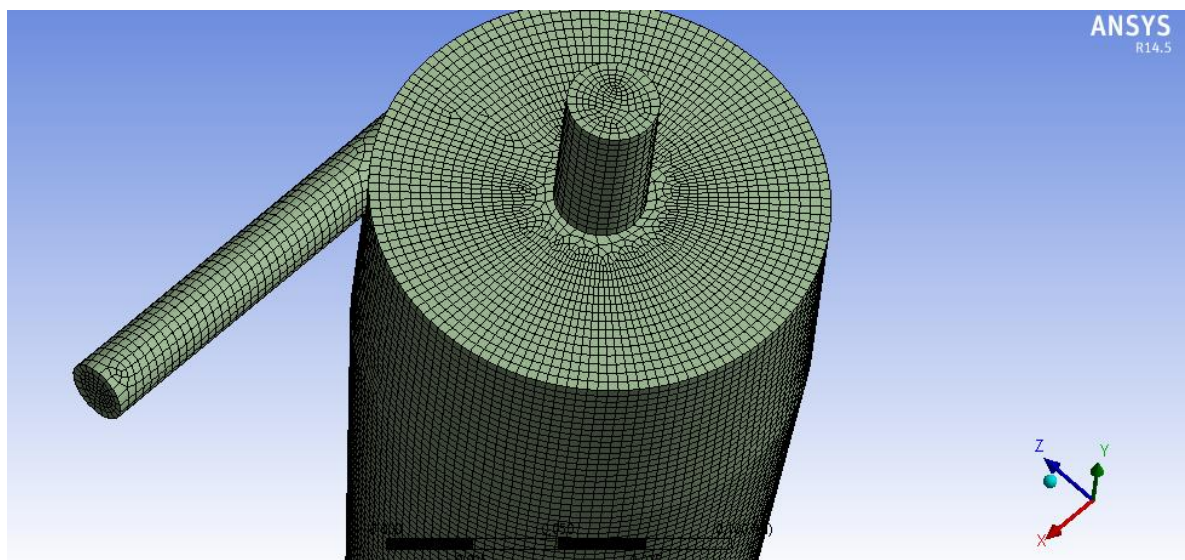
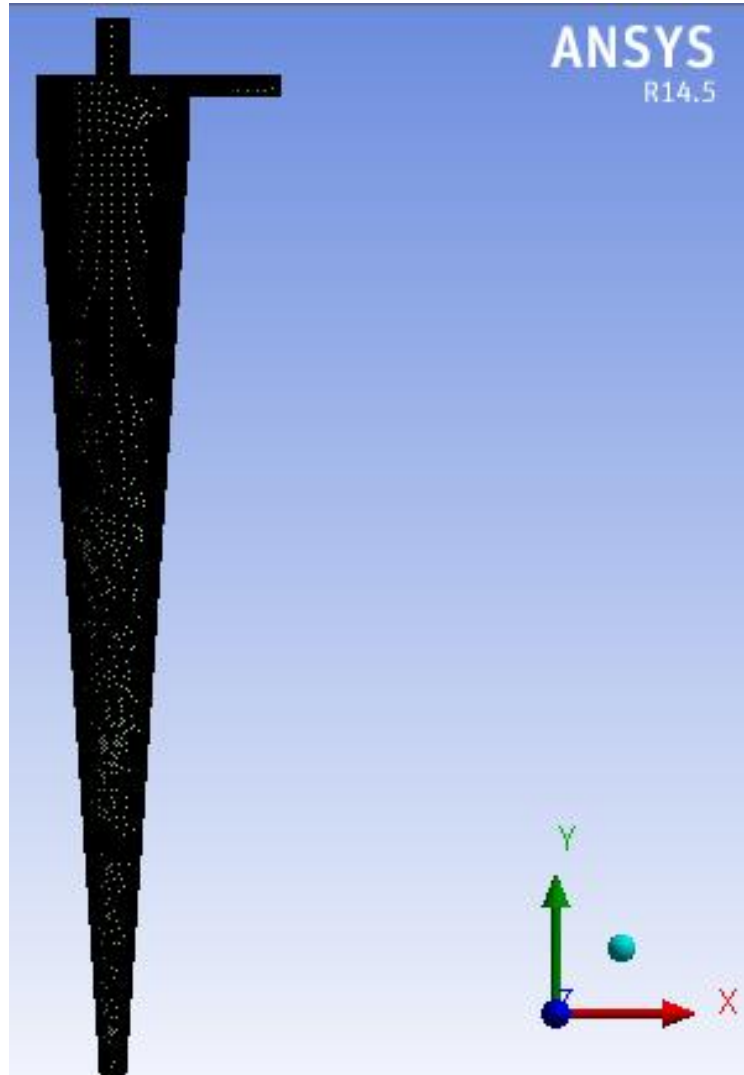
As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam, respectivamente, as imagens da malha 2 para o projeto do hidrociclone da família *Rietema* e da malha 3 para o projeto do hidrociclone para a família *Bradley*, que foram escolhidas para dar procedimento nas simulações.

Figura 4.14: Malha construída para hidrociclone da família *Rietema*.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 4.15 - Malha construída para hidrociclone da família *Braley*.



Autor: 2015.

Conforme mostram as Figuras 4.14 e 4.15, em ambos os casos foi optado por uma configuração de malha hexaédrica, com formato quadricular para elementos de volumes finitos. Essas malhas quase não apresentam curvas e regiões de divergências de nós e elementos, o que, segundo Medronho (1984) é ideal para apresentar bons resultados na simulação.

4.5 Simulação Bifásica

Os resultados da simulação dos projetos dos hidrociclones aplicados para espessar o lodo gerado durante o tratamento da indústria têxtil, por meio de CFD, utilizando o software ANSYS FLUENT foi importante para descrever o movimento do fluido e da fase suspensa no interior dos hidrociclones.

As condições de contorno e os parâmetros dos processos utilizados na simulação bifásica encontram-se na Tabela 4.7.

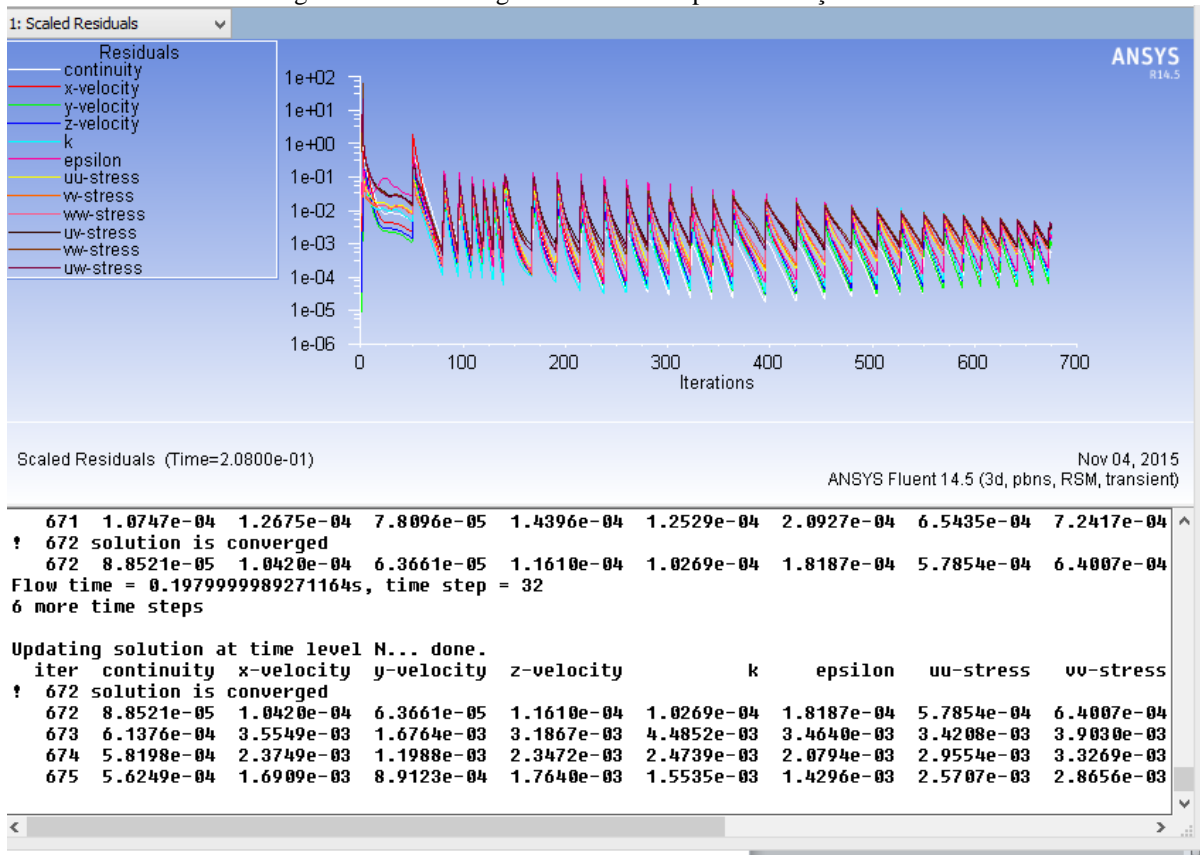
Tabela 4.7 – Condições de contorno e parâmetros do processo para simulação bifásica.

Parâmetro	Informação
Vazão	0,0014 m ³ /s
Fase aquosa	Continua
Fração molar aquosa inicial	0,995
Massa específica da água	998,2 kg/m ³
Viscosidade da água	1003 Ns/m ²
Fase sólida	Suspensa
Fração molar da fase sólida na entrada	0,005
Massa específica do sólido	1003 kg/m ³
Viscosidade do lodo	1700 Ns/m ²
Modelo de turbulência	RSM
Modelo matemático	<i>Lagrangeano</i>
Regime	pseudo-transiente
Resíduo máximo	0,0004
Sistema de Coordenadas	Cilíndrica

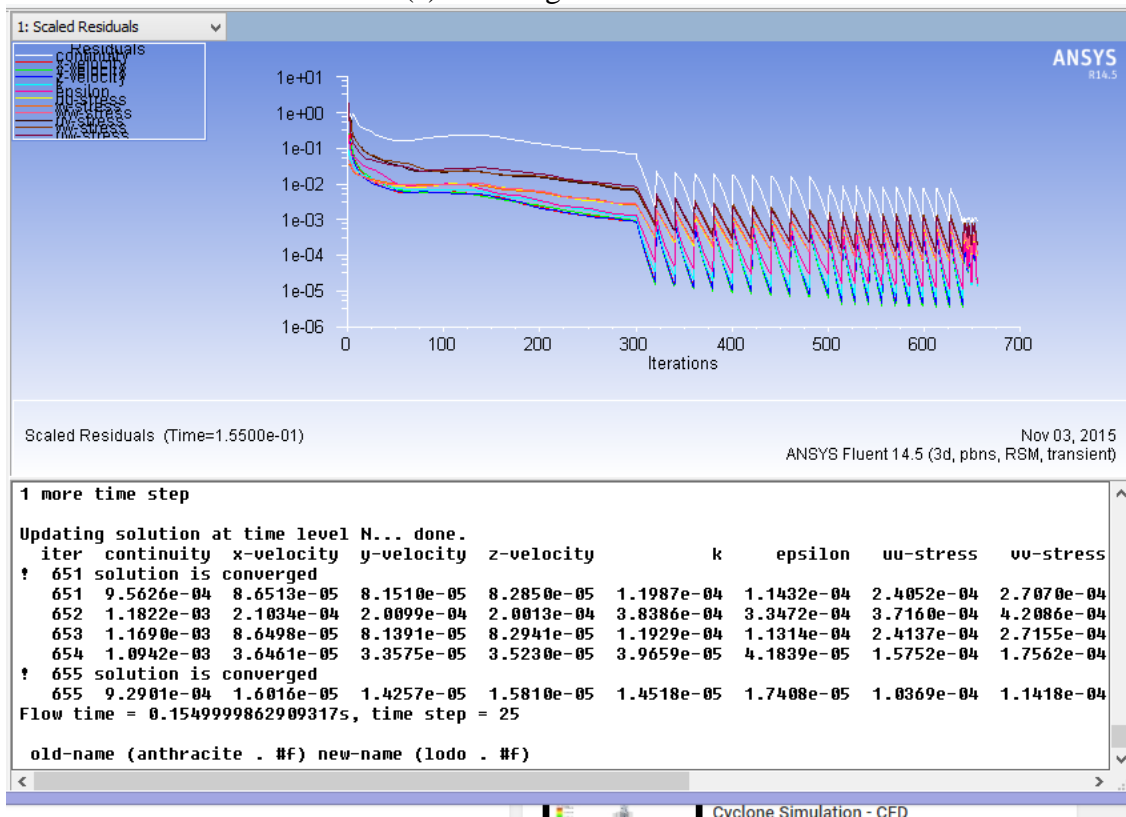
Autor, 2015.

As Figuras 4.16 (a) e (b) apresentam os resultados gráficos das convergências dos parâmetros para método utilizado na simulação bifásica para os hidrociclones de configuração *Rietema*, Figura 4.16 (a) e *Bradley*, Figura 4.16 (b).

Figura 4.16 - Convergência do método para simulação bifásica.



(a) Convergência no *Rietema*



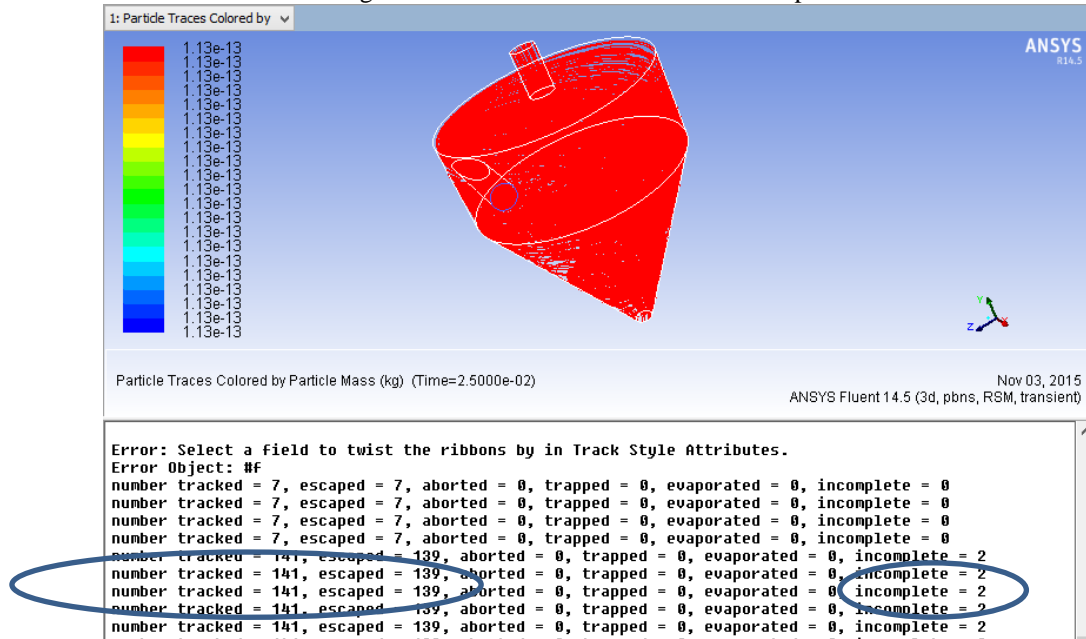
(b) Convergência no *Bradley*.

Autor: 2015.

Conforme mostra a Figura 4.16 (a) a simulação realizada no hidrociclone da família *Rietema*, teve a primeira convergência após 672 iterações, enquanto que, de acordo com a Figura 4.16 (b), a da família *Bradley* teve a primeira convergência com 655 iterações.

A Figura 4.17 mostra um plano vertical em que é possível ver a fração volumétrica, em kg/s de sólido que passa no *underflow*.

Figura 4.17 - Volume de massa da fase suspensa.



(a) Volume de massa na fase suspensa no *Rietema*.

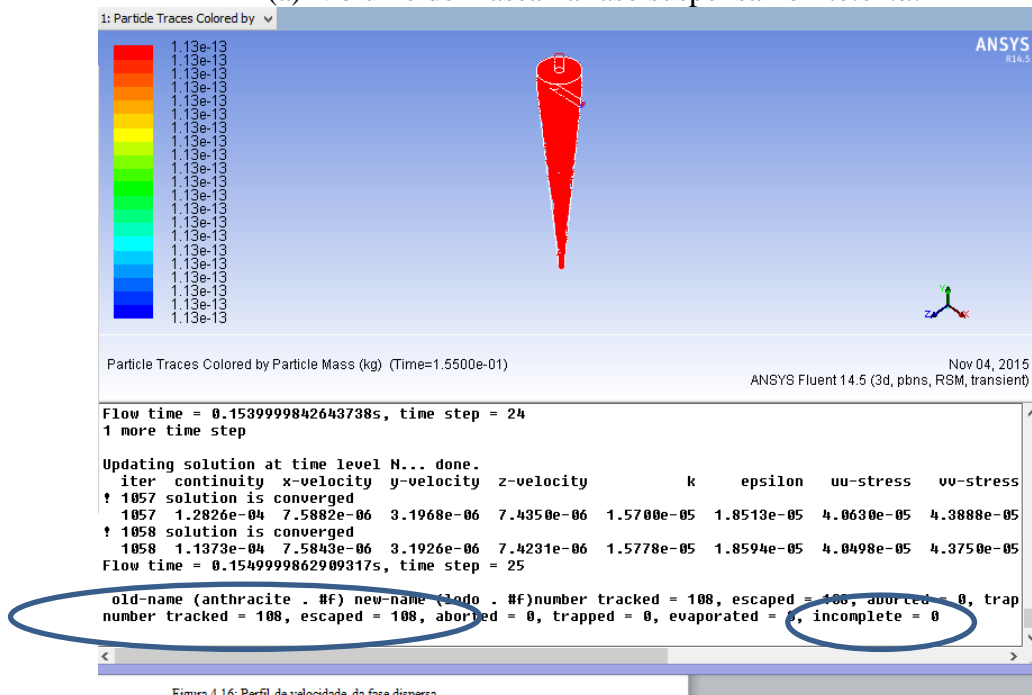


Figura 4.16: Perfil de velocidade da fase dispersa.

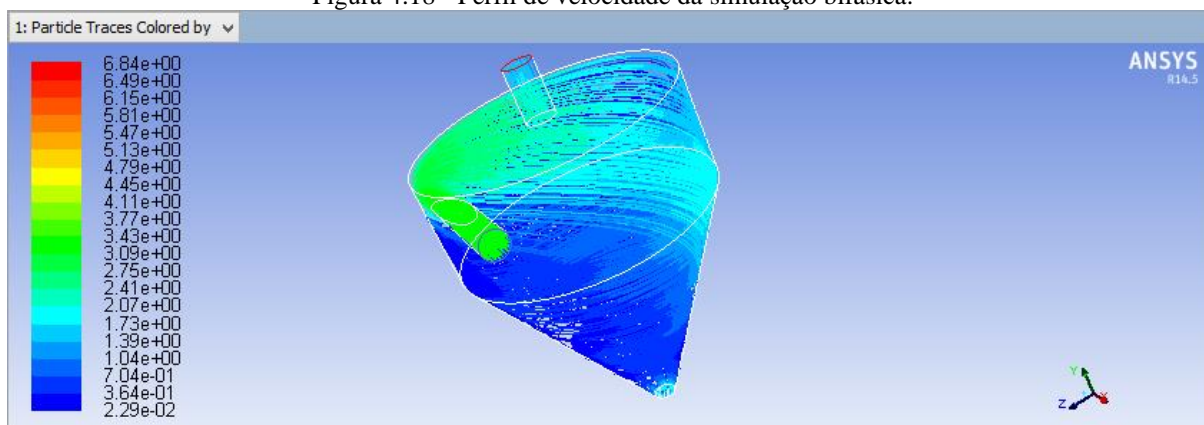
(b) Volume de massa na fase suspensa no *Bradley*.

Autor: 2015.

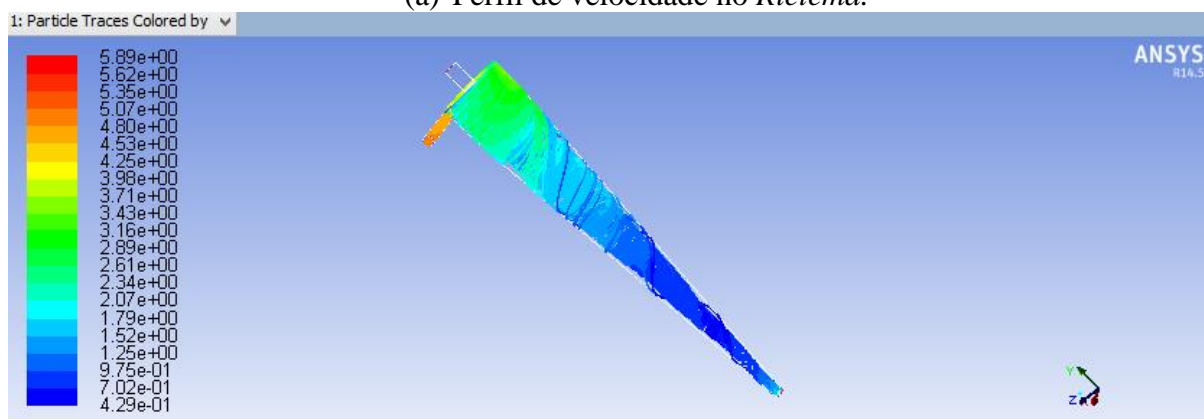
A Figura 4.17 (a) destaca que no hidrociclone do tipo *Rietema*, das 141 partículas de sólido suspensos em água, que entraram pela superfície de alimentação, 139 saíram por *underflow*. Na Figura 4.18 (b) para o hidrociclone *Bradley*, das 108 partículas sólidas que entraram pela alimentação, todas saíram pelo *underflow*.

As Figuras 4.18 (a) e (b) apresentam o perfil de velocidade do fluido simulando em ambos hidrociclones projetados, *Rietema*, Figura 4.18 (a) e *Bradley*, Figura 4.18 (b), onde a fase mais densa corresponde a sólidos suspensos que adquirem menor velocidade global, em m/s.

Figura 4.18 - Perfil de velocidade da simulação bifásica.



(a) Perfil de velocidade no *Rietema*.



(b) Perfil de velocidade no *Bradley*.

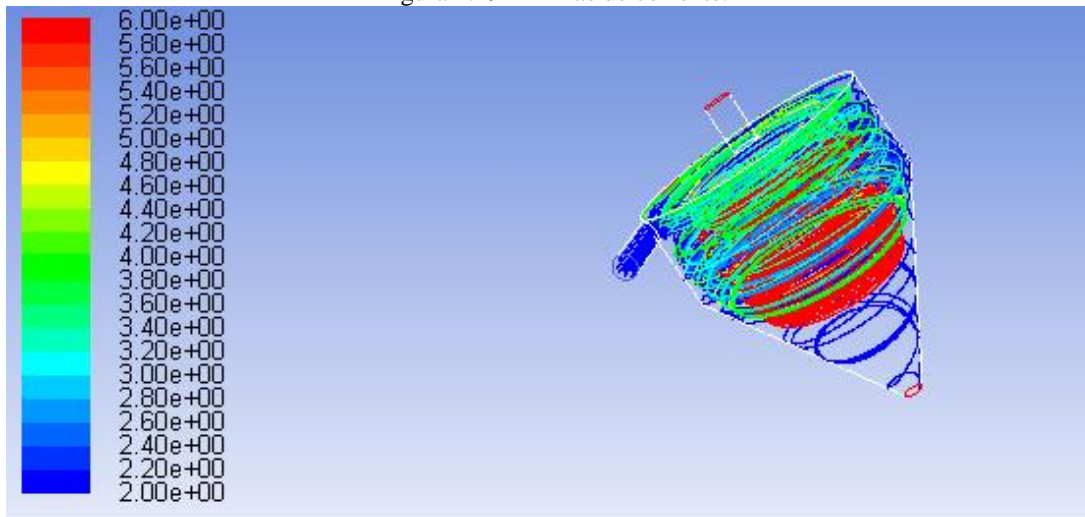
Autor: 2015.

Como pode ser verificado na Figura 4.18, e também é descrito por Medronho (2004) a velocidade do fluido é menor próximo à parede do hidrociclone, assim, a fase mais densa vai entrar em movimento espiral descendente, se deslocando para a parede do equipamento até sair pelo orifício de *underflow*, enquanto que a fase menos densa adquire velocidade mais rápida, e ao chegar na secção cônica, essas partículas entram em estado caótico e também em

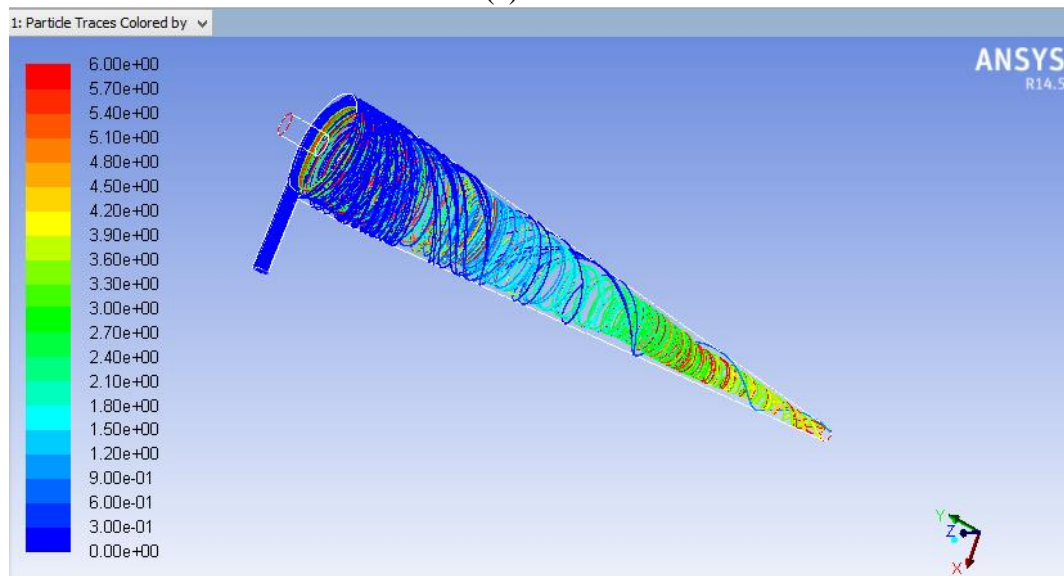
movimento espiral ascendente acabam retornando e se projetando no eixo central do hidrociclone até sair pelo orifício de *overflow*.

As Figuras 4.19 (a) e (b) permitem visualizar com clareza o comportamento em espiral ascendente e descende das fases do fluido no interior dos hidrociclones, formadas pelos vórtices livres e forçados, a partir da velocidade tangencial, em m/s.

Figura 4.19 - Linhas de corrente.



(a) *Rietema*.



(b) *Bradley*.

Autor: 2015.

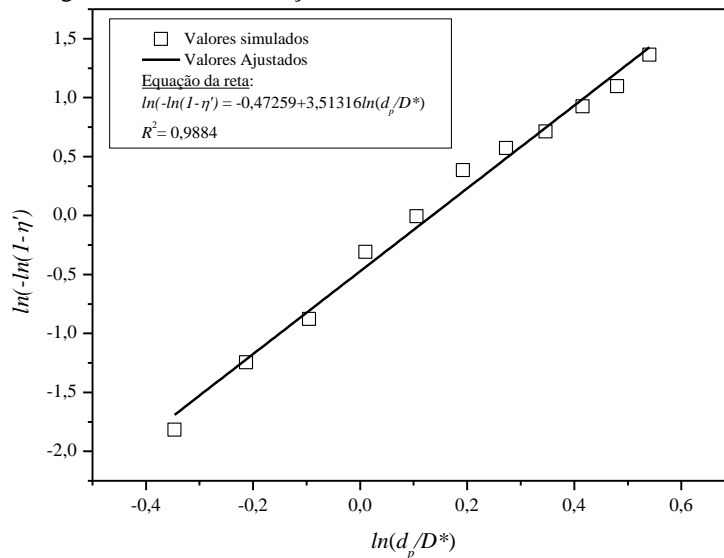
A Figura 4.19 retoma o que foi descrito por Medronho (2004) e citado no capítulo 2, Figura 2.13, a componente da velocidade tangencial é responsável pela formação de dois tipos de vórtices, o vórtice livre e o vórtice forçado e conforme pode ser visualizado na Figura 4.19, o vórtice livre é representado mais na parede do hidrociclone enquanto que o vórtice forçado localiza-se mais no eixo central. A visualização das linhas de corrente dos hidrociclones

simulados, da família *Rietema*, Figura 4.19 (a) e *Bradley*, Figura 4.19 (b), resultam nas partículas menos densas sendo coletadas no *overflow* e as mais densas no *underflow*.

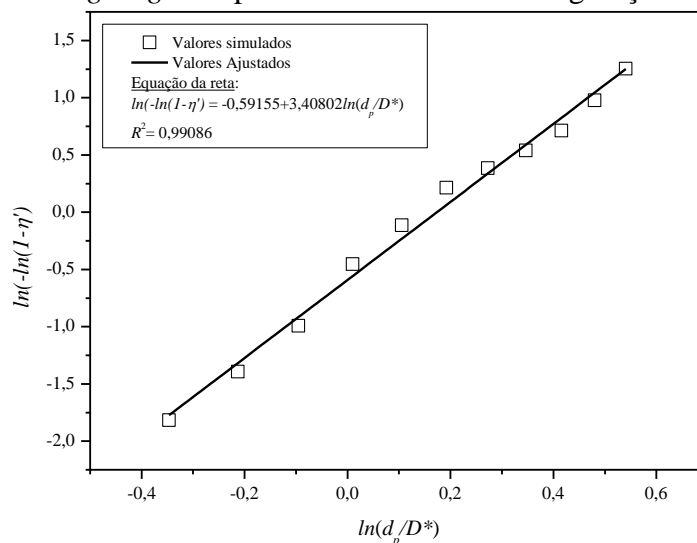
4.6 Eficiência

A Figura 4.20 apresenta o gráfico gerado pela eficiência dos hidrociclones, da família *Bradley* e *Rietema*, e que foram simulados por fluidodinâmica computacional com recurso *FLUENT* - *ANSYS*. Foi realizada a linearização sobre os pontos resultantes da simulação e então gerado a reta que mais se aproximava desses pontos para determinar o parâmetro n , da Equação (3.22) pelo modelo Lagrangeano, conforme mostra a Figura 4.20.

Figura 4.20 -: Linearização dos valores de eficiência simulados



(a) Modelo *Lagrangeano* para hidrociclone de configuração *Rietema*.

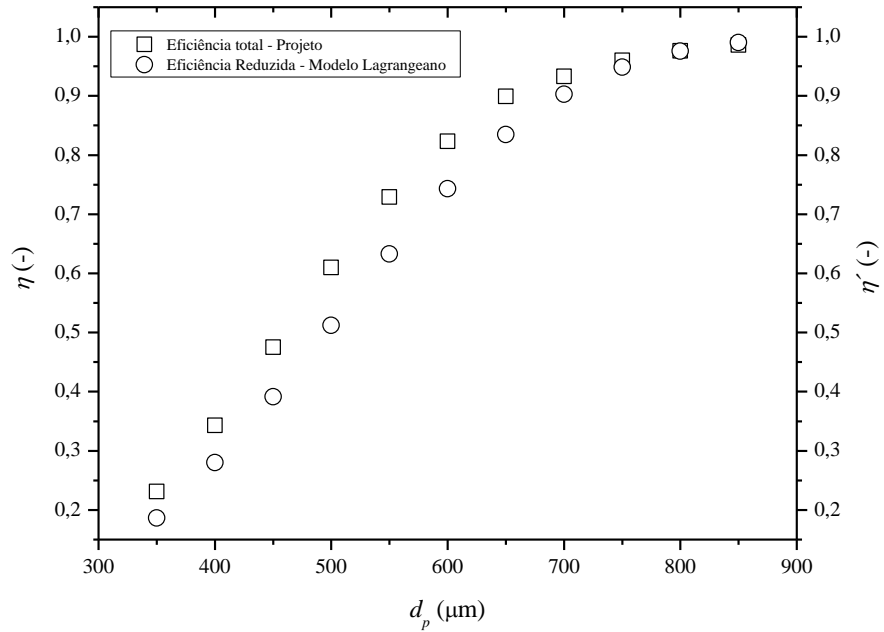


(b) Modelo *Lagrangeano* para hidrociclone de configuração *Bradley*.

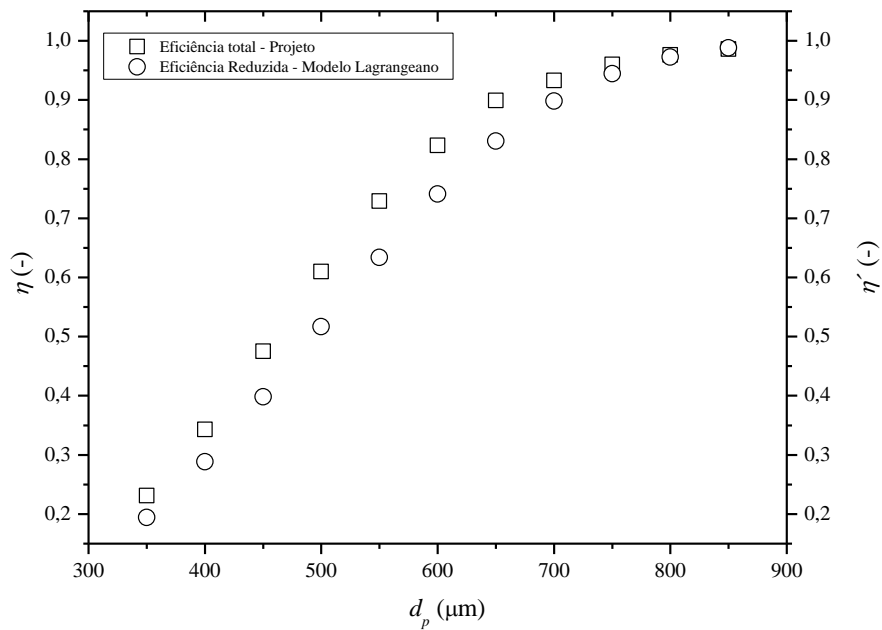
Autor, 2015.

O valor de n é definido como coeficiente angular da reta e que resultou, conforme mostra a Figura 4.20 em 3,51 para o hidrociclone de configuração *Rietema* e 3,41 para o hidrociclone *Bradley*. Assim foi possível calcular o valor de η' teórico pela Equação 3.21 e fazer a análise gráfica da eficiência, Figuras 4,21 (a) e (b) pelo valor do tamanho médio de partícula para o modelo *Lagrangeano*.

Figura 4.21 - Eficiência do modelo simulado em comparação com a eficiência projetada



(a) Família *Rietema*.



(b) Família *Bradley*

Os resultados apresentados nas Figuras 4.21 (a) para o hidrociclone da família *Rietema* e 4.21(b) para o hidrociclone da família *Bradley*, demonstram que a eficiência calculada durante o projeto de ambos os hidrociclones está muito próximo da eficiência calculada pelo modelo *Lagrangeano* para a simulação, de acordo com o que foi exposto por Medronho (2004), presente no capítulo 2 desse trabalho na Figura 2.10. Além disso, para partículas com diâmetro médio de 586 μm , as duas configurações de hidrociclone, *Rietema* e *Bradley* apresentaram uma eficiência de 74 %, pelo modelo Lagrangeano.

Os resultados apontados nesse trabalho, demonstram que para o lodo gerado a partir do tratamento físico-químico de uma indústria têxtil de Bagé – RS, ambos os hidrociclones simulados apresentam uma boa eficiência para o seu espessamento, principalmente para partículas com tamanho médio acima de 500 μm .

5 CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as conclusões deste trabalho referente aos objetivos propostos para analisar o projeto e a fluidodinâmica computacional dos hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley* para o espessamento do lodo resultante do tratamento do efluente gerado por uma indústria têxtil do município de Bagé-RS.

Nas caracterizações químicas do lodo foi verificado um valor de pH de 7,89, DQO de 61,6 mg/L, condutividade de 797,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e quantidade de matéria orgânica de 130,66 mg/L, concluindo que esse último parâmetro se encontra fora dos padrões para lançamento em fontes hídricas.

Na análise física do lodo, foi verificado que o lodo apresenta massa específica de 1000,05 kg/m^3 , enquanto que a massa específica do sólido em suspensão é de 1002,64 kg/m^3 , uma concentração volumétrica de 4,02 %, o que foi possível concluir que o baixo valor da concentração e o valor da massa específica do efluente ser próximo da massa específica da água, deve-se ao fato do lodo ser bastante diluído.

Análise da viscosidade do lodo encontrada, resultou em 0,017 Ns/m^2 e pelo método da elutriação se verificou que o tamanho médio dos sólidos suspensos é de 586 μm , podendo concluir, ao comparar esse resultado com a concentração do lodo, que em menores aglomerados de sólidos, há partículas de maiores tamanhos.

No projeto dos hidrociclones das famílias *Rietema* e *Bradley*, foi fixado uma eficiência de 80 % e assim o hidrociclone da família *Rietema* apresentou um diâmetro da parte cilíndrica de 8,10 *cm*, enquanto que o hidrociclone da família *Bradley* foi de 13,37 *cm*, foi concluído com esses resultados que quanto menor o diâmetro da secção cilíndrica maior a eficiência do hidrociclone, e quanto maior a altura da secção cônica maior o gasto energético.

Para verificar o comportamento da eficiência, frente as variações das características do lodo, foi realizada a análise da sensibilidade paramétrica e foi concluído que o aumento da concentração de sólidos provoca uma redução na eficiência dos hidrociclones estudados. Já o aumento do tamanho médio de partículas, da vazão de alimentação e da massa específica do lodo provocou uma eficiência cada vez maior, podendo ultrapassar 90% de eficiência. Conclui-se também que, das famílias de hidrociclones estudadas, aquela que apresentou menor diferença de pressão com aumento da vazão de alimentação foi a do tipo *Bradley*.

Os resultados obtidos a partir da fluidodinâmica computacional representaram bem aos dados do projeto dos hidrociclones. As malhas usadas para simulação bifásica no hidrociclone

da família *Rietema* foram composta por 89.881 elementos e 72.758 nós. Na família *Bradley*, o hidrociclone utilizado na simulação foi composto por 422.279 elementos e 350.119 nós.

Na simulação bifásica, os resultados com os perfis de velocidades indicam que as partículas mais densas, sólidos, se movem em velocidade menor que as partículas menos densas, água. Já o perfil de pressão, indica que a fase menos densa vai ser arrastada para o centro do hidrociclone enquanto que a mais densa será lançada contra as paredes do equipamento. Esses perfis, de velocidade e pressão auxiliaram a geração das linhas de correntes para traçar o trajeto das partículas, mostrando que ambas as fases mantem movimento helicoidal, porém, a água em movimento ascendente, pelo centro do hidrociclone, até sair por *overflow* e o sólido, em movimento descendente, contornando a parede do hidrociclone até sair por *underflow*.

Por fim, concluiu-se, com o uso do modelo *Lagrangeano* para o cálculo da eficiência reduzida, que a simulação utilizada nos hidrociclones da família *Rietema* e *Bradley* para espessamento de lodos providos do tratamento de efluentes da indústria têxtil de Bagé – RS, tiveram o mesmo comportamento gráfico que os hidrociclones projetados, atingindo uma eficiência para esse modelo de 74 % para ambos os hidrociclones quando os sólidos suspensos apresentam tamanho de 586 μm .

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que em trabalhos futuros sobre este tema sejam abordados os seguintes itens:

- ✓ Verificar o potencial do uso de lodo desidratado na indústria agrícola e na fabricação de materiais de construção.
- ✓ Construção dos hidrociclones projetados.
- ✓ Testes de malhas mais refinadas para comparação com os resultados já obtidos.
- ✓ Simular outras famílias de hidrociclones para o mesmo tipo de lodo.
- ✓ Propor ajustes nas geometrias para melhorar a eficiência dos hidrociclones projetados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, J. <http://aguirreeng.blogspot.com/2010/09/malhas-estruturadas-e-naoestruturadas.html>, 2010 (Acessado no dia 12/04/2015).
- ALMEIDA, C.A.K. *Comportamento do hidrociclone filtrante frente às Modificações no diâmetro de underflow e no tubo de “vortex finder”*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- ANSYS CFX 11.0 © 1996 – 2006 ANSYS Europe, Ltd. All right reserved. CFX-Solver Theory Guide, 2006.
- ARAUJO, A.S.F. MONTEIRO, R.T.R. CARDOSO, P.F. *Composto de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo*. Pesq. Agropec. Bras. Vol. 40, n 6, pag. 546 – 554. Brasília, junho de 2005.
- ARCO, Associação Brasileira de Criadores de Ovinos. Disponível em http://www.arcoovinos.com.br/sitenew/racas_links. Acessado pela última vez em 12 de janeiro de 2015.
- ARRUDA, A. A. *Otimização de um Hidrociclone utilizado na Separação de uma Mistura Líquido-Líquido*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Recife, 2008.
- ARIM, A. L. *Análise da secagem de sementes de mamão formosa (Carica Papaya L.) utilizadas da adsorção do corante vermelho do congo*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Pampa, 2014.
- AZEVEDO, J.J.R. *Poluição pela indústria têxtil*. UC. *Análise de Sistemas Ambientais* Tópico: Solos. Escola Superior Agraria de Ponte de Lima.
- BELTRAME, L.T.C. *Caracterização de Efluente Têxtil e proposta de tratamento*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.
- BERGSTÖM, J. *Flow Field and Fibre Faction Studies in Hydrocyclone*. 2006. 59 f. These (Doctoral) – Departament of Fibre and Polymer Technology, School of Chemical Science and Engineering, Royal Institute of Technology , Stockholm, Sweden, 2006.
- BIRD, R.B., Stewart,W.E, e Lightfoot, E.N, (2004), *Fenômenos de Transporte*, 2a edição, Editora LTC.
- BRASIL, Constituição da República Federativa, 1988.
- BRASIL, Lei nº 6.938, 1981.
- BRASIL, Lei nº 9.605, 1998.

BUENO, A. W. e DEGREVE, L. Manual de Laboratório de FísicoQuímica. Mcgraw-Hill, São Paulo, 1980.

CALIARI, P.C. TEIXEIRA, E.C. *Avaliação da Influência do Diâmetro Médio das Partículas Suspensas e da Cor da Água na Relação Entre Turbidez E Concentração de Sólidos Suspensos em Rios*. 2º Encontro Nacional de Tecnologia Química. Salvador – BA, 2009.

CARREIRA, Manoel Francisco. *Sistemas de Tratamentos de Efluentes Têxteis – Uma análise Comparativa Entre as Tecnologias Usadas no Brasil e na Península Ibérica*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

CARVALHO, N. F. MARCHI, C. H. *Avaliação de Esquemas Numéricos Para Problemas Difusivos 2d Resolvidos Com Volumes Finitos*. Disponível em ftp://ftp.demec.ufpr.br/CFD/artigos_congressos/2009_Carvalho_Marchi_CILAMCE_2009.pdf, acessado em 12 de novembro de 2015.

CASTILHO, L.R., MEDRONHO, R.A. *A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones*. Minerals Engineering, Amsterdam, v. 13, n. 2, p. 183-91, 2000.

CHAO, I. R. S. IESS. J. *O Potencial de utilização de lodo de tratamento de esgoto como redutor de poluentes atmosféricos na indústria cimenteira*. Artigos Técnicos. Saneas, Abril de 2004.

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

COELHO, D.B. *Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas*. Trabalho de conclusão. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

COGO, M.C. *Estudo de caracterização e disposição dos resíduos de uma indústria têxtil do estado do Rio Grande do Sul*. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/estr.cfm> e acessado pela última vez em 14 de abril de 2015.

CORRÊA JR, C.A. *Desenvolvimento de modelo computacional de previsão de quebra de gotas em simulador de separação de óleo e água em um hidrociclone*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio De Janeiro, 2008.

CREMASCO, M.A. *Operações unitárias em sistemas particulados*. São Paulo: Editora Blucher, 2012.

CRUZ, O. C. *Desempenho de um hidrociclone de geometria Rietema” como pré-filtro para sistemas de Irrigação*. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária. UNESP, Jaboticabal, São Paulo, 2008.

CULLIVAN, J. C. WILLIAMS, R.A. CROSS, C. R. Understating the hydrocyclone separator through computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Reserch and Desing*, V. 81, n-4, pag 455-456, 2003.

ENGLERT, Alexandre H. RUBIO, Jorge. *Beneficiamento De Rejeito Piritoso Do Processamento De Carvão Mineral Por Elutriação Aquosa*. Laboratório de tecnologia e mineral e ambiental. UFRGS. Disponível em http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B1_B2_B3/B1_ARTIGO_02.pdf, acesso última vez em 20 de setembro de 2015.

FERAREZ, Cristiano Secco. GOEDEL, Fábio. PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. <http://www.metalica.com.br/avaliacao-de-uma-ligacao-parafusada-viga-coluna>, acessado pela última vez em 12 de outubro de 2015.

FIERGS. *Fotografia do mercado de trabalho formal*. Rio Grande do Sul. Disponível em <http://www.sivergs.org.br/#!dados-do-setor/c10by>, último acesso em 20/05/2014.

FIERGS. *Indicadores Industriais*. Rio Grande do Sul. Disponível em <http://www.sivergs.org.br/#!dados-do-setor/c10by>, último acesso em 20/05/2014.

FILHO, A. S. *Tratamento Terciário de Efluentes de uma Industria de Refrigerantes Visando o Reúso – Um Estudo de Caso*. Escola de Química. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

FOUST,A.S.; WENZEL,L.A.; CLUMP,C.W.; MAUS,L.; ANDERSEN,L.B. *Princípios das operações unitárias*. Editora Guanabara Dois S.A., Segunda Edição, 1982.

FOX, R.W.; McDonald, A.T.; Pritchard, P.J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Editora LTC, 6ª Edição, 2006.

FLORES, C.G. *Análise de recuperação da lanolina proveniente do beneficiamento da lã de ovinos*. TCC curso de Eng.Quim. Universidade Federal do Pampa, 2014.

FREITAS, A. G. B. F. *Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone*. Dissertação de mestrado. Programa de pós graduação em engenharia química. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2009.

HARGREAVES, J. H., SILVESTER, R.S. *Computational fluid dynamics applied to the analysis of deoiling hydroyclone performance*. Trans IchemE, Vol. 68, Part A, July 1990.

KLIMA, M.S.; KIM, B.H. *Dense-medium separation of heavy- metal particles from soil using a wide-angle hydrocyclone*. Journal of Environmental Science and Health, London, v.33, p.1325-1340, 1998.

- LEAHY-DIOS, A., MEDRONHO, R. A. *Simulação Numérica da Separação água-óleo em hidrociclones*. In: Anais do 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2003.
- MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004
- MARINS, L.P.M. *Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.
- MARTI, S. *Analysis of gas carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones*. In: Claxton, D.; Svarovsky, L.; Thew, M.T. (eds.). *Hydrocyclones*. London: London & Bury Saint Edmunds, 1996. p.399-421.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Rio de Janeiro: Editora Papers Serviços Editoriais, 2002.
- MEDRONHO, R.A. Solid-liquid separation. In Mattiasson, Hatti-Kual R(eds). *Isolation and purification of proteins*. Marcel Dekker Inc, New York, 2003.
- MEDRONHO, R. A. *Hidrociclones*. Rio de Janeiro, UFRJ, 2004.
- MEDRONHO, R.A. SCHUETZE, J. DECKWER, W-D. Numerical Simulation of hydrocyclone for cell separation. *Latin American Applied Research*, 35, p1-8, 2005.
- MEDRONHO, R.A. e SVAROVSKY, L. “Tests to verify hydrocyclones scale-up procedures”. *Proceedings of the 2nd Int. Conference Hydrocyclones, BRHA*, 1-14, Bath, Inglaterra, 1984.
- MIHELICIC, J.R.; ZIMMERMAN, J.B. *Engenharia ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projeto*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.
- MORAES, C.A.C. *Curso de hidrociclones e sistemas de separação ciclônica*. Rio de Janeiro: Cenepes. Universidade Cooperativa. Agosto, 2006.
- MOREIRA, A. H. OLIVEIRA, R. M. LIMA, P.D.S. *Efeito da Adição do lodo de águas residuais da indústria têxtil nas propriedades de materiais de construção*. *Cerâmica*, Vol. 47, n 303, 2001.
- NORMAN, P.I. SEDDON, R. Pollution control in the têxtil industry – the chemical auxiliary manufacture’s role. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, MPG Information Division, 107 (May/June) 215-218, 1991.
- OCAMPO, M.I. *A indústria têxtil e o meio ambiente*. Química Têxtil, São Paulo: ABQCT, 1998.
- PERRY, R.H. CHILTON, C. *Chemical engineers handbook*. 5. ed. Califórnia; MacGraw-Hill, 1973.

PEREIRA, Mariana Seixas. *Caracterização de Cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás*. Dissertação de mestrado. Programa de pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. 2010.

PINTO, R.C.V. *Separação de células CHO utilizando hidrociclones*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

PIVELI, R. P. MORITA, D. M. *Caracterização de Águas Residuárias. Sólidos*. Apostila, Janeiro, 1996.

RESENDE, L.P. *Reúso na indústria têxtil e lavanderias*. Hidra. P. 14-19. 2012.

SANT'ANNA, G.L. Jr. *Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamentos e Aplicações*. Interciência. Rio de Janeiro, 2010.

SAVAROVSKY, L. *Solid-liquid Sparation*. Czech Republic: Butterworth-heinemann, p 191 – 245, 2000.

SILVA. D.O. *Otimização da separação sólido-líquido em hidrociclones mediante modificações geométricas*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. 2012.

SILVA, M.A.P. da. *Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho*. 1989. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

SIMÕES, A. M. B. M. *Simulação numérica da fluidodinâmica de um Hidrociclone aplicado na separação Óleo/água*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Campinas Grande. Paraíba, 2005.

SMYTH, I.C.; THEW, M.T. *A study of the effect of dissolved gas on the operation of liquid-liquid hydrocyclones*. In: Claxton, D.; Svarovsky, L.; Thew, M.T. (eds.). *Hydrocyclones*. London: London & Bury Saint Edmunds, 1996. p.357-368.

SOUZA, F.J.; VIEIRA, L.G.M.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. *Analysis of the influence of the filtering medium on the behavior of the filtering hydrocyclones*. *Power Technology*, Lausanne, v. 107, n. 3, p. 259-67, 2000.

TUNAY, O. *Color removal from textile wastewaters*. *Water Science & Technology*. Vol.34, nº 1, 1996

UCKER, F. E. BARROSO, L. B. LOPES, M. I. P. *Utilização de lodo gerado em indústria para fabricação de argamassa*. *Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas*. Vol. 11, n. 1, p. 106 – 114. Santa Maria, 2010.

VERSTEEG, H.K. e MALALASEKERA. *Na Introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method*. Longman Group Ltd, England, 1995.

VIEIRA, L.G.M. *Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química. Universidade de Uberlândia, 2006.

VOGT, C.C. *As origens da indústria gaúcha e o setor têxtil no período do processo de substituição de importações*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Economia. Porto Alegre, 2003.