



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PROCESSOS**



**DANIEL CESAR DE MACEDO CAVALCANTE**

**ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO PARTÍCULA  
SÓLIDA/ÁGUA VIA HIDROCICLONE FILTRANTE: MODELAGEM E  
SIMULAÇÃO**

CAMPINA GRANDE - PB

2017

**DANIEL CESAR DE MACEDO CAVALCANTE**

**ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO PARTÍCULA  
SÓLIDA/ÁGUA VIA HIDROCICLONE FILTRANTE: MODELAGEM E  
SIMULAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

**Orientador:** Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

CAMPINA GRANDE - PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C376e Cavalcante, Daniel Cesar de Macedo.  
Estudo da fluidodinâmica do processo de separação partícula  
sólida/água via hidrociclone filtrante : modelagem e simulação / Daniel  
Cesar de Macedo Cavalcante. – Campina Grande, 2017.  
113 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade  
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.  
"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".  
Referências.

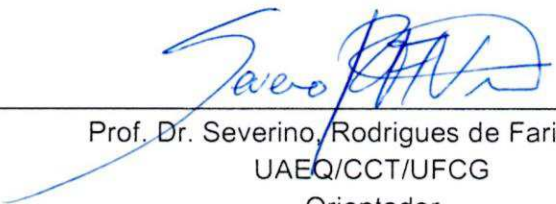
1. Fluidodinâmica. 2. Hidrociclones. 3. Membrana Porosa. 4. ANSYS  
CFX. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Título.

CDU 66.047(043)

Membros da banca examinadora da Tese de Doutorado de **Daniel Cesar De Macedo Cavalcante** apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.


24 de agosto de 2017

BANCA EXAMINADORA:



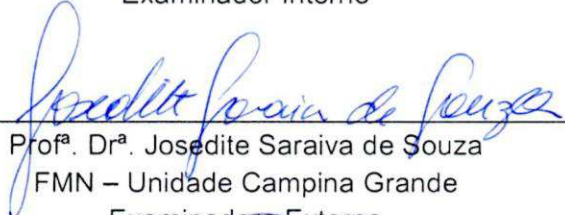
---

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto  
UAEQ/CCT/UF CG  
Orientador




---

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
DEM/CCT/UF CG  
Examinador Interno




---

Profª. Drª. Jose dite Saraiva de Souza  
FMN – Unidade Campina Grande  
Examinadora Externa



---

Profª. Drª. Fabiana Pimentel Macêdo Farias  
UATEC/CDSA/UF CG  
Examinadora Externa



---

Profª. Drª. Wilma Sales Cavalcanti  
UAEM/CCT/UF CG  
Examinadora Externa

## DEDICATÓRIA

*A Deus e a minha família por todo o incentivo,  
carinho e apoio incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Aos meus pais Eugênio e Adnaloi, que dignamente me apresentaram à importância da família e ao caminho da honestidade e persistência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, pelo incentivo, motivação e confiança depositada em mim durante toda essa trajetória.

A minha noiva e futura esposa Luana Guimarães Lima pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente nos de incerteza, muito comuns para quem tenta trilhar novos caminhos.

Aos Tios Eloy e Edgard por sempre me apoiarem

Ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF/UAEM) e Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI/UAEQ) da Universidade Federal de Campina Grande, que colocou à disposição toda infraestrutura necessária.

Ao meu amigo Allysom Daniel de Oliveira Ramos e Família pela colaboração, pelos bate-papos informais e pela paciência em me ouvir sempre que precisei.

A professora e amiga Morgana de Araújo Vasconcelos por dividir comigo os conhecimentos necessários para solucionar os problemas impostos neste trabalho.

Aos meus colegas, Anderson, Mayara, Samuel, Edna, João Paulo pelo apoio durante esse período.

A CAPES, pelo financiamento deste trabalho.

Ao Instituto Federal do Amazonas – *Campus* Tabatinga por sempre apoiar e liberar quando necessário para a finalização desta Tese.

A todos que contribuíram de alguma forma para a concretização deste objetivo.

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega.”*

**Ayrton Senna**

## RESUMO

CAVALCANTE, Daniel Cesar de Macedo. **Estudo da fluidodinâmica do processo de separação partícula sólida/água via hidrociclone filtrante**: modelagem e simulação. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Tese (Doutorado)

Os hidrociclones convencionais são equipamentos versáteis, devido a elevada capacidade de processamento, baixo custo de manutenção. Vários são os estudos que visam alterar a estrutura típica do hidrociclone convencional de modo alterar seu desempenho e objetivo. Assim surgiu os hidrociclones filtrantes no qual se diferencia do hidrociclone convencional pela substituição da parede cônica ou cilíndrica por uma membrana porosa. Durante o funcionamento desse separador, além das correntes tradicionalmente observadas (alimentação, *underflow* e *overflow*), há uma corrente líquida proveniente do processo de filtração, normalmente denominado filtrado. O presente trabalho propõe estudar hidrociclones filtrantes baseados no trabalho de Façanha (2012), a partir do estudo numérico do processo de separação água/partícula sólida realizado com auxílio do “software” comercial ANSYS CFX® Release 15.0. O modelo matemático usado considera escoamento tridimensional, turbulento, estacionário, baseado na abordagem Euleriana-Euleriana e modelo de turbulência SST “*Shear Stress Transport*”. Foram avaliados estudos da dinâmica do escoamento, Efeito da porosidade, efeito da permeabilidade e efeito da matriz porosa. Os resultados demonstram que a vazão do filtrado é menor em relação as outras saídas, altera o escoamento no interior do hidrociclone filtrante tanto em relação a porosidade, permeabilidade e efeito da posição do meio filtrante. O aumento da porosidade e permeabilidade alterou a distribuição de pressão, razão do líquido e eficiência total no interior do hidrociclo cilíndrico filtrante.

**Palavras-Chave:** Hidrociclones, Fluidodinâmica, Membrana Porosa, Ansys CFX.



## ABSTRACT

CAVALCANTE, Daniel Cesar de Macedo. **Fluid dynamics study of separation process of solid/water particle via hydrocyclone filter:** modeling and simulation. Campina Grande: Post-Graduate Program in Process Engineering, Federal University of Campina Grande, 2016, Doctor's Thesis.

Conventional hydrocyclones are versatile equipment due to high processing capacity and low maintenance costs. Several studies are aimed at changing the typical structure of conventional hydrocyclone in order to alter its performance and purpose. In this way the hydrocyclones filtering in which it differs from the conventional hydrocyclone by the replacement of the conical or cylindrical wall by a porous membrane. During the operation of this separator, in addition to the traditionally observed currents (feed, underflow and overflow), there is a liquid stream coming from the filtration process, usually called filtrate. The present work proposes to study filtering hydrocyclones based on the work of Façanha (2012), based on the numerical study of the water / solid particle separation process performed with the commercial software ANSYS CFX® Release 15.0. The mathematical model used considers three-dimensional, turbulent, stationary flow, based on the Eulerian-Eulerian approach and SST turbulence model "Shear Stress Transport". Studies of flow dynamics, porosity effect, permeability effect and porous matrix effect were evaluated. The results show that the flow rate of the filtrate is lower in relation to the other outlets, it changes the flow inside the filter hydrocyclone in relation to the porosity, permeability and effect of the position of the filter medium. The increase in porosity and permeability altered the pressure distribution, liquid ratio and total efficiency inside the filter cylindrical hydrocyclones

**Key-words:** Hydrocyclones; Fluid Dynamics Porous membrane; Ansys CFX.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	4
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1. PROCESSOS DE SEPARAÇÃO.....	5
2.1.1. SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA .....	5
2.1.2. SEPARAÇÃO POR FLOTAÇÃO .....	5
2.1.3. SEPARAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO .....	6
2.2. HIDROCICLONES CONVENCIONAIS.....	7
2.3. VELOCIDADES EM HIDROCICLONES.....	11
2.3.1. COMPONENTE AXIAL .....	11
2.3.2. VELOCIDADE TANGENCIAL.....	12
2.3.3. VELOCIDADE RADIAL.....	13
2.3.4. MODELOS DE SEPARAÇÃO.....	14
2.4. HIDROCICLONES FILTRANTES.....	16
2.5. CÁLCULOS DAS GRANDEZAS ASSOCIADAS AO HIDROCICLONE .....	30
<b>CAPÍTULO 3 - FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....</b>	<b>34</b>
3.1. EQUACIONAMENTO DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO. ....	35
3.1.1. ABORDAGEM EULERIANA – LAGRANGEANA .....	35
3.1.2. EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE MASSA.....	36
3.1.3. EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO.....	36
3.2. MODELOS DE TURBULÊNCIA.....	37
3.2.1. MODELO DE TURBULÊNCIA (k- $\epsilon$ ).....	39
3.2.2. MODELO DE TURBULÊNCIA (k- $\omega$ ).....	40
3.2.3. MODELO DE TURBULÊNCIA SST (SHEAR STRESS TRANSPORT). ....	41
<b>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA .....</b>	<b>44</b>
4.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	44
4.2. MALHA NÚMERICA.....	46
4.3. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	49
4.3.1. HIDROCICLONE CONVENCIONAL - HCON .....	49
4.3.2. HIDROCICLONE CILÍNDRICO FILTRANTE (HciF).....	51
4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	52
4.4.1. NA ENTRADA .....	52

4.4.2. NAS PAREDES.....	52
4.4.3. NAS SAÍDAS.....	52
4.5. CÁLCULOS DOS VALORES NUMÉRICOS. ....	53
4.5.1. QUEDA DE PRESSÃO.....	53
4.5.2. VAZÃO DE FILTRADO.....	53
4.5.3. NÚMERO DE EULER.....	54
4.5.4. RAZÃO DO LÍQUIDO.....	55
4.5.5. EFICIÊNCIA TOTAL.....	55
4.6. CASOS ESTUDADOS.....	55
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
5.1. AVALIAÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA MALHA NUMÉRICA.....	58
5.2. DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO HIDROCICLONE COM MEIO FILTRANTE CILÍNDRICO.....	60
5.1.2. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	66
5.1.2.1. VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO E FILTRADO.....	66
5.1.2.2. NÚMERO DE EULER.....	68
5.1.2.3. RAZÃO DO LÍQUIDO.....	68
5.1.2.3. EFICIÊNCIA TOTAL.....	69
5.2. EFEITO DA POROSIDADE.....	70
5.3. EFEITO DA PERMEABILIDADE.....	78
5.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS HIDROCICLONES CONVENCIONAL E FILTRANTE.....	84
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>107</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Modelo de hidrociclone (Adaptado de Barbosa, 2011) .....	2
<b>Figura 2.1:</b> Geometria de um hidrociclone convencional. Adaptado de Silva, 2012. ....	9
<b>Figura 2.2:</b> Distribuição da velocidade axial em diferentes posições verticais. Adaptada de Slack et al (2000). ....	11
<b>Figura 2.3:</b> Distribuição da velocidade axial em diferentes posições verticais. Adaptada de Slack et al (2000).....	12
<b>Figura 2.4:</b> Distribuição de velocidade tangencial em diferentes posições verticais dentro de um ciclone (a), adaptada de Slack et. al., (2000) Distribuição de velocidade tangencial em diferentes em diferentes posições dentro do ciclone (b) Bhaskar <i>et al.</i> (2007).....	13
<b>Figura 2.5:</b> Distribuição de velocidade radial em um hidrociclone. Adaptada de Svarovsky (1981).....	14
<b>Figura 2.6:</b> Ilustração da orbita de equilíbrio de uma partícula dentro de um hidrociclone. Adaptado Melo, 2010. ....	15
<b>Figura 2.7:</b> Hidrociclone filtrante e convencional. Adaptado de Oliveira <i>et al.</i> (2009) .....	16
<b>Figura 3.1:</b> Etapas do processo de simulação em CFD. Adaptado de Tu <i>et al.</i> (2008) .....	34
<b>Figura 4.1:</b> Figura 4.1: (a) Hidrociclone convencional (Hcon), (b) hidrociclone cilíndrico filtrante (HciF). Adaptado de Façanha (2012). ....	46
<b>Figura 4.2:</b> Representação do hidrociclone cilíndrico filtrante e dimensões .....	45
<b>Figura 4.3:</b> Representação do hidrociclone convencional e dimensões .....	45
<b>Figura 4.4:</b> Representação da blocagem: hidrociclone cilíndrico filtrante .....	46
<b>Figura 4.5:</b> Representação da blocagem: hidrociclone convencional .....	47
<b>Figura 4.6:</b> Representação da malha: hidrociclone cilíndrico filtrante.....	47
<b>Figura 4.7:</b> Representação da malha: hidrociclone convencional.....	48
<b>Figura 4.8:</b> Linhas “arestas” para construção das malhas conforme Tabela 4.2.....	49
<b>Figura 4.10:</b> Representação do plano no interior do hidrociclone no ZX na altura $y=0,165\text{mm}$ .....	54
<b>Figura 5.1:</b> Hidrociclone com meio filtrante cilíndrico .....	59
<b>Figura 5.2:</b> Velocidade resultante do fluido em função da posição x, nas posições y iguais a (a) 150mm e (b) 80mm para os três refinamentos da malha. ....	59
<b>Figura 5.3:</b> Campo de pressão sobre o plano XY para o caso cilíndrico filtrante de permeabilidade $K_1$ e porosidade $\varepsilon_1$ com vazão de alimentação de $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	61
<b>Figura 5.4:</b> Campo de velocidade axial (a), tangencial (b) e radial (c) sobre o plano XY para HciF <sub>(K1-ε1)</sub> com vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	61

<b>Figura 5.5:</b> Figura 5.5: Campo vetorial do escoamento na no interior do hidrociclone $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ com vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	64
<b>Figura 5.6:</b> Campo de fração volumétrica da água (a) e partícula sólida (b) sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ com vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	65
<b>Figura 5.7:</b> Campo de fração volumétrica da água (a) e partícula sólida (b) para a membrana cilíndrica sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ com vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	65
<b>Figura 5.8:</b> Vazão de alimentação em função da queda de pressão, para hidrociclones $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , $HciF_{(K2-\epsilon_2)}$ , $HciF_{(K3-\epsilon_3)}$ .....	66
<b>Figura 5.9:</b> Vazão volumétrica de filtrado em função da permeabilidade $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , $HciF_{(K2-\epsilon_2)}$ , $HciF_{(K3-\epsilon_3)}$ com queda de queda de pressões: 88 kPa, 118 kPa, 147 kPa e 177 kPa .....	67
<b>Figura 5.10:</b> Numero de Euler em função da queda de pressão para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , $HciF_{(K2-\epsilon_2)}$ , $HciF_{(K3-\epsilon_3)}$ .....	68
<b>Figura 5.11:</b> Queda de pressão em função da razão do líquido para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , $HciF_{(K2-\epsilon_2)}$ , $HciF_{(K3-\epsilon_2)}$ .....	69
<b>Figura 5.12:</b> Queda de pressão em função da razão do líquido para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , $HciF_{(K2-\epsilon_2)}$ , $HciF_{(K3-\epsilon_3)}$ .....	70
<b>Figura 5.13:</b> Campo de pressão sobre plano longitudinal XY para $\epsilon_2$ (a), $\epsilon_1$ (b) e $\epsilon_3$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	71
<b>Figura 5.14:</b> Campo de velocidade axial sobre o plano XY para para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	73
<b>Figura 5.15:</b> Campo de velocidade tangencial sobre o plano XY para para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	73
<b>Figura 5.16:</b> Campo de velocidade radial sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	74
<b>Figura 5.17:</b> Campo vetorial do escoamento na parte cilíndrica sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	74
<b>Figura 5.18:</b> Campo vetorial do escoamento na parte cônica sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	75
<b>Figura 5.19:</b> Campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	75
<b>Figura 5.20:</b> Campo de fração volumétrica de água na membrana cilíndrica sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	76
<b>Figura 5.21:</b> Campo de fração volumétrica de sólidos sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ (a), $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	76

<b>Figura 5.22:</b> Campo de fração volumétrica de partícula sólida na membrana cilíndrica sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ (b) e $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	77
<b>Figura 5.23:</b> Campo de fração volumétrica de partícula sólida sobre a espessura da membrana na posição x, na altura $y = 206\text{ mm}, 190\text{ mm}, 170\text{mm}, 150\text{mm}, 130\text{mm}$ para porosidades $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ e $\varepsilon_3$ .....	77
<b>Figura 5.24:</b> Campo de pressão sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	80
<b>Figura 5.25:</b> Campo de velocidade axial sobre o plano para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	80
<b>Figura 5.26:</b> Campo de velocidade tangencial sobre o plano XY para para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	81
<b>Figura 5.27:</b> Campo de velocidade radial sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	81
<b>Figura 5.28:</b> Campo vetorial da parte cilíndrica do escoamento do fluido no plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	82
<b>Figura 5.29:</b> Campo vetorial da parte cônica do escoamento do fluido no plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	82
<b>Figura 5.30:</b> Campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	83
<b>Figura 5.31:</b> Campo vetorial de fração volumétrica de água na membrana cilíndrica sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	83
<b>Figura 5.32:</b> Campo de fração volumétrica de sólidos sobre o plano XY $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a), $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ (b) e $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ (c) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	84
<b>Figura 5.33:</b> Campo de pressão sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a) e Hcon (b) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	85
<b>Figura 5.34:</b> Campo de velocidade radial sobre o plano XY para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ e (b) Hcon para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	86
<b>Figura 5.35:</b> Campo de velocidade tangencial sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a) e Hcon (b) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	87
<b>Figura 5.36:</b> Campo de velocidade radial sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a) e Hcon (b) para vazão volumétrica de alimentação $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .....	87

<b>Figura 5.37:</b> Campo vetorial da parte cilíndrica do escoamento do fluido no plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ e $Hcon$ para vazão volumétrica de alimentação $295,7cm^3/s$ .....	88
<b>Figura 5.38:</b> Campo vetorial da parte cônica do escoamento do fluido no plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a) e $Hcon$ (b) para vazão volumétrica de alimentação $295,7cm^3/s$ .....	88
<b>Figura 5.39:</b> Campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ (a) e $Hcon$ (b) para vazão volumétrica de alimentação $295,7cm^3/s$ .....	89
<b>Figura 5.40:</b> Campo de fração volumétrica de partícula sobre o plano XY para $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (a) e $Hcon$ (b) para vazão volumétrica de alimentação $295,7cm^3/s$ .....	89
<b>Figura 8.1:</b> Posição Z e linhas para alturas $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para construção de campo de pressão e perfis de velocidade axial, tangencial e radial .....	106
<b>Figura 8.2:</b> Campo de pressão para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ e (c) $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ .....	107
<b>Figura 8.3:</b> Perfil de velocidade axial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ e (c) $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ .....	107
<b>Figura 8.4:</b> Perfil de velocidade tangencial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ e (c) $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ .....	108
<b>Figura 8.5:</b> Perfil de velocidade radial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ e (c) $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ .....	108
<b>Figura 8.6:</b> Campo de pressão para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ e (c) $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ .....	109
<b>Figura 8.7:</b> Perfil de velocidade axial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ e (c) $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ .....	109
<b>Figura 8.8:</b> Perfil de velocidade tangencial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ e (c) $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ .....	110
<b>Figura 8.9:</b> Perfil de velocidade radial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ , (b) $HciF_{(K2-\varepsilon1)}$ e (c) $HciF_{(K3-\varepsilon1)}$ .....	110
<b>Figura 8.10:</b> Campo de pressão para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ e (b) $Hcon$ .....	111
<b>Figura 8.11:</b> Perfil de velocidade axial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ e (b) $Hcon$ .....	111
<b>Figura 8.12:</b> Perfil de velocidade tangencial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ e (b) $Hcon$ .....	111
<b>Figura 8.13:</b> Perfil de velocidade radial para posição Z e $Y=50$ mm, $90$ mm, $150$ mm, $180$ mm para (a) $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ e (b) $Hcon$ .....	112

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1:</b> Malhas numéricas .....	48
<b>Tabela 4.2:</b> Numero de divisões sobre as arestas usadas no refinamento da malha .....	49
<b>Tabela 4.3:</b> Propriedades físicas do fluido e partícula sólida do trabalho em estudo. ....	53
<b>Tabela 4.4:</b> Valores de permeabilidade e porosidade .....	53
<b>Tabela 4.5:</b> Caso estudado para dinâmica no interior do hidrociclone.....	55
<b>Tabela 4.6:</b> Casos estudados – HciF $K_1$ .....	56
<b>Tabela 4.7:</b> Tabela 4.7: Casos estudados – HciF $K_2$ .....	56
<b>Tabela 4.8:</b> Casos estudados – HciF $K_3$ .....	56
<b>Tabela 4.9:</b> Casos estudados para avaliação do efeito da porosidade no hidrociclone cilíndrico filtrante .....	57
<b>Tabela 4.10:</b> Casos estudados para avaliação do efeito da permeabilidade no hidrociclone cilíndrico filtrante .....	57
<b>Tabela 4.11:</b> Casos estudados para avaliação da posição do meio filtrante .....	57
<b>Tabela 5.1:</b> Influência da malha sobre os resultados numéricos.....	58
<b>Tabela 5.2:</b> Resultados experimentais da vazão de entrada (Façanha, 2012) e numérico em função de cada permeabilidade estudada .....	67
<b>Tabela 5.3:</b> Resultados experimentais vazão do filtrado (Façanha, 2012) e numérico em função das Permeabilidades estudadas .....	67
<b>Tabela 5.4:</b> Número de Euler em função da queda de pressão e permeabilidade.....	68
<b>Tabela 5.5:</b> Razão do líquido em função da queda de pressão .....	69
<b>Tabela 5.6:</b> Razão do líquido em função da queda de pressão .....	70



## **LISTA DE SIGLAS**

CAPES – Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CFD – Computational Fluid Dynamics

LCTF – Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos

UAEM – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

HciF – Hidrociclone cilíndrico filtrante

HCon – Hidrociclone convencional

## NOMENCLATURA

$C_v$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
$C_{va}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
$C_{vu}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
$C_w$	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
$C_{wo}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>overflow</i>	[-]
$C_{wu}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
$d_{50}$	Diâmetro de corte	[m]
$d'_{50}$	Diâmetro de corte reduzido	[m]
$d_{63,2}$	Parametro do modelo RRB	[m]
$d_p$	Diâmetro volumétrico da particular	[mm]
$D_a$	Diâmetro do duto de alimentação	[mm]
$D_C$	Diâmetro da secção cilíndrica do hidrociclone	[mm]
$D_o$	Diâmetro do orifício de <i>overflow</i>	[mm]
$D_u$	Diâmetro do orifício de <i>underflow</i>	[mm]
$e$	Espessura do meio filtrante	[mm]
$F$	<i>Vazão volumétrica do filtrado</i>	[cm <sup>3</sup> /s]
$Eu$	<i>Número de Euler</i>	[-]
$G$	<i>Eficiência granulométrica</i>	[-]
$G'$	<i>Eficiência granulométrica reduzida</i>	[-]
$k_i$	Permeabilidade das matrizes porosas	[m <sup>2</sup> ]
$k$	Permeabilidade do meio filtrante	[m <sup>2</sup> ]
$l$	Comprimento do "vortex finder"	[mm]
$L$	Comprimento total do hidrociclone	[mm]
$n$	Parametro do modelo RRB	[-]
$Q_a$	Vazão volumétrica na corrente de alimentação	[cm <sup>3</sup> /s]

$Q_o$	Vazão volumétrica na corrente de <i>overflow</i>	[cm/s]
$Q_u$	Vazão volumétrica na corrente de <i>underflow</i>	[cm/s]
Re	Número de Reynolds	[-]
$R_L$	Razão do líquido	[-]
$stk_{50}$	Número de strokes	[-]
W	Vazão mássica de suspensão	Kg/s
$W_{su}$	Vazão mássica de solidos na corrente de <i>underflow</i>	Kg/s
$W_u$	Vazão Mássica de suspensão na corrente de <i>underflow</i>	Kg/s
n	Eficiência total	[-]
n'	Eficiência total reduzida	[-]
$\Delta P$	Queda de pressão do hidrociclone	[Pa]
$\mu$	Viscosidade do fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Densidade do fluido puro	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	Densidade de suspensão de alimentação	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_o$	Densidade de suspensão do overflow	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Densidade do sólido	[kg/m <sup>3</sup> ]
g	Aceleração da gravidade terrestre	[m/s <sup>2</sup> ]
$S_M$	Fonte de massa	[-]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^D$	Força de arraste interfacial	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^{TD}$	Força de dissipação turbulenta	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB}$	Força de lubrificação	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^{VM}$	Força de massa virtual	[N]
$\vec{M}_{\alpha\beta}^L$	Força de sustentação	[N]
$\vec{M}_s$	Força devido a pressão de sólidos	[N]
$\vec{M}_\alpha$	Força interfacial de fase	[N]
$\vec{M}$	Força interfacial total	[N]

$\vec{U}_\alpha$	Vetor velocidade da fase água	[m/s]
$\vec{U}_\beta$	Vetor velocidade da fase partícula	[m/s]
$f_s$	Fração volumétrica	[-]
$f_\beta$	Fração volumétrica da fase dispersa	[-]
$\varpi$	Frequência da turbulência	[N]
$P_k$	Produção de energia cinética turbulenta	[kg/ms <sup>3</sup> ]
$P_{kb}$	Produção de flutuação	[kg/ms <sup>3</sup> ]
$\Gamma_{\alpha\beta}^+$	Taxa de fluxo mássico interfacial	[kg/ms]
$\tau_s$	Tensão da fase sólida	[-]
$\tau$	Tensão superficial	[mN/m]
$\tau_\alpha^{turb}$	Tensão turbulenta da fase	[Kg/m <sup>1</sup> s <sup>3</sup> ]
$\tau_\alpha$	Tensão viscosa da fase	[-]
$F_1$	Função de combinação	[-]
$F_2$	Função de combinação	[-]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo de turbulência	[-]
k	Energia cinética turbulenta	[-]
$\sigma_\varepsilon$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$\sigma_k$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$\sigma_\varpi$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$\sigma_p$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$\beta$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$\alpha$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo de turbulência	[-]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo de turbulência	[-]

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas das indústrias está no tratamento de seus efluentes antes de seu descarte no meio ambiente. Grande parcela desses rejeitos é constituída de partículas sólidas e/ou líquidos que, em geral, devem ser tratados visando o seu descarte ou mesmo seu reaproveitamento. A poluição por petróleo é uma questão bastante delicada e sua presença conduz a não aeração e a penetração de luz nos cursos d'água decorrente de um filme insolúvel na superfície da água produzindo, assim, efeitos nocivos à fauna, flora (Rosa, 2002; Rego, 2008). As águas oleosas correspondem a uma mistura água e óleo que podem ser observadas em diferentes estágios da produção, extração, transporte e refino. O cisalhamento causado por bombas, válvulas, acessórios (curvas, bifurcações, etc) e outros equipamentos conduzem a uma mistura das fases (água e óleo) e, muitas vezes, podem conduzir a emulsões. Visando minimizar esses efeitos, muitos estudos vêm sendo realizados acerca de processos de separação água/óleo ou água/óleo/partículas sólidas empregando, por exemplo, aqueles processos que utilizam movimentos circulares ou turbilhonares induzidos por uma ou mais entradas tangenciais, a exemplo do hidrociclone (Hargreaves e Silvester, 1990; Simões *et al.*, 2004; Husveg *et al.*, 2007; Vieira *et al.*, 2007; Simões, 2008; Mousavian e Najafi, 2008; Buriti, 2009; Farias *et al.*, 2008a e 2008b; Farias *et al.*, 2009; Farias *et al.*, 2010; Barbosa, 2011; Souza, 2012).

Os hidrociclones são equipamentos dotados, em geral, de uma ou mais entradas tangenciais perpendiculares a uma seção cilíndrica que se encontra conectada a uma seção cônica. Ainda na seção cilíndrica encontra-se um tubo central, conforme pode ser observado na Figura 1.1. Os hidrociclones são agrupados em famílias e cada família é definida como sendo aquela que mantêm, num mesmo conjunto de hidrociclones, entre si uma proporção constante e exclusiva de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da seção cilíndrica. Essa proporcionalidade tem um papel fundamental no processo de separação, pois está diretamente relacionada com a capacidade, poder de seleção e eficiência de separação.

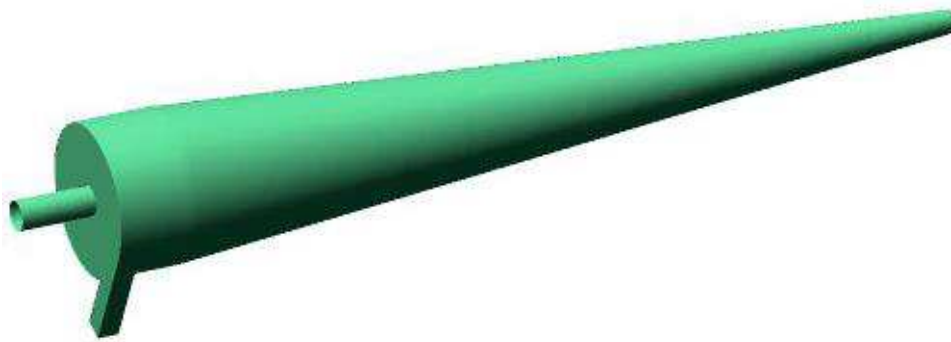


Figura 1.1: Modelo de hidrociclone. Adaptado de Barbosa, 2011.

Vieira (2006) relata que as famílias de hidrociclones dotadas de uma região cilíndrica relativamente grande apresentam maior capacidade de processamento, enquanto os que têm a altura da parte cônica de maior dimensão induzem a uma maior eficiência de coleta. Tem sido observado na literatura que os hidrociclones apresentam, em geral, a seção cônica maior que a cilíndrica (Hargreaves e Silvestre, 1990; Thomas, 2001; Simões *et al.*, 2004; Marins, 2007; Raposo, 2008; Barbosa, 2011).

Segundo Vieira (2006) o emprego de uma determinada família de hidrociclones geralmente é restrito à necessidade de equipamentos com alto poder classificador ou com grande poder concentrador. Além disso, os hidrociclones podem ser altamente eficientes no processo de separação de partículas entre 5 a 400  $\mu m$ . Em virtude dessa versatilidade dos hidrociclones, eles podem ser aplicados na classificação seletiva, espessamento, fracionamento, recuperação de líquidos, pré-concentração, entre outros.

Henrique *et al.* (1987) propuseram a incorporação de uma seção cônica porosa e permeável a um hidrociclone convencional e o denominou de hidrociclone filtrante. Mais tarde, Barrozo *et al.* (1992) obtêm os primeiros resultados utilizando um hidrociclone filtrante construído segundo a geometria de Bradley com um meio poroso de nylon. Eles observaram mudanças significativas das principais variáveis operacionais conduzindo principalmente a acréscimos na capacidade de processamento e a decréscimos na razão de líquido e eficiência de coleta.

Alguns anos mais tarde, Vieira (1997) utilizou um hidrociclone filtrante com base na geometria de Bradley e um meio filtrante de polipropileno. Ele observou que

as variáveis operacionais ainda mantinham as mesmas tendências observadas por Barrozo *et al.* (1992) distinguindo-se apenas quanto à ordem de grandeza. Vieira (2001) passou a estudar o hidrociclone filtrante com base na geometria de Reitema. Ele concluiu que tanto a filtração quanto a geometria utilizada para o tronco cônico interferiram simultaneamente na fluidodinâmica do sistema. Vieira (2001) observou também que a influência das variáveis operacionais dos hidrociclones filtrantes de Reitema caminhava em sentido adverso àquele oriundo dos hidrociclones filtrantes de Bradley. Barbosa *et al.* (2002) estudaram os hidrociclones filtrantes segundo as geometrias Krebs e Demco, e concluíram que a filtração alterava de forma menos significativa o comportamento do que as perturbações verificadas para as geometrias Bradley e Reitema.

Vieira (2006) realizou uma investigação e otimização da performance de hidrociclones filtrantes, segundo relações geométricas advindas da técnica de planejamentos de experimentos, no intuito de maximizar as eficiências de coleta e em contrapartida, minimizar os custos energéticos. Ele concluiu que a filtração afetava o desempenho do hidrociclone e que, para uma mesma vazão volumétrica de alimentação dos hidrociclones convencionais, os hidrociclones filtrantes foram capazes de proporcionar uma menor queda de pressão durante a separação sólido-líquido. Vieira (2006) observou também, a partir de simulações em CFD, usando o Fluent, que a presença da filtração foi capaz de reduzir o movimento espiralado do fluido no interior do hidrociclone filtrante, amortecendo-o, bem como minorar a componente tangencial do fluido no vórtice externo. Percebe-se que os trabalhos supracitados empregando hidrociclones filtrantes foram voltados ao processo de separação de partículas sólidas da fase líquida, ou seja, na presença de um escoamento bifásico.

Façanha (2012) avaliou o efeito da permeabilidade no hidrociclone de parede cilíndrica filtrante para três permeabilidades diferentes. Ela concluiu que a presença da vazão de filtrado, relacionado à membrana cilíndrica, influencia no interior do hidrociclone cilíndrico filtrante acarretando um menor número de Euler e razão do líquido em relação ao convencional. A eficiência total de separação do hidrociclone filtrante foi do hidrociclone cilíndrico foi de na faixa de 11 % menor que o convencional.

## **1.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o processo de separação água/partícula sólida em um hidrociclone com parede cilíndrica filtrante.

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aplicar as equações de conservação de massa, momento linear para prever o processo de separação água/partícula sólida usando um hidrociclone cilíndrico filtrante;
- Avaliar o efeito da permeabilidade e da porosidade sobre o processo de separação no hidrociclone filtrante;
- Realizar estudos fluidodinâmicos da matriz porosa no hidrociclone em diferentes secções do hidrociclone;
- Analisar o efeito dos parâmetros operacionais (pressão, velocidade ou vazão de alimentação) sobre o processo de separação usando um hidrociclone filtrante;
- Comparar os resultados obtidos com dados reportados na literatura.



## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PROCESSOS DE SEPARAÇÃO

De acordo com Rosa (2002) a escolha do processo de tratamento vai depender das características do efluente (concentração de óleo, tamanho das gotas, sólidos suspensos, dentre outros) e a capacidade específica desejada.

#### 2.1.1. SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA

Os separadores gravimétricos são frequentemente utilizados na separação do óleo livre e disperso na água, no entanto ao ocorrer diminuição da gota de óleo (inferiores a  $21 \mu\text{ m}$ ) essa técnica apresenta dificuldades, tornando-se ineficiente. O tamanho das partículas de óleo que podem ser removidas por separação gravimétrica é determinado pelo tempo provido para a separação e pela velocidade de ascensão (Rosa, 2002; Massi *et al.*, 2008), que pode ser calculada pela lei de Stokes:

$$V_r = \frac{d^2 g (\rho_w - \rho_p)}{18\mu} \quad (2.1)$$

Onde:

$V_r$  : velocidade de ascensão.

$d$  : diâmetro da partícula.

$g$  : aceleração da gravidade.

$\rho_w$  : densidade da fase continua.

$\rho_p$  : densidade da partícula.

$\mu$  : viscosidade da fase continua.

#### 2.1.2. SEPARAÇÃO POR FLOTAÇÃO

A técnica por flotação é utilizada para tratar efluentes que passaram pela separação gravimétrica, de modo a reduzir os teores de óleo e de sólidos em

suspensão a menores níveis. A separação por flotação complementa a separação gravimétrica, pois em níveis menores de partículas de óleo, ela torna-se eficaz, por utilizar os mesmos princípios que a separação gravimétrica, sendo que muito mais efetiva na remoção de óleo disperso e de sólidos molhados por óleo que apresentam densidades muito próximas àquela que apresenta a água. Diferenças de empuxo são incrementadas pela introdução de pequenas bolhas de ar, tipicamente de 30 a 120 microns de diâmetro, as quais se ligam às gotículas de óleo ou às partículas e aumentam suas velocidades de ascensão (Rosa, 2002; Ledo, 2008).

O processo de flotação convencional consiste em duas etapas: geração de bolhas (normalmente ar) no interior do efluente, logo depois ocorre a colisão entre as bolhas e as gotas de óleo suspensas na água ocasionando a adesão das bolhas de ar nas gotas de óleo; e ascensão dos agregados gota de óleo/bolhas até a superfície, onde o óleo será removido (Louzada, 2008; Massi *et al.* 2008;).

Existem dois métodos de separação por flotação de ar, se distinguindo pela geração de bolhas. Na Flotação por Ar Induzido (FAI) é conseguida pela agitação violenta do meio (agitador mecânico ou borbulhamento de ar direto) e consequente formação de espuma na superfície da célula de flotação. Na Flotação por Ar Dissolvido (FAD) uma porção do efluente é saturada com ar sob pressão e quando a pressão é aliviada bolhas são formadas (Ledo, 2008; Massi *et al.* 2008).

### **2.1.3. SEPARAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO**

Assim como separadores gravimétricos e por flotação, a técnica de separação por centrifugação também usa a diferença de densidade como ponto de apoio. Assim, a centrifugação é um processo de separação onde a força centrífuga relativa gerada pela rotação da amostra é usada para sedimentar sólidos em líquidos, ou líquidos imiscíveis de diferentes densidades. O princípio básico de funcionamento se resume quando é induzido um movimento circular que ocasiona uma força centrífuga que possibilita que as fases mais densas se movam para a parte externa do dispositivo e as fases menos densas permaneçam próximas ao eixo de rotação. Em centrifugas, por exemplo, a força centrífuga tem um valor várias vezes maior do que a força da gravidade, podendo chegar até 6000 G.

Em muitas centrifugas a água oleosa entra pela base e sai pelo topo. Provido tempo de residência suficiente para que ocorra separação adequada, os sólidos são forçados para o exterior da unidade, enquanto que o óleo se move no sentido do centro da centrifuga. As concentrações de óleo no efluente obtidas com as centrifugas variam muito de tipo, sendo que os custos associados com a centrifugação dependem substancialmente da vazão volumétrica a ser tratada.

## **2.2. HIDROCICLONES CONVENCIONAIS**

O hidrociclone é o equipamento utilizado para realizar o processo de separação óleo/água atualmente muito utilizado na indústria do petróleo, devido a sua simplicidade de construção. Por não possuírem partes móveis, os custos de aquisição, de manutenção e de operação são baixos. Outra vantagem a ser citada é sua versatilidade, o que permite que sejam aplicados em muitos setores industriais, tais como siderúrgico, químico, metalúrgico, alimentício, têxtil, bem como sua capacidade de atingir requisitos ambientais para descarte de seus efluentes (Filgueiras, 2005). Os hidrociclones pertencem a uma classe especial de equipamentos destinados principalmente a separação de partículas sólidas presentes em uma suspensão líquida (Tonin, 2012).

O hidrociclone é classificado em famílias. Uma família de hidrociclone consiste em um conjunto específico de separadores que mantém entre si uma proporção constante e exclusiva de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da parte cilíndrica ( $D_c$ ). O desenvolvimento destas famílias foi em grande parte fruto de observações experimentais relacionadas a conceitos teóricos (Vieira, 2006; Lacerda, 2007; Almeida, 2008). Essa proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é importante no processo de separação, pois está diretamente associada com a capacidade de separação destes equipamentos. Dentre as famílias de hidrociclones podem ser citadas as de Bredley, Rietema, Krebs, CBV/Denco, Hi-Klone, Mosley, Rw 2515, Warmam, dentre outros. Na Tabela 2.1 estão representadas as relações geométricas de cada uma dessas famílias.

Tabela 2.1 Razões entre as principais relações geométricas pertencentes a algumas das famílias de hidrociclones

Família de hidrociclone	$D_C$ (m)	Proporções geométricas				
		$D_1/D_C$	$D_o/D_C$	$D_u/D_C$	$L/D_C$	$\theta$
Rietema	0,075	0,280	0,340	0,400	5,00	20°
Bradley	0,038	0,133	0,200	0,330	6,85	9°
Mosley	0,022	0,154	0,214	0,570	7,43	6°
Mosley	0,044	0,160	0,250	0,570	7,71	6°
Warman	0,076	0,290	0,200	0,310	4,00	15°
Ki-Klone	0,097	0,175	0,250	0,920	5,60	10°
RW 2515	0,0125	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
Demco	0,051	0,217	0,500	1,000	4,70	25°
Demco	0,0102	0,244	0,313	0,833	3,90	20°

Fonte: Svarovsky (1981)

Um hidrociclone é formado basicamente por uma parte cônica conectada a uma parte cilíndrica que contém uma entrada tangencial em um duto retangular ou cilíndrico para suspensão de alimentação. Na parte superior existe um tubo de suspensão diluída chamada “overflow” com alongamento axial por dentro do equipamento chamado de “*vortex finder*”, a parte cilíndrica é conectada com a parte cônica e na parte de baixo do cone situa-se um orifício de saída denominado “*underflow*”, conforme pode ser observado na Figura 2.1.

O princípio básico de operação de um hidrociclone consiste na entrada tangencial de água oleosa sob pressão. Quando a amostra entra em contato com a superfície do cilindro a força de arraste é convertida em forças centrífugas induzindo, assim, a separação das fases por densidade.

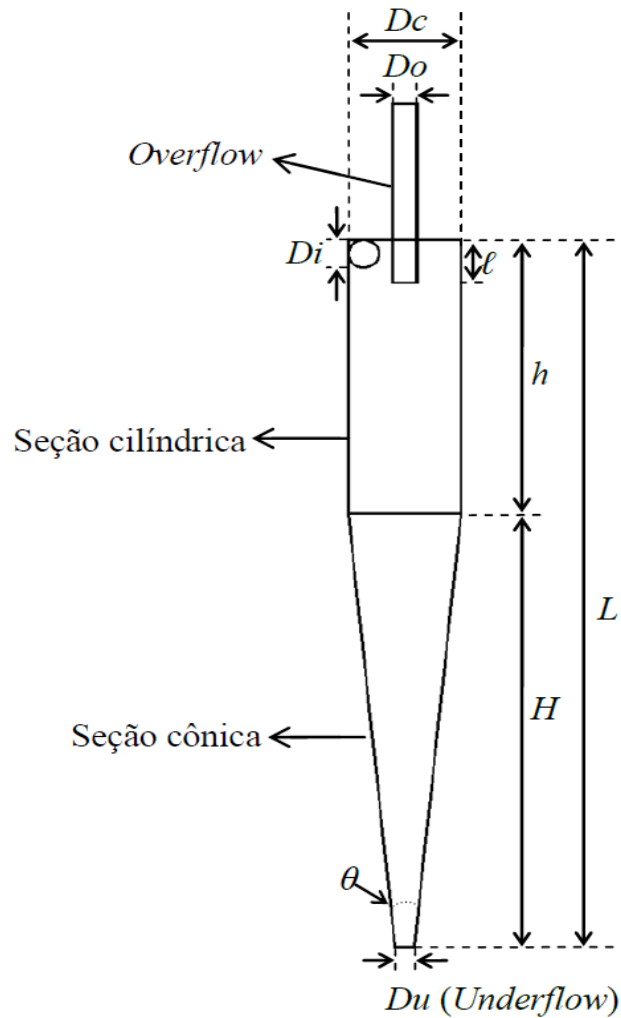


Figura 1.1: Geometria de um hidrociclone convencional. Adaptado de Silva, 2012.

Neste instante, devido à perda de carga no interior do hidrociclone a ação da força peso, há uma perturbação no movimento circular conduzindo as fases, principalmente as mais densas, em direção à saída inferior do hidrociclone formando assim um movimento helicoidal ou em espiral descendente. O contínuo decréscimo de diâmetro, na região cônica faz com que o fluxo seja acelerado, possibilitando que a força centrífuga permaneça maior que a força peso, mantendo, assim, o movimento em espiral descendente. O fluxo axial reverso ocorre na parte central do equipamento, devido ao formato cônico do hidrociclone e ao diferencial de pressão existente entre as paredes e o centro. A fase líquida central que deixa o hidrociclone pela parte superior (topo), contendo óleo em maior proporção é denominada rejeito. A saída de água se localiza na parte inferior do equipamento (fundo), contendo certa quantidade de óleo residual (Barbosa, 2011; Rego, 2008, Filgueiras, 2005; Lacerda, 2007; Almeida, 2008).

O hidrociclone é de simples construção, apresenta um comportamento fluidodinâmico fluido-partícula complexa. Observa-se na literatura inúmeros trabalhos que recorrem a recursos com fundamentação mais experimental do que teórica (Vieira, 2007; Lacerda, 2007; Almeida, 2008; Façanha, 2012).

O escoamento no hidrociclone dá-se em todas as direções, ou seja, radial, axial e tangencial. Esse fenômeno pode ser descrito pelas equações da continuidade e de movimento. No entanto, a solução dessas equações é, muitas vezes, complexa. Por esse motivo, muitos estudos envolvendo hidrociclones se fundamentam em grupos adimensionais (Svarovsky, 1981). Os grupos adimensionais mais importantes são os números de Stokes, Euler e Reynolds que estão relacionados, respectivamente, com o poder de separação, com os custos energéticos e com o tipo de escoamento, representados a seguir:

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho)u_c(d_{50})^2}{18\mu D_c} \quad (2.2)$$

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho u_c^2} \quad (2.3)$$

$$Re = \frac{\rho D_c u_c}{\mu} \quad (2.4)$$

É importante saber que as três equações estão relacionadas entre si de acordo com a influência que desempenham no processo de separação, podendo associá-los a concentração volumétrica dos sólidos e a razão do líquido de tal forma que se obtém uma seguinte função matemática com a seguinte estrutura (Silva e Medronho, 1988).

$$Stk_{50} Eu = f(Re, R_L, C_r) \quad (2.5)$$

Como em todos os separadores que envolvem a dinâmica das partículas no sistema, a dinâmica do escoamento é extremamente importante para entender seu mecanismo de funcionamento. Desta forma, nas secções seguintes são apresentados os perfis de velocidade axial, tangencial e radial em ciclones.

## 2.3. VELOCIDADES EM HIDROCICLONES

### 2.3.1. COMPONENTE AXIAL

Responsável pelo descarte da fase menos densa, supondo um hidrociclone posicionado na vertical, a velocidade axial é descendente, junto à parede do equipamento, ao longo da trajetória espiral. Analisando os perfis característicos da velocidade axial de Slack *et al.* (2000), Figura 2.2, nota-se picos ou dois tipos de escoamento vertical, um para cima e outro para baixo, representando valores positivos e negativos respectivamente. Logo os valores positivos da velocidade axial diminuem com o aumento da distância radial em relação ao eixo central do ciclone até atingirem zero.

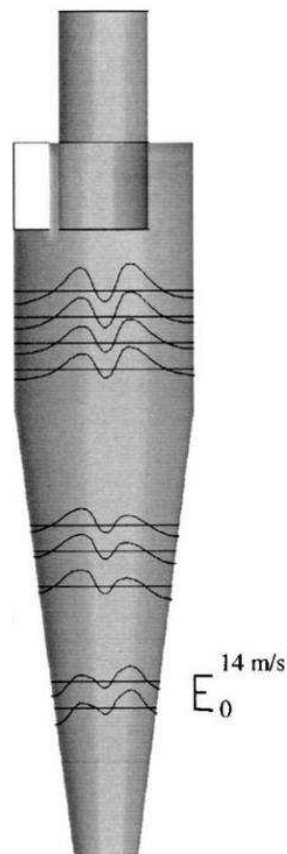


Figura 2.2: Distribuição da velocidade axial em diferentes posições verticais. Adaptada de Slack *et al.* (2000).

Assim, segundo Svarovsky (1981) poderá existir uma linha bem definida de velocidade axial nula como mostra a Figura 2.3. Os valores negativos aumentam com o aumento da distância radial em relação ao eixo central do ciclone. Porém, quando

se aproxima das paredes do equipamento a velocidade axial negativa começa a decrescer.

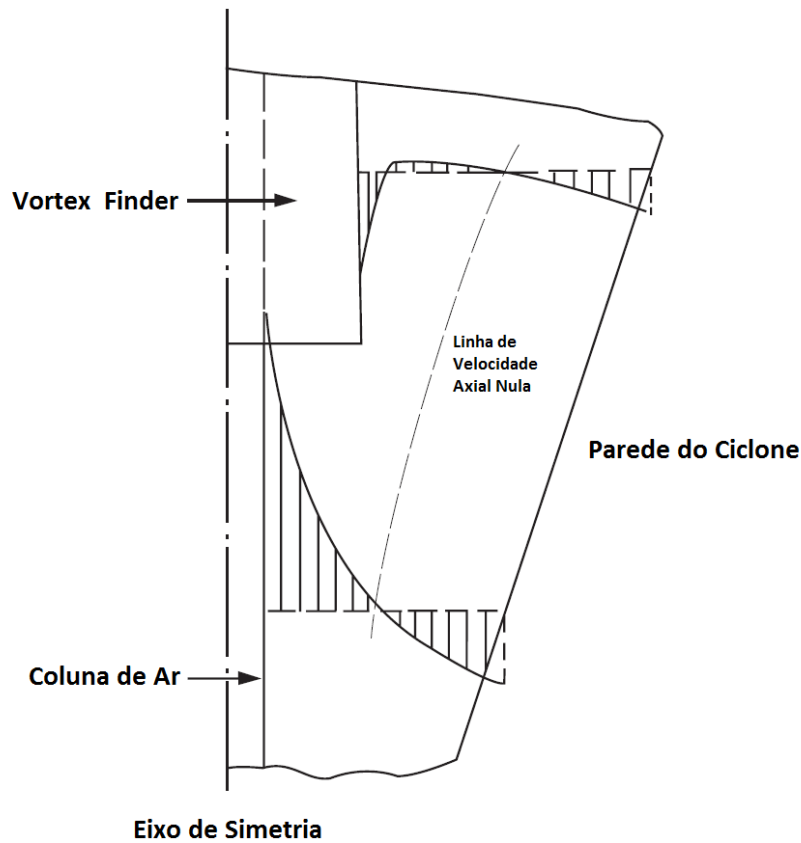


Figura 2.3: Distribuição da velocidade axial em diferentes posições verticais. Adaptada de Slack *et al* (2000).

### 2.3.2. VELOCIDADE TANGENCIAL

A velocidade tangencial é a componente de maior magnitude e, assim, de maior dominância no escoamento. Ela age diretamente no processo de separação da fase mais densa. Ao entrar tangencialmente no corpo cilíndrico, a partícula tem a tendência de realizar uma trajetória espiral descendente e ao entrar no corpo cônico, sua velocidade tangencial é crescente até determinado ponto.

Fisher e Flack (2002) relacionaram diferentes taxas de fluxo na entrada do hidrociclone com as componentes de velocidade e verificaram que as curvas da componente da velocidade tangencial estão linearmente relacionadas com a variação das taxas de fluxo, desta forma esta componente de velocidade apresenta perfis bem definidos, segundo Slack *et al.*, (2000) e Bhaskar *et al.* (2007), Figura 2.4.



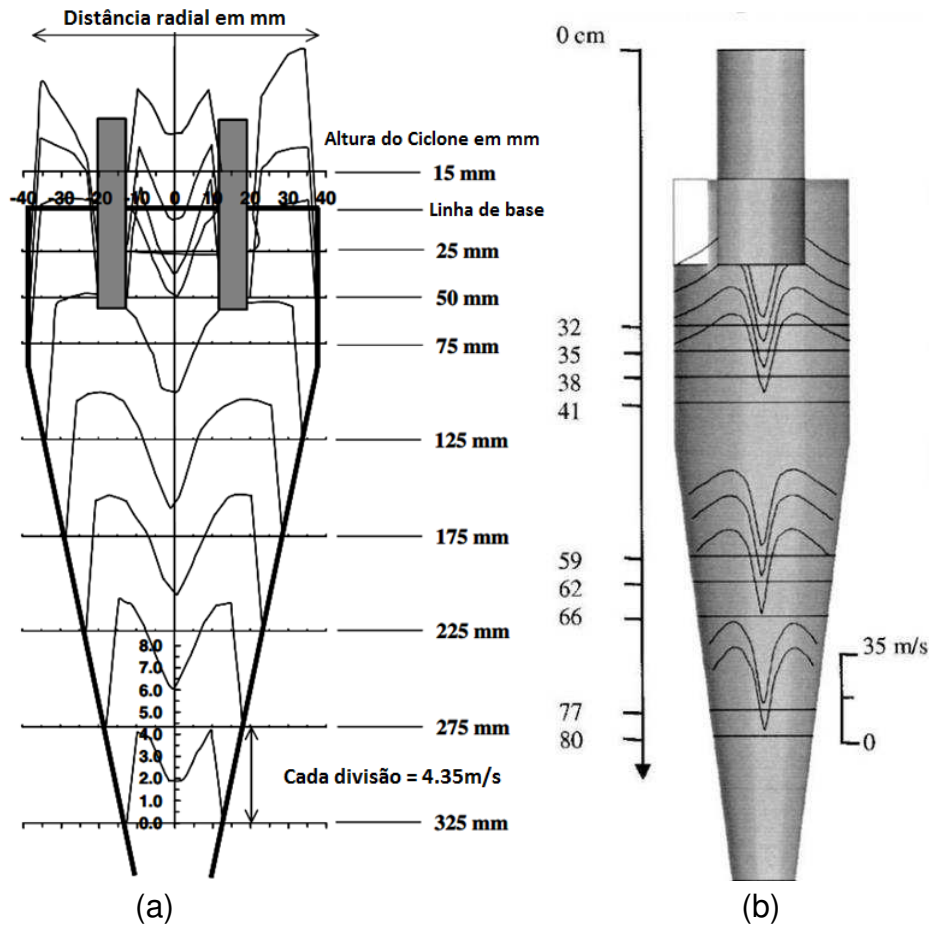


Figura 2.4: Distribuição de velocidade tangencial em diferentes posições verticais dentro de um ciclone (a), adaptada de Slack *et al.*, (2000). Distribuição de velocidade tangencial em diferentes posições (b) dentro do ciclone Bhaskar *et al.* (2007).

### 2.3.3. VELOCIDADE RADIAL

A componente da radial é a velocidade que tem mais dificuldade de ser medida, pois seu valor é menor que as outras componentes (Monredon *et al.*, 1992, Svarovsky, 1981). Ela tem sido desprezada em muitos estudos, devido a sua contribuição ser muito pequena quando comparada as outras duas componentes de velocidade. Uma explicação para este fato seria que a velocidade radial é, em termos absoluto, menor do que as velocidades axiais e tangenciais e as partículas apresentam uma variação na morfologia ou nas propriedades do material particulado, o que dificulta sua medida. Como alternativa, muitos estudiosos calculam a velocidade radial baseado nos resultados medidos das velocidades axial e tangencial.

Como pode ser observado na Figura 2.5, a velocidade radial aponta para o interior do hidrociclone e a sua magnitude diminui com o decréscimo do raio. A posição radial de velocidade zero radial não é conhecida.

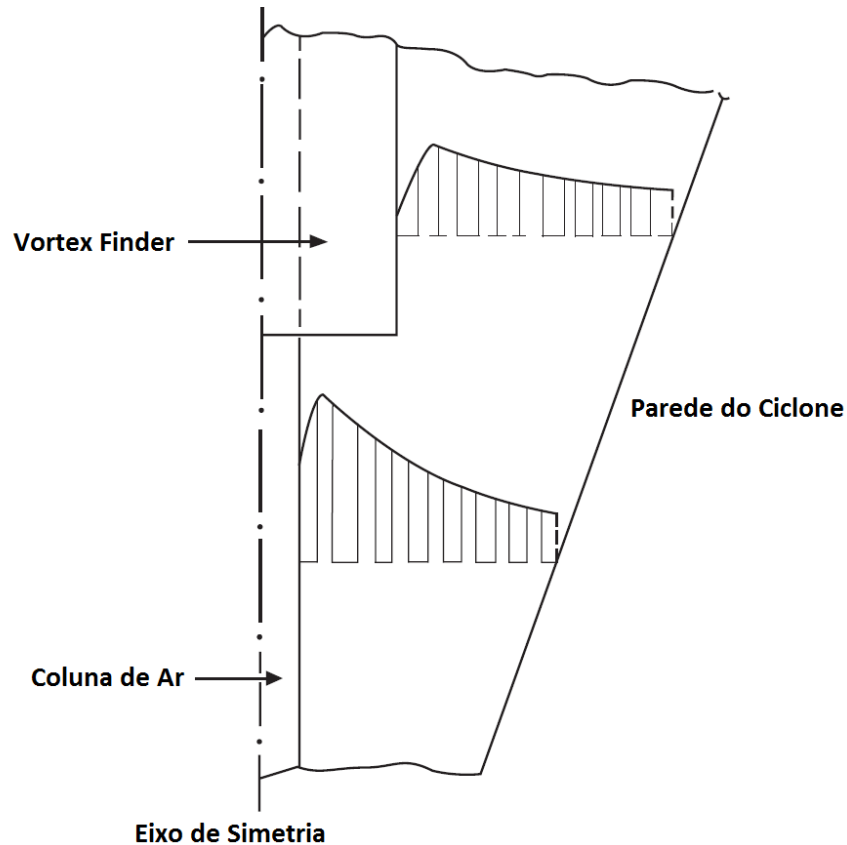


Figura 2.5: Distribuição de velocidade radial em um hidrociclone. Adaptada de Svarovsky (1981).

#### 2.3.4. MODELOS DE SEPARAÇÃO

Existem modelos de separação em hidrociclones que tentam por meio de separação teórica descrever a forma de classificação das partículas. Assim, de acordo com as hipóteses existentes podem ser agrupados em quatro grupos: modelo da órbita do equilíbrio, modelo populacional, modelo bifásico turbilhonar e o modelo do tempo de residência (Almeida, 2008).

O modelo da órbita do equilíbrio baseia-se no conceito de raio de equilíbrio onde as partículas com tamanhos iguais que ficam em uma órbita de equilíbrio no hidrociclone e as velocidades terminais no campo centrífugo são iguais a velocidade do radial do líquido, conforme figura 2.6.

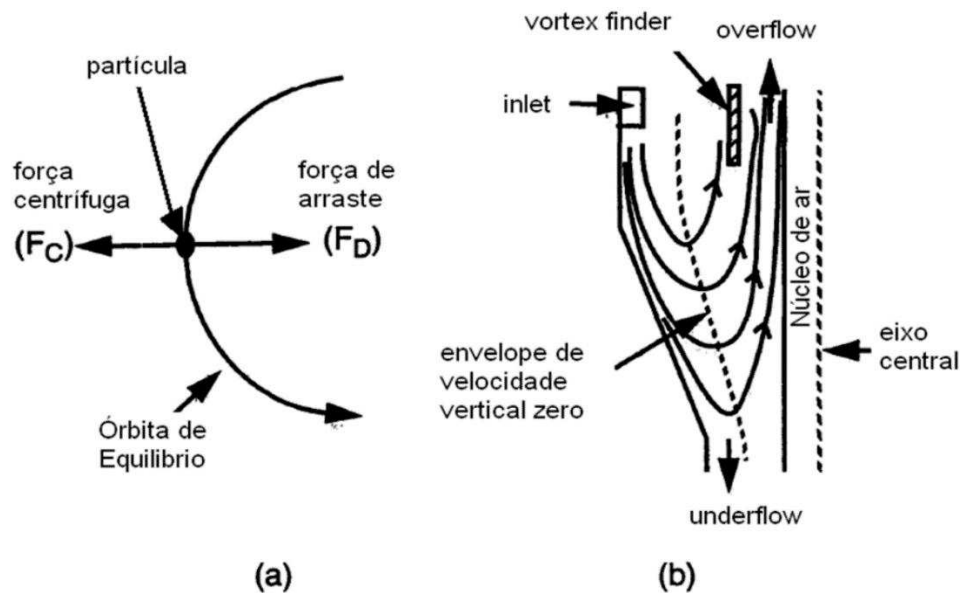


Figura 2.6: Ilustração da órbita de equilíbrio de uma partícula dentro de um hidrociclone. Adaptado Melo, 2010.

O modelo populacional propõe que o diâmetro de corte é uma função da dimensão do orifício de “*underflow*” e da distribuição granulométrica da alimentação. Fahlstrom (1960) relata que efeito populacional de corte poderia ser estimado a partir da recuperação de massa do “*underflow*”. As informações estabelecidas por essa teoria não produziram resultados quantitativos, servindo assim, para explicar diversas observações qualitativas da operação com hidrociclones.

A teoria turbilhonar não configura um modelo propriamente dito, pois é sempre usada em conjunto com outro método, pois esse efeito modifica o perfil de velocidades, que logo altera o desempenho do hidrociclone.

O modelo de tempo de residência é baseado na hipótese de que uma partícula será coletada se conseguir descolar-se radialmente da entrada até a parede do hidrociclone num tempo menor ou igual aquele em que essa permanece no interior do hidrociclone (Rietema, 1961; Vieira, 2006; Façanha, 2012). Este modelo possui importantes hipóteses, tais como distribuição homogênea das partículas no duto de alimentação, validade do regime de Stokes para a validade terminal e a negligência dos efeitos de turbulência e concentração no processo de separação.

## 2.4. HIDROCICLONES FILTRANTES

Um hidrociclone filtrante se diferencia do hidrociclone convencional pela substituição da parede cônica ou cilíndrica por uma porosa (Vieira, 2006; Almeida, 2008; Lacerda, 2007; Façanha, 2012), conforme Figura 2.7. Assim, durante o funcionamento desse separador, além das correntes tradicionalmente observadas, há uma corrente líquida proveniente do processo de filtração, normalmente denominado filtrado. Vieira (2006) e Façanha (2012) relatam que o hidrociclone filtrante sendo utilizado nas mesmas condições geométricas e operacionais de um hidrociclone convencional, ocorre um incremento na eficiência de separação das partículas e uma redução no consumo energético para promover a referida separação.

O hidrociclone filtrante foi inspirado nos resultados de Damasceno e Massarani (1989) e Henrique *et al.* (1987), incorporando um fundo filtrante ao hidrociclone convencional, eles observaram a partir de seus resultados que houve decréscimo de até 50% da área requerida para sedimentação.

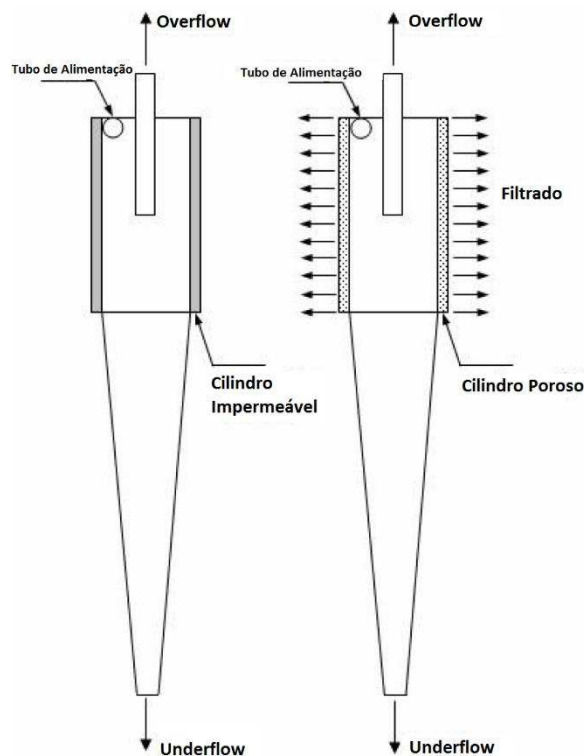


Figura 2.7: Hidrociclone filtrante e convencional. Adaptado de Oliveira *et al.* 2009.

Os primeiros resultados advindos dos hidrociclones filtrantes, foram obtidos por Lana *et al.* (1992) revestindo a parede cônica do hidrociclone convencional de

família Bradley por um tecido de nylon. Foi observado que o equipamento apresentou algumas vantagens em relação ao convencional, nas mesmas condições operacionais. Este apresentou acréscimo na concentração de sólidos na corrente de “*underflow*”, acompanhado pela redução do número Euler, ocasionando decréscimo no custo energético. O mesmo também apresentou perda na eficiência e aumento de diâmetro de corte.

As informações obtidas por Lana *et al.* (1992) decorrentes de seu estudo foram:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0.039 \left( \frac{u \cdot D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{1 + 1,73R_L} \exp(4,5C_v) \quad (2.6)$$

$$R_L = 1,88 \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{0,67} \quad (2.7)$$

$$Eu = 5313 \quad (2.8)$$

Vieira (1997) deu continuidade aos trabalhos de Lana *et al.* (1992) trocando o tecido de nylon por um meio poroso manufaturado de prolipropileno. Ele obteve resultados semelhantes ao de Lana *et al.* (1992) diferindo apenas em questão de ordem de grandeza. Analogamente, utilizou a sistemática de Massarani (1989) e chegou às seguintes equações:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0.047 \left( \frac{\mu \cdot D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{1 + 1,73R_L} \exp(4,5C_v) \quad (2.9)$$

$$R_L = 0,80 \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{0,49} \quad (2.10)$$

$$Eu = 4265 \quad (2.11)$$

Dois anos depois Souza (1999) utilizou outros dois tipos de meios filtrantes constituídos de partículas de bronze sintetizado, utilizando como material particulado pirocloro, propondo uma metodologia para hidrociclones filtrantes de geometria Bradley que contabilizasse os efeitos da resistência da torta e do meio poroso ao meio filtrante. Esta não mostrou ter muita influência devido à existência de forças cisalhantes dentro do equipamento. Logo hidrociclones filtrantes da geometria Bradley apresentaram maiores vazões para mesma queda de pressão e menores números de Euler em relação aos mesmos hidrociclones, sendo com paredes impermeáveis. Assim, foi obtido expressões que previram o desempenho do hidrociclone filtrante segundo a geometria Bradley.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,0640 \pm 0,0042) \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} (1 - R_L)^2 \quad (2.12)$$

$$R_L = \frac{1}{1,69 - 8,6610^{-6} (R_m D_c)^{0,5}} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{\exp(-0,69 + 1,0610^{-6} (R_m D_c)^2)} \quad (2.13)$$

$$Eu = \left( \frac{1}{\left( \frac{1}{Eu_{conv}} + (29,6 + 2,3) R_L \sqrt{\frac{8\rho}{\mu \pi^2 D_c^4}} f(R_M) \right)^2} \right) \quad (2.14)$$

$$f(R_M) = \frac{2\pi\varepsilon(L - L_1)}{R_M \ln \left( 1 + \frac{4\varepsilon}{D_c + D_{inf}} \right)} \quad (2.15)$$

$$Q = Q_{conv} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{(-\Delta P)}{\mu}} f(R_m) \quad (2.16)$$

Vieira (2001) analisou a influência do meio cônico filtrante confeccionado de bronze sinterizado em hidrociclones de geometria Rietema, no qual utilizou-se diferentes permeabilidades. Foi usado as mesmas condições experimentais de Lana *et al.* (1992) e Souza (1999). Os resultados demonstraram que as correntes de “*underflow*” foram mais diluídas, devido à razão do líquido sofrer incrementos em relação ao equipamento convencional. Constatou também que deixando as mesmas vazões de alimentação do hidrociclone convencional o hidrociclone cônico filtrante obteve um decréscimo do diâmetro de corte e por consequência, aumento da eficiência de coleta do equipamento. Também se constatou que o tamanho da parte cônica do hidrociclone influenciava diretamente no processo de filtração. As equações resultantes foram as seguintes:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,036 \pm 0,001) \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{1}{1 + (0,51 \pm 0,12) R_L} \exp(4,5 C_v) \quad (2.17)$$

$$Eu = Re^{(0,63 \pm 0,02)} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{(-0,73 \pm 0,08)} \quad (2.18)$$

$$R_L = \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{1,66 \pm 0,07} (R_m D_c)^{0,092 \pm 0,006} \quad (2.19)$$

Arruda *et al.* (2002) estudaram hidrociclones cônico filtrantes com ângulo de cone  $\theta=12,7^\circ$  da família Krebs. O desempenho dos hidrociclones filtrantes pouco modificou frente à modificação da incorporação de uma matriz filtrante em relação a uma convencional. Os números de Euler encontrados em relação aos hidrociclones filtrantes convencional de geometria Rietema e convencional foram próximos e chegaram as seguintes equações:

$$R_L = \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{0,9678} (R_m D_c)^{(-0,0450)} \quad (2.20)$$

$$Eu = Re^{(0,6064)} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{(-0,9748)} \quad (2.21)$$

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,0295 \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{1}{1 + 1,307 R_L} \exp(4,5 C_v) \quad (2.22)$$

Nos mesmos moldes experimentais de seu trabalho do ano anterior, Arruda (2003) analisou hidrociclones de geometria Demco. Foi encontrado que a inclusão de uma parede cônica filtrante não modificou expressivamente o desempenho do hidrociclone filtrante em relação a um hidrociclone convencional. Os valores do hidrociclone filtrante em relação à razão do líquido e número de Euler foram menores que os hidrociclones convencionais.

$$Q = 0,0036 D_c^{0,0072} D_a^{0,476} (D_o^2 - D_u^2)^{0,574} (L-l)^{-0,176} \mu^{0,0144} \rho^{-0,014} \Delta P^{0,418} e^{(-1,9 \cdot 10^{-5} C_v)} \quad (2.23)$$

$$R_L = 0,0477 \left( \frac{D_c}{D_o} \right)^{0,919} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{0,988} Eu^{-0,27} (R_m D_c)^{0,209} \quad (2.24)$$

$$Eu = 2408 D_c^{-1,017} \left( \frac{D_c}{D_a} \right)^{0,179} \left( \frac{D_c}{L-l} \right)^{-1,317} Re^{0,626} \exp(0,72 C_v) \quad (2.25)$$

$$d'_{50} = \frac{5,072 D_c^{1,351}}{D_c^{0,263} (L-l)^{1,251}} \left[ \frac{\mu \rho Q}{(\rho_s - \rho)} \right] \left[ \ln \left( \frac{1}{R_L} \right) \right]^{0,0373} e^{(8,438 C_v)} \quad (2.26)$$

$$Stk_{50} Eu = 0,0055 \left( \frac{D_c}{D_o} \right)^{0,0075} \left( \frac{D_c}{L-l} \right)^{-1,921} \left[ \ln \left( \frac{1}{R_L} \right) \right]^{1,417} \exp(-2,264 C_v) \quad (2.27)$$



Rodrigues *et al.* (2003) compararam os valores de eficiência total, diâmetro de corte e número de Euler para ciclones construídos com diferentes meios cônicos filtrantes tais como: tecido de polipropileno (ciclone PP), poliacrilato (ciclone PA) e poliéster (ciclone PE) e impermeável, com parte cônica feita de metal. Em cada caso, a velocidade do gás na seção de alimentação foi variada de acordo com a proposta de Massarani (1989). Os resultados mostraram que os números de Euler para os ciclones filtrantes foram sempre menores do que os do ciclone convencional, indicando filtragem com menores quedas de pressão. O número de Euler diminuiu quando a resistência do meio de filtragem diminuiu. Os diâmetros de corte obtidos para os ciclones de filtrantes foram maiores do que o ciclone convencional, indicando a menor eficiência de separação de partículas finas. Foi obtida uma equação que permite estimar os diâmetros de corte em função das propriedades do sistema sólido-gás, das condições operacionais e da resistência do meio filtrante, onde 67% da variabilidade dos dados foi explicada pela equação abaixo:

$$\frac{d_{50}}{D_c} = 0.066 \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0.5} \left( 1 + \frac{A}{(R_m D_c)^B} \right) \quad (2.28)$$

Barbosa *et al.* (2002) estudaram o efeito da filtração em hidrociclones cônicos filtrantes de famílias Bradley e Rietema com variação de diâmetros de “*underflow*” de 3, 4 e 5 mm e diâmetro da parte cilíndrica de 30 mm, no qual foram relacionados com o número de Euler e a razão do líquido. Foram construídos três cones filtrantes em bronze sinterizado para hidrociclone de geometria Rietema e dois cones de bronze sinterizado e um de polipropileno de geometria de Bradley. Os resultados demonstraram que o desempenho dos hidrociclones das famílias Bradley e Rietema é significativamente influenciado pela presença do meio filtrante. Os números de Euler dos hidrociclones de geometria Rietema sempre foram maiores do que os hidrociclones convencionais e o de geometria Bradley teve o oposto do comportamento da do hidrociclone de família Rietema obtendo uma diminuição do número de Euler em relação ao hidrociclone convencional. Os valores da razão do líquido dois das geometrias sofreram alterações em relação ao hidrociclone convencional, aumentando para o hidrociclone filtrante de geometria Rietema e diminuindo para o hidrociclone filtrante de geometria Bradley.

Vieira *et al.* (2005) comparou as performances dos hidrociclones filtrantes e convencionais de famílias Bradley e Rietema, substituindo a parede cônica por um meio filtrante. A resistência média do meio foram de  $6,5 \times 10^{11} \text{m}^{-1}$  para o de geometria Rietema e  $4,5 \times 10^{11} \text{m}^{-1}$  para o de geometria Bradley. As variáveis estudadas foram razão do líquido, vazão volumétrica de entrada e eficiência total. Os resultados demonstraram que os hidrociclones de geometrias Bradley e Rietema são significativamente influenciados pelo meio filtrante. A razão do líquido relacionada à geometria Rietema teve um incremento em relação ao hidrociclone convencional, enquanto a Bradley obteve um decréscimo. Para uma mesma pressão, houve um decréscimo da vazão volumétrica de alimentação em relação geometria Rietema, e um incremento em relação à geometria Bradley. A eficiência total do hidrociclone Rietema teve um incremento maior em relação a convencional e o de Bradley obteve um decréscimo em relação ao hidrociclone convencional.

Com o intuito de aprofundar os estudos sobre a influência da filtração a separação sólido líquido em hidrociclones filtrantes Vieira (2006) propôs um estudo de otimização desses separadores filtrantes levando em consideração as principais dimensões num hidrociclone filtrante, tais como: diâmetro de alimentação, o diâmetro de “*overflow*”, comprimento total e o ângulo do tronco do cone aplicando técnicas de fluidodinâmica computacional. Ele concluiu que os hidrociclones filtrantes proporcionaram baixos números de Euler e acréscimo na eficiência de separação das partículas.

Vieira *et al.* (2007) estudaram o comportamento dinâmico de fluido em um Hidrociclone filtrante. As simulações foram feitas em condição simétrica em relação ao eixo central, utilizando o pacote comercial FLUENT®. Os resultados indicaram que o desempenho dos hidrociclones é significativamente influenciado pelo meio de filtração. A incorporação do meio de filtro diminuiu os números de Euler e aumentou a eficiência total dos hidrociclones. Operando com a mesma taxa de fluxo de alimentação volumétrico do hidrociclone convencional, o hidrociclone filtrante mostrou uma queda de pressão menor, durante a separação sólido-líquido. Logo os hidrociclones filtrantes apresentam um número inferior de Euler e conseqüentemente é necessária pouca energia para bombear a suspensão. As simulações de CFD revelaram que a incorporação da parede de filtragem no hidrociclone reduziu o efeito

de mistura na base do cone (velocidade de rotação mais baixa do fluido). As velocidades axial, tangencial e radial foram alteradas devido ao aparecimento da corrente de filtrado, as partículas mais densas ficaram próximas à membrana porosa favorecendo sua saída pelo “underflow”. Portanto o hidrociclone filtrante teve uma maior eficiência total em relação ao hidrociclone convencional

Almeida (2008) analisou a influência do diâmetro de “underflow” e do comprimento do tubo de “overflow” na performance do hidrociclone filtrante HF11 pré-definido por Vieira (2006). Os resultados demonstraram que o número de Euler foi maior quando houve diminuição do diâmetro de “underflow” empregado, implicando que maiores diâmetros de “underflow” conduziram também maiores níveis de razões do líquido. À medida que o “vortex finder” aumentava, houve um decréscimo no número de Euler, logo o diâmetro de corte atingiu valores mínimos, ou seja, eficiências máximas.

Usando hidrociclone filtrante semelhante ao de Vieira (2006), Oliveira *et al.* (2009) investigaram as variáveis geométricas de um hidrociclone filtrante, o diâmetro “underflow” e “vortex finder”, e observaram que o desempenho dos hidrociclones é significativamente influenciado pela incorporação da estrutura da membrana cônica. Com a mesma vazão de alimentação do hidrociclone convencional, o hidrociclone cônico filtrante demonstrou decréscimo do número de Euler e, portanto, exigiu menor energia para bombear a suspensão. As simulações de CFD mostraram que a presença da membrana cônica reduziu a velocidade radial para o centro do dispositivo. A melhor condição para diâmetro de “underflow” e comprimento do “vortex finder” dependerá de funções específicas do separador, se for um classificador ou concentrador. Se a necessidade for classificação do material particulado, sugere-se a utilização de hidrociclone HF11 com diâmetro de “underflow” e “vortex finder” de 5 e 21 mm, respectivamente. Em outros termos, se a intenção for concentrar suspensões em Sólidos, os valores de 3 e 12 mm são os valores mais para  $D_u$  e  $l$ , respectivamente.

Lacerda (2007) também contribui para os estudos com os hidrociclones filtrantes estudando outros parâmetros, tais como: diâmetro de “underflow”, diâmetro do duto da saída de gás no interior do ciclone, altura da parte cônica, e o comprimento de saída. Ele adotou um meio filtrante sendo este confeccionado em polipropileno, logo, concluiu que os números de Euler para hidrociclones filtrantes foram sempre

superiores ao do convencional, e operavam com menor queda de pressão e, conseqüentemente menor consumo de energia. Os diâmetros de corte para hidrociclones filtrantes foram superiores aos convencionais, conduzindo a menor eficiência na coleta de partículas finas.

Vieira *et al.* (2010) estudaram o comportamento dinâmico de fluido em um Hidrociclone cônico filtrante. As simulações foram feitas em condição simétrica em relação ao eixo central, utilizando O FLUENT®. Os resultados indicam que o desempenho dos hidrociclones é significativamente influenciado pelo meio filtrante. A incorporação da parte cônica filtrante diminuiu o número de Euler e aumentou a eficiência total. Sobre a mesma taxa de vazão de alimentação de que um hidrociclone convencional, o hidrociclone filtrante demonstrou menor queda de pressão, durante o processo de separação, conseqüentemente um baixo número de Euler. As simulações de CFD revelaram que a incorporação da parede cônica filtrante reduziu o efeito de mistura na base do cone (velocidade de rotação mais baixa do fluido) e o arrasto de líquido e radial partículas em direção ao centro do dispositivo. Sob estas condições, um dado tamanho de partícula era mais provável que venha a chegar próximo da parede filtrante e ser recolhido na corrente de “*underflow*”. Portanto, o hidrociclone filtrante oferece maior eficiência total do que o convencional, sob as mesmas condições operacionais.

Cruz e Zanini (2010) avaliaram o desempenho de um hidrociclone pré-filtrante de partículas sólidas, oriundas dos processos erosivos e do assoreamento dos recursos hídricos. Os testes foram realizados com um hidrociclone de geometria “Rietema”, possuindo diâmetro de 19,2 cm na parte cilíndrica, operando com vazões variando entre 10 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> e 27 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>. Os materiais particulados usados em suspensão foram: solo franco-argiloso e areia de rio. Os resultados mostraram que a perda de carga máxima média foi de 52 kPa e 47 kPa para as suspensões aquosas de areia e solo, respectivamente. Seu melhor desempenho ocorreu operando com suspensão aquosa de areia, apresentando eficiência total de 92,3% para a vazão de 26,9 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>. Concluíram que o equipamento avaliado é mais eficiente para remoção de partículas de areia, podendo ser utilizado como pré-filtro em sistemas de irrigação.

Yurdem *et al.* (2010) fizeram uma análise dimensional utilizando o teorema de Buckingham. Para desenvolver esse modelo, os dados experimentais de perda de

carga de 21 filtros foram considerados no estudo. O modelo foi responsável por 96,7% da variação do coeficiente de pressão. O previsto e as perdas de carga medidos foram concordantes com um coeficiente de correlação de 98,1%. Os resultados mostraram que o modelo pode ser usado para determinar as perdas de carga nos filtros do hidrociclone, com uma precisão aceitável, se as variáveis estão dentro das gamas seguintes: diâmetro interno de entrada e saída do tubo de 0,053 a 0,154 m; diâmetro de seção cilíndrica do filtro de 0,195 a 0,46 m; diâmetro do vértice da parte cônica 0,04 a 0,06 m; comprimento seção cilíndrica do filtro 0,16 a 0,41 m; comprimento seção cônica do corpo do filtro 0,37 a 0,955 m; comprimento do “vortex finder” de 0,155 a 0,627m; taxa de fluxo de 3,7 a 98,48 m<sup>3</sup>/s; e número de Reynolds de 18860 a 42106.

Silva (2012) fez alterações geométricas no hidrociclone HF11 usado por Vieira (2006) alterando o comprimento do “*vortex finder*”, e usando um novo tipo denominado coifa: uso da rampa de alimentação e uso da alimentação helicoidal. As três configurações otimizadas foram HCOT1 com eficiência de separação de 85,5%. Hidrociclone HCOT2 com baixa razão de líquido 9,37% e HCOT# com baixo número de Euler 788 e baixa razão de líquido 5,08%. A coifa modifica o escoamento no interior do hidrociclone, confirmando as observações de WANG e Yu (2006), o número de Euler não é afetado pela alteração geométrica e a presença da coifa produziu correntes de “*underflow*” de maior vazão e menor concentração, levando as eficiências totais em torno de três pontos percentuais de diferença em relação ao hidrociclone padrão.

Façanha (2012) avaliou a influência do posicionamento da matriz porosa em diferentes seções do hidrociclone (cônica e cilíndrica) e três permeabilidades na seção cilíndrica. A presença da filtração permitiu que os equipamentos apresentassem decréscimos no número de Euler quando comparado ao equipamento convencional. Em relação a este equipamento, houve decréscimo do número de Euler em torno de 17% para o hidrociclone HCoF (hidrociclone de parte cônica filtrante e cilíndrica maciça). Já para o hidrociclone HCiF (hidrociclone de parte cilíndrica filtrante e cônica maciça), a filtração acarretou uma diminuição média de aproximadamente 22% em relação ao hidrociclone convencional. Entre os equipamentos filtrantes o número de Euler do HCiF foi em média 7% menor do que apresentado no HCoF. Nas

duas modalidades do hidrociclone filtrante (HCiF e HCoF), a retirada do filtrado fez com que os equipamentos em relação ao hidrociclone convencional tivessem decréscimos em suas razões de líquido na ordem de 7% para primeiro e 20% para o segundo. Em relação a diferentes permeabilidades aplicadas ao HCiF houve um intermediário que resultou maiores e menores valores das respostas de interesse.

Salvador *et al.* (2013) compararam o desempenho do hidrociclone HCiF (hidrociclone de parte cilíndrica filtrante e cônica maciça) e HCoF (hidrociclone de parte cônica filtrante e cilíndrica maciça), todos da geometria HF11 de Vieira (2006) para diferentes concentrações volumétricas de sólidos na alimentação (1, 2, 3 e 4%) a partir da comparação da eficiência de separação, do gasto energético e do poder de classificação do equipamento. De acordo com os principais resultados, foi possível concluir que os hidrociclones filtrantes podem tecnicamente operar com concentrações volumétricas de até 4% sem prejuízo da eficiência total e com patamares energéticos razoáveis.

Kyriakidis *et al.* (2013) deram continuidade aos trabalhos de Vieira (2006) e Façanha (2013) estudando a influência da inserção simultânea de um cilindro e cone, ambos permeáveis, sobre o desempenho energético do hidrociclone H11. A metodologia experimental foi a mesma aplicada por Vieira (2006) sendo o material particulado usado a rocha fosfática, as quedas de pressões foram 88 kPa, 118 kPa, 147 kPa, 177 kPa. Os resultados demonstraram que a filtração contribuiu para diminuição do número de Euler para o hidrociclone cônico filtrante e cilíndrico filtrante em 17% e 22%, respectivamente, nas mesmas condições operacionais que o convencional. A utilização do hidrociclone com a parte cônica e filtrante não ocasionou benefícios energéticos apresentando um incremento de 2% em relação ao convencional.

Martins *et al.* (2013) analisaram experimentalmente o efeito do diâmetro do orifício de “*underflow*” na separação de um hidrociclone filtrante com geometria de Vieira (2006) obtido pelo uso conjunto das técnicas de Evolução Diferencial e superfícies de respostas, que fornece máxima eficiência de separação. Os resultados obtidos experimentalmente com a incorporação dos três diâmetros de orifício de “*underflow*” para uma queda de pressão fixa de 1,47 bar foram analisados com base em algumas variáveis associadas ao desempenho de hidrociclone: vazão volumétrica

da alimentação, número adimensional de Euler, razão de líquido e eficiência total de separação. Com o diâmetro do orifício de “*underflow*” igual a 5 mm foram encontrados um maior valor de vazão volumétrica da alimentação. Embora o valor da vazão volumétrica de alimentação para  $D_u = 5$  mm tenha sido superior às demais vazões correspondentes aos outros valores de  $D_u$  (2,5 e 4,5 mm), observou-se que a influência de  $D_u$  na vazão de alimentação é pequena.

Salvador *et al.* (2014) verificaram que a separação de uma suspensão aquosa de concentrado de rocha fosfática por um hidrociclone filtrante ocorria devido à diferença de tamanho ou de densidade entre as partículas dessa suspensão. De acordo com as condições operacionais e os principais resultados experimentais deste trabalho foi possível constatar que as partículas de rocha fosfática não foram fragmentadas durante o processo de separação, concluindo que a separação foi realizada apenas por diferença de tamanho do material. Através do resultado do teste, verificou-se que não houve diferença significativa entre as densidades das correntes de maior concentração e diluído do hidrociclone HFOT ( $D_c = 30,0$ ;  $D_i = 6,3$ ;  $D_o = 8,1$ ;  $D_u = 2,5$ ;  $l = 12,0$ mm). A espessura da parede, a porosidade e a permeabilidade do tronco de cone eram 2,5 mm, 11,51% e  $6,67 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup> respectivamente.

Silotti *et al.* (2014) utilizaram o algoritmo de Evolução Diferencial, segundo metodologia de Silva (2012), resolveram problemas de otimização para uma determinada configuração geométrica do hidrociclone filtrante ( $D_c = 30,0$  mm;  $D_i = 6,3$  mm;  $D_o = 8,1$  mm;  $l = 12,0$  mm) e uma razão de líquido mínima, ocasionando uma alta concentração de sólidos na corrente de “*underflow*”. O hidrociclone filtrante otimizado teve uma alta concentração de sólidos na corrente de “*underflow*” associado a uma alta eficiência, porém não foi o hidrociclone de menor razão de líquido dentre os analisados, devido à restrição imposta ao diâmetro de corte no problema de otimização.

Silva *et al.* (2015) sugeriram uma geometria otimizada para um hidrociclone filtrante a fim de obter uma configuração geométrica que pudesse maximizar a eficiência total usando o algoritmo Evolução Diferencial (ED). Os efeitos do diâmetro “*underflow*” e “*vortex finder*” foram experimentalmente analisados sobre o desempenho deste novo hidrociclone filtrante encontrado a partir de planejamento experimental, no qual o hidrociclone foi denominado (FHOPT1). Os resultados

mostraram que para  $D_u / D_c = 1/6$  e  $\ell / D_c = 0,467$  eram adequados para uma maior eficiência.

Vieira *et al.* (2014) investigaram a influência do diâmetro do “*vortex finder*” em um hidrociclone cônico filtrante através de dados experimentais e simulações numéricas em CFD. As relações geométricas diâmetro do “*vortex finder*” e diâmetro do cilindro foram analisadas ( $D_o/D_c$ ): 0,19; 0,27; 0,35. Os resultados demonstraram que comparando o hidrociclone convencional com o filtrante, com mesmo diâmetro do “*vortex finder*” e condições operacionais, o hidrociclone filtrante obteve um número de Euler cerca de 16% menor que o convencional e uma eficiência total cerca de 8% maior. Portanto, maior capacidade ou menores custos de energia, bem como um maior poder de separação. Com a variação do diâmetro do “*vortex finder*”, o número de Euler foi afetado, pois diminuindo o “*vortex finder*” em 45% houve um aumento no número de Euler em 70%. O diâmetro de “*underflow*” também se relaciona com a razão do líquido, diminuindo a diâmetro de “*underflow*” em 45%, teremos um aumento na razão do líquido em 17,5% e aumento de eficiência de 10,5%, assim para melhor utilização do hidrociclone filtrante com melhor valor para diâmetro de “*underflow*”, vai depender da aplicação.

Gonçalves *et al.* (2015) compararam o desempenho de hidrociclone na sua forma convencional ( $H=228$  mm,  $h=157$  mm,  $D_c=30$  mm,  $D_i=7,8$ ,  $\ell=12$  mm) e cônico-filtrante ( $k = 9,97 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup> e  $\varepsilon = 12,68\%$ ) mediante a combinação de diferentes diâmetros de “*underflow*” (3 a 5 mm). Assim, através de ensaios experimentais, foram determinadas as respostas relacionadas ao processo de separação, tais como número de Euler, razão de líquido e eficiência total. Logo, concluíram que a filtração tem um efeito benéfico nos custos energéticos, posto que houve uma diminuição média de aproximadamente 2% no número de Euler, utilizando-se o cone filtrante, ao passo que ainda foi possível observar acréscimos médios de 38% na razão de líquido e incrementos da ordem de 5% na eficiência total do hidrociclone filtrante, se comparado ao hidrociclone filtrante.

Salvador *et al.* (2015) analisaram a presença de uma seção filtrante no hidrociclone e também a influência que a permeabilidade teria sobre o desempenho do hidrociclone de geometria otimizada por Vieira (2006). Os resultados mostraram que menores permeabilidades fornecem equipamentos com maior capacidade de



processamento. O consumo energético foi, em média, 24% menor no HCiF de menor permeabilidade se comparado ao de maior permeabilidade. A razão de líquido e a eficiência total de separação sofreram pequenas modificações devido ao uso de diferentes permeabilidades para a parede filtrante.

Salvador *et al.* (2016) estudaram um hidrociclone cilíndrico filtrante com orifício de “*underflow*” de 3, 4 e 5 mm, no qual se difere de outros por possuir uma membrana porosa na parte cilíndrica. O mesmo foi comparado com um hidrociclone convencional e cônico filtrante, no qual foi analisado a vazão volumétrica, número de Euler, razão do líquido e eficiência total. Os resultados demonstram que a incorporação de uma parede porosa na região cilíndrica do hidrociclone modificou o desempenho do equipamento. Na mesma queda de pressão, a vazão alimentação no hidrociclone cilíndrico filtrante tem um aumento em média de 6% em relação ao hidrociclone convencional de mesma geometria e condições operacionais. Isto ocorreu devido a região porosa. No entanto, este efeito foi mais significativo na parede cônica filtrante do que na cilíndrica. O número de Euler para o hidrociclone cônico poroso e cilíndrico poroso foi menor em comparação com o hidrociclone convencional sob as mesmas condições de operação. A diminuição do número de Euler foi aproximadamente de 13,4%, para o hidrociclone cilíndrico filtrante e 32,5% para o cônico filtrante. A incorporação da parede filtrante cilíndrica modificou o campo de pressão no interior do equipamento devido a corrente adicional do filtrado, bem como a velocidade tangencial do fluido no interior da hidrociclone. A razão líquido teve um acréscimo devido o aumento do diâmetro de “*underflow*”. A eficiência total do hidrociclone cilíndrico filtrante não mostrou alterações significativas em comparação com o hidrociclone convencional e cônico filtrante.

Vieira *et al.* (2016) analisaram por meio de experimentos e simulações numéricas em CFD a influência do diâmetro de entrada  $D_i$ , no desempenho de um hidrociclone cônico filtrante frente a um hidrociclone convencional. Estes dispositivos diferem entre o diâmetro de entrada e o diâmetro da secção cilíndrica ( $D_i/D_c = 0,13, 0,21$  e  $0,29$  e na parte cônica do hidrocilone filtrante por uma incorporação de uma parte porosa. Os resultados demonstraram que o hidrociclone cônico filtrante demonstrara desempenho superior ao convencional, com a mesma geometria e condições de operação. Com o mesmo diâmetro de entrada e as mesmas condições

de operação, o hidrociclone filtrante apresentou um número de Euler 11% mais baixo que o convencional e uma eficiência total de cerca de 8% maior.

Dando continuidade ao trabalho com o hidrociclone denominado HFOT, Silva (2012) e Gonçalves (2016) estudaram os efeitos lineares, quadráticos e de interação dos fatores do diâmetro do orifício de “*underflow*” de 3 a 5mm e concentração de material particulado mediante a manipulação dos efeitos faixa de 1,0 a 10,0% para a concentração volumétrica sobre o desempenho na modalidade convencional e cônico filtrante. Os resultados obtidos demonstraram que os hidrociclones HCO (Hidrociclone Concentrador Otimizado), e HCOF (Hidrociclone Concentrador Otimizado Filtrante) possuíram baixa razão de líquido e alta capacidade de processamento. A vazão alimentada esteve entre 320 e 500 cm<sup>3</sup>/s e a razão de líquido entre 0,9 e 11,0%. A diminuição do diâmetro de “*underflow*” no desempenho do HCO ocasionou um baixo número de Euler. Além de possibilitar o processamento de grande quantidade de fluido. A concentração da suspensão contendo 1,0% de sólidos em volume foi aumentada em aproximadamente 42 vezes ao utilizar o diâmetro de *underflow* de 3 mm. Nos diâmetros de 4 e 5 mm, o aumento foi de cerca de 14 e 7 vezes, respectivamente. A razão do líquido para 3 a 5 mm foi de 0,9%, 4,2% e 9,9% respectivamente e na concentração de 1,0%v. Em relação à eficiência total houve um decréscimo quando o diâmetro de “*underflow*” diminuiu, obtendo valores alcançados de eficiência de 67,2%, 66,4% e 63,1% para diâmetro de “*underflow*” de 5, 4 e 3 mm. Ainda, analisando o efeito da concentração alimentação no desempenho do hidrociclone HCO, o aumento diminuiu o consumo energético do equipamento. A vazão máxima de aproximadamente 500 cm<sup>3</sup>/s foi alcançada na condição de diâmetro de “*underflow*” de 3 mm e alimentação com 10,0% de sólidos em volume. Em comparação os hidrociclones convencionais e filtrante, uma análise estatística do efeito da filtração foi feito e revelou que a mesma não exerceu efeito significativo no desempenho do hidrociclone HCOF em relação ao HCO.

## **2.5. CÁLCULOS DAS GRANDEZAS ASSOCIADAS AO HIDROCICLONE**

Para avaliar o desempenho dos hidrociclones filtrante estudado no trabalho de Façanha (2012) os dados experimentais que serão inseridos nos capítulo 03 foram calculados nas equações abaixo, para obter respostas relacionadas com os hidrociclones como concentração volumétrica, vazões volumétricas, número de Euler,

razão do líquido, eficiência total, eficiência total reduzida, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido.

As concentrações volumétricas foram encontradas a partir das concentrações mássicas por técnicas de gravimetria e densidades do material particulado e do fluido encontradas por técnica de picnometria, de acordo com as equações a seguir.

$$C_v = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_w} - 1 \right) + 1} \quad (2.29)$$

$$C_v = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_{wu}} - 1 \right) + 1} \quad (2.30)$$

As vazões volumétricas (“underflow” e “overflow”) foram encontradas a partir das seguintes equações:

$$Q_a = \frac{W}{\rho_{susp}} \quad (2.31)$$

$$Q_u = \frac{W_u}{\rho_u} \quad (2.32)$$

$$Q_o = \frac{W_o}{\rho_o} \quad (2.33)$$

Onde densidades  $\rho_{susp}$ ,  $\rho_u$ ,  $\rho_o$  são respectivamente as equações (2.34), (2.35), (2.36).

$$\rho_{susp} = \frac{\rho}{1 - C_w \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (2.34)$$

$$\rho_u = \frac{\rho}{1 - C_{wu} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (2.35)$$

$$\rho_u = \frac{\rho}{1 - C_{wo} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (2.36)$$

É calculado a partir da vazão de alimentação a velocidade do fluido na secção cilíndrica e o número de Euler respectivamente:

$$u_c = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2.37)$$

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho \cdot u_c^2}{2}} \quad (2.38)$$

Com os sólidos que foram coletados com a corrente de “*overflow*”, foi calculado a eficiência total ( $\eta$ ) cujo valor é a razão entre a vazão mássica de sólidos do “*underflow*” e aquele presente na alimentação.

$$\eta = \frac{C_{wu} \cdot W_u}{C_w \cdot W} \quad (2.39)$$

A eficiência total reduzida ( $\eta'$ ) considera os sólidos coletados no “*underflow*” exclusivo do campo centrífugo sem levar em consideração o “efeito T”.

$$\eta' = \frac{n - R_L}{1 - R_L} \quad (2.39)$$

A razão do líquido é definida pela vazão volumétrica de líquido que parte para a corrente de “*underflow*”, é aquela que alimenta o hidrociclone, conforme a equação a seguir.

$$R_L' = \frac{(1 - C_{vi})}{(1 - C_v)} \cdot \frac{Q_u}{Q} \quad (2.40)$$

O poder de separação de um hidrociclone está relacionado com o diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e o diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ), logo são os diâmetros das partículas que são separados com eficiência granulométrica (G) e eficiência granulométrica reduzida (G') de 50%. Na eficiência granulométrica estão inclusos o efeito da separação centrífuga e divisão de correntes. Já a eficiência granulométrica apresenta somente efeito centrífugo. A equação que representa a eficiência:

$$G = \eta \frac{\frac{dX_u}{d(d_p)}}{\frac{dX}{d(d_p)}} \quad (2.41)$$

### CAPÍTULO 3 - FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A dinâmica dos fluidos computacional (ou CFD – *Computational Fluid Dynamics*) fundamenta-se em técnicas numéricas e computacionais para resolver os mais variados problemas tais como: fenômenos de transporte que envolve escoamento de fluidos, transferência de calor, transporte de massa e reações químicas, equações de conservação de grandezas físicas de interesse em um dado escoamento entre outros (Versteeg e Malalasekera, 2007). A utilização deste conjunto de ferramentas tem se destacado nos últimos anos nas indústrias, pois é crescente a busca por otimização e desenvolvimento de produtos. Com essas crescentes aplicações foram desenvolvidos vários pacotes computacionais voltados para a otimização de processos e desenvolvimento de produtos tais como: ANSYS CFX®, Fluent®, FloWorks®, dentre outros.

Existem três etapas para o processo de simulação computacional que pode ser visto na Figura 3.1, e são descritas posteriormente.

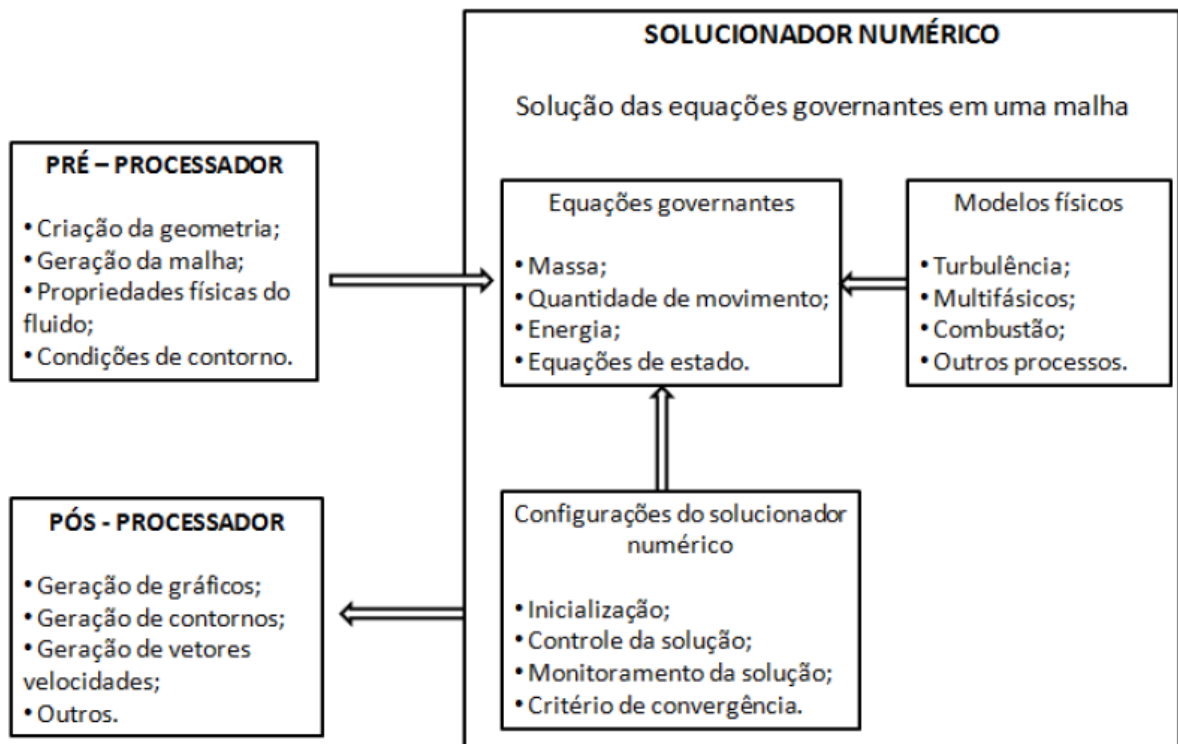


Figura 3.1: Etapas do processo de simulação em CFD. Adaptado de Tu *et al.* (2008)

- **Pré-processamento:** é criada a geometria do estudo e a partir dela é confeccionada a malha. Nesta etapa também é definido o material, as condições de contorno e inicial, regime de operação, inserção de pontos de monitoramento e definição de esquemas numéricos.
- **Solução numérica (Solver):** é realizado os cálculos sobre a malha, segundo os métodos numéricos escolhidos.
- **Pós-Processamento:** É nesta etapa aonde são analisados os resultados.

### **3.1. EQUACIONAMENTO DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.**

O modelo matemático serve para descrever o escoamento de um sistema de equações diferenciais e parciais (conservação de massa e da quantidade de movimento linear) denominadas equações de Navier-Stokes aplicadas para cada fase do escoamento.

#### **3.1.1. ABORDAGEM EULERIANA – LAGRANGEANA**

Na abordagem Euleriana-Lagrangeana, a fase líquida é tratada como contínua e resolvida pelas equações de Navier-Stokes. A fase dispersa é resolvida pelo acompanhamento da trajetória de um determinado número de partículas através do campo de escoamento contínuo. O acompanhamento das partículas é realizado através da formação de um conjunto de equações diferenciais ordinárias no tempo, para cada partícula, e levam em consideração sua posição, velocidade, temperatura e massa (Tavares, 2012).

Em outras palavras a abordagem Euleriana-Lagrangeana resolve um sistema de equações de conservação (massa, quantidade de movimento, energia, etc.) para a fase contínua e, com os campos de velocidades desta fase, são calculadas as forças exercidas sobre as partículas dispersas (bolhas, gotas ou partículas sólidas). A partir das equações são calculadas as trajetórias destas partículas. A principal limitação deste modelo é que este é restrito a escoamentos dispersos e com baixas frações volumétricas das fases dispersas, já que serão necessárias tantas equações quanto o número de partículas presentes no domínio (Silva, 2003; Paladino, 2005).

### 3.1.2. EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE MASSA

As equações governantes para escoamento multifásico.

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{\alpha}\rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (f_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (3.1)$$

Onde:

$\alpha$  e  $\beta$ : representam as fases envolvidas na mistura bifásica.

$f, \rho$  e  $\vec{U}$ : são a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade.

Na fase  $\alpha$ , o vetor velocidade é dado por:  $\vec{U} = (x, y, z)$ .

$S_{MS\alpha}$ : é o termo de fonte de massa.

$\Gamma_{\alpha\beta}$ : é o termo de difusividade mássica na interface bifásica das fases  $\alpha$  e  $\beta$  envolvidas.

### 3.1.3. EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A equação de momento linear para o escoamento multifásico é definida por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}) + \nabla \cdot [f_{\alpha}(\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha} \otimes \vec{U}_{\alpha})] = & -f_{\alpha}\nabla p_{\alpha} + \nabla \cdot \left\{ f_{\alpha}\mu_{\alpha} \left[ \nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T \right] \right\} + \\ + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha}^- \vec{U}_{\alpha}) + S_{M\alpha} + M_{\alpha} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Onde:

$P$ : é a pressão.

$S_{MS\alpha}$ : representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume.

$\Gamma_{\alpha\beta}^+$ : Corresponde à taxa de fluxo mássico por unidade de volume da fase  $\beta$  para a fase  $\alpha$ .



$M_\alpha$  : descreve a força total por unidade de volume (forças de arraste interfacial, de sustentação, de lubrificação de parede, de massa virtual e de dispersão turbulenta) sobre a fase  $\alpha$  devido à interação com a fase  $\beta$  .

O termo  $\sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha)$  representa a transferência de momento induzida pela transferência de massa na interface.

A força total da fase  $\alpha$  , com a interação com outras fases é dada por:

$$M_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} M_{\alpha\beta} \quad (3.3)$$

O somatório das forças interfaciais entre duas fases é decorrente de efeitos físicos independentes como definido por:

$$M_{\alpha\beta} = M_{\alpha\beta}^D + M_{\alpha\beta}^L + M_{\alpha\beta}^{LUB} + M_{\alpha\beta}^{VM} + M_{\alpha\beta}^{TD} + M_S \quad (3.4)$$

Onde os índices D, L, Lub, VM, TD e S representam a força de arraste (*drag force*), força de sustentação (*lift force*), força de lubrificação da parede (*wall lubrication force*), força de massa virtual (*virtual mass force*), força de dispersão turbulenta (*turbulence dispersion force*) e força de pressão do sólido (*solid pressure force*), respectivamente.

### 3.2. MODELOS DE TURBULÊNCIA

Em problemas que envolvem a presença da turbulência, uma variável tem a sua medida instantânea composta pela soma de duas componentes. A primeira representa a média temporal e a segunda representa a flutuação turbulenta, conforme apresentado na Equação 3.5, onde M é uma variável qualquer.

$$M(t) = \vec{M} + M' \quad (3.5)$$

Escolhendo a energia cinética turbulenta por unidade de massa,  $k$  , baseada nas flutuações do vetor velocidade, como a base da escala de velocidade (Equação 3.6).

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} = \frac{1}{2} (\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}) \quad (3.6)$$

A aplicação da média temporal na equação de Navier-Stokes para um escoamento monofásico, Equação 3.7 e Equação 3.8, mostradas abaixo.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot [\rho (\vec{U} \otimes \vec{U})] = \nabla P + \nabla \left[ \mu (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) \right] + S_M \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \nabla \cdot [\rho (\bar{u}_i \otimes \bar{u}_i)] = \nabla P + \nabla \left[ \mu (\nabla \bar{u}_i + (\nabla \bar{u}_i)^T) - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] + S_M \quad (3.8)$$

Na Equação 3.8, o termo  $\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ , conhecido como tensor de Reynolds, resolução requer equações adicionais. Basicamente, há duas abordagens para se modelar as tensões de Reynolds:

- O conceito de viscosidade turbulenta;
- A modelagem de equação de transporte do tensor de Reynolds.

A primeira relaciona as contribuições da turbulência, na transferência de quantidade de movimento linear, à taxa de deformação do escoamento médio, por meio de uma viscosidade adicional, a viscosidade turbulenta. Esta hipótese origina um ramo da modelagem conhecido como modelos de viscosidade turbulenta.

A segunda técnica, também conhecida como o modelo de fechamento de momento de segunda ordem, o fluxo extra da quantidade de movimento é dado diretamente pela solução das equações de transporte. Porém, devido ao problema de fechamento de turbulência, há a necessidade de uma equação para a quantidade geradora de escala de comprimento. O resultado é um conjunto de equações diferenciais parciais para as tensões de Reynolds.

Pode-se determinar  $\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$  pela seguinte equação:

$$\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \rho k + \mu \frac{U_k}{\partial x_k} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

$$\mu_t = C_u \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

Onde:

$\mu_t$  : viscosidade turbulenta.

$C_u$  : constante empírica.

$\rho$  : densidade.

$k$  : energia cinética turbulenta.

$\varepsilon$  : dissipação turbulenta.

### 3.2.1. MODELO DE TURBULÊNCIA (k-ε)

O Modelo k-ε é um dos modelos de turbulência mais usados, é um modelo de duas equações, pois para encontrar as tensões de Reynolds é necessário determinar a viscosidade turbulenta. Assim, é necessário resolver duas equações de transporte adicionais para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Isto permite que neste modelo de duas equações a viscosidade seja afetada, por efeitos de convecção, difusão de energia turbulenta e sua dissipação. (Verardi, 2008; Cunha, 2014).

De acordo com Farias Neto *et al.* (2013) emprega como equação de fechamento:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (3.11)$$

Onde:

$\mu_{ef}$  : viscosidade efetiva

$\mu$  : viscosidade dinâmica

$\mu_t$  : viscosidade turbulenta

Neste tipo de modelo k-ε tem-se a viscosidade turbulenta que relaciona a energia cinética turbulenta (k), e a dissipação turbulenta (ε), relacionada com a equação:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Os Valores de k-ε são obtidos:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.14)$$

Onde:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1.13$$

O termo P<sub>k</sub> que está nas equações (3.13) e (3.14) representa a parcela de produção de energia cinética turbulenta:

$$P_k = \mu_t \nabla \vec{U} \left[ \nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \vec{U} (3\mu_t \nabla \vec{U} + \rho k) + P_{kb} \quad (3.15)$$

Onde:

P<sub>kb</sub>: Representa a influência das forças de flutuação.

### 3.2.2. MODELO DE TURBULÊNCIA (k-ω)

Este tipo de modelo resolve duas equações de transporte, uma para energia cinética da turbulência k e outra para a frequência da turbulência ω. O Tensor tensão é computado a partir do conceito de viscosidade turbulenta.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \varpi \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial(\rho\overline{\omega})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\overline{\omega}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla k \right] + \alpha \frac{\overline{\omega}}{k} P_k - \beta \rho \overline{\omega}^2 \quad (3.17)$$

Onde:  $\vec{U}$  vetor velocidade

$\rho$ : Massa específica

$\mu$ : Viscosidade molecular

$\mu_t$ : Viscosidade turbulenta

$P_k$ : Representa a parcela de produção de energia cinética

A viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\overline{\omega}} \quad (3.18)$$

As constantes de fechamento para o modelo são:

$$\beta' = 0,09; \alpha = \frac{5}{9}, \beta = \frac{3}{40}, \sigma_k = 2 \text{ e } \sigma_\omega = 2$$

A vantagem do modelo k- $\omega$  em relação ao modelo k- $\epsilon$  é o tratamento próximo à parede, para escoamentos com um alto número de Reynolds, assim obtém-se melhores resultados.

### 3.2.3. MODELO DE TURBULÊNCIA SST (SHEAR STRESS TRANSPORT).

O modelo de turbulência SST proposto por Menter (1994) é um modelo do tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) e utiliza o equacionamento de dois outros modelos, k- $\epsilon$  e o k- $\omega$ . Sua formulação se dá de forma bem simplificada. Na região externa do escoamento se usa a formulação do robusto modelo k- $\epsilon$ , e onde esse se mostra pouco eficiente, na região próxima à parede, utilizam-se as equações de transporte do modelo k- $\omega$  (Martins *et al.*, 2007; Cunha, 2014)

O modelo SST funciona da seguinte forma: na região externa do escoamento se usa a formulação do modelo k- $\epsilon$ , e onde se mostra pouco eficiente, na região próxima à parede, utilizam-se as equações de transporte k- $\omega$ . Isto consiste

transformação do modelo k-ε em k-ω e vice-versa, multiplicado por uma função de combinação (Blend). São duas as equações de transporte do modelo SST, sendo uma a equação da energia cinética turbulenta (k) (Cunha, 2014). A Equação 3.19 e a taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta (ω) Equação 3.20, conforme equações abaixo:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \nabla \omega \right] + \\ (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega + \alpha_2 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_2 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Onde:

$$F_1 = \tanh(\arg_1) \quad (3.21)$$

$$\arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y'}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right] \quad (3.22)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega, 1,0 \times 10^{-10} \right) \quad (3.23)$$

Em que y é a distância próxima à parede e ν é a viscosidade cinemática. As constantes são dadas por:

$$\alpha_2 = 0,44; \beta_2 = 0,0828; \sigma_{k2} = 1; \sigma_{\omega 2} = \frac{1}{0,856}$$

O comportamento do transporte pode ser obtido por um limitador à formulação da viscosidade turbulenta:

$$v_i = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \varpi, SF_2)}, \quad (3.24)$$

$$v_i = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (3.25)$$

Onde:

$F_2$ : é uma função de combinação (Blend) semelhante a  $F_1$  que determina o limite da parede à camada limite.

$S$ : é uma medida invariante do tensor taxa de deformação.

As funções de combinação são críticas para o sucesso do método. Sua formulação é baseada na distância próxima a superfície e sobre as variáveis do escoamento.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.26)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \varpi y}, \frac{500v}{y^2 \varpi}\right) \quad (3.27)$$

As funções de combinações têm como características a delimitação das zonas onde cada modelo irá atuar. A partir dos valores encontrados para as funções, o modelo muda a formulação nas equações de transporte, onde a função de combinação  $F_1$  é responsável pela troca de modelos nas equações de transporte  $\omega$  e  $k$  pela determinação das constantes do modelo e  $F_2$  é responsável pela troca dos modelos na formulação viscosidade turbulenta (Noletto, 2006; Martins *et al.* 2013; Cunha, 2014). Comparando o modelo  $k$ - $\omega$  padrão, o modelo SST tem demonstrado ter uma redução substancial com relação à dependência nas condições de contorno de corrente livre. Este modelo tem obtido bons resultados principalmente devido à sua relação modificada da viscosidade turbulenta para os fluxos que envolvem gradientes de pressão adversos e separação, (Menter, 1994).

## CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

As simulações numéricas foram realizadas empregando o programa Ansys CFX 15.0. Foram simulados junto ao Laboratório LCTF (Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos) na Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

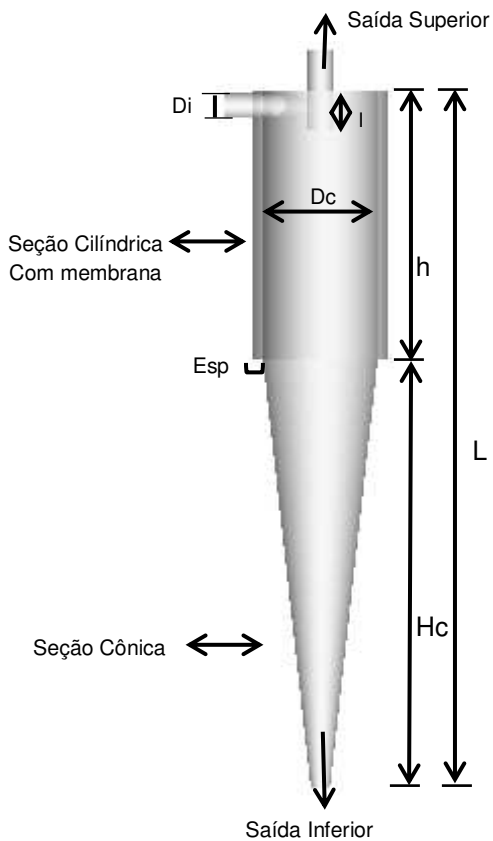
### 4.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O hidrociclone estudado é baseado no trabalho de Façanha (2012) e é constituído por uma matriz porosa na parte cilíndrica e uma impermeável na parte cônica denominado hidrociclone cilíndrico filtrante. Este hidrociclone tem as mesmas dimensões do hidrociclone convencional conforme Figura 4.1.



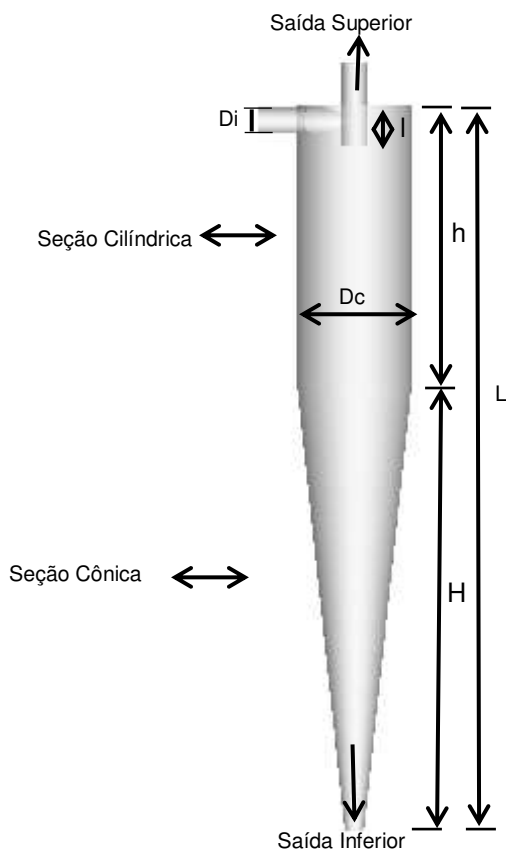
Figura 4.1: (a) Hidrociclone convencional (Hcon), (b) hidrociclone cilíndrico filtrante (HciF). Adaptado de Façanha (2012).





Diâmetro de entrada (mm)	$D_i$	7,8
Diâmetro inferior (mm)	$D_u$	5
Diâmetro do cilindro (mm)	$D_c$	30
Diâmetro superior (mm)	$D_o$	6,6
Comprimento do "vortex finder" (mm)	$l$	12
Altura do cilindro (mm)	$h$	80
Altura do cone (mm)	$H$	127
Comprimento Total (mm)	$L$	207
Espessura da Membrana (mm)	$Esp$	2,5

Figura 4.2: Representação do hidrociclone cilíndrico filtrante (HciF) e dimensões.



Diâmetro de entrada (mm)	$D_i$	7,8
Diâmetro inferior (mm)	$D_u$	5
Diâmetro do cilindro (mm)	$D_c$	30
Diâmetro superior (mm)	$D_o$	6,6
Comprimento do "vortex finder" (mm)	$l$	12
Altura do cilindro (mm)	$h$	80
Altura do cone (mm)	$H$	127
Comprimento Total (mm)	$L$	207

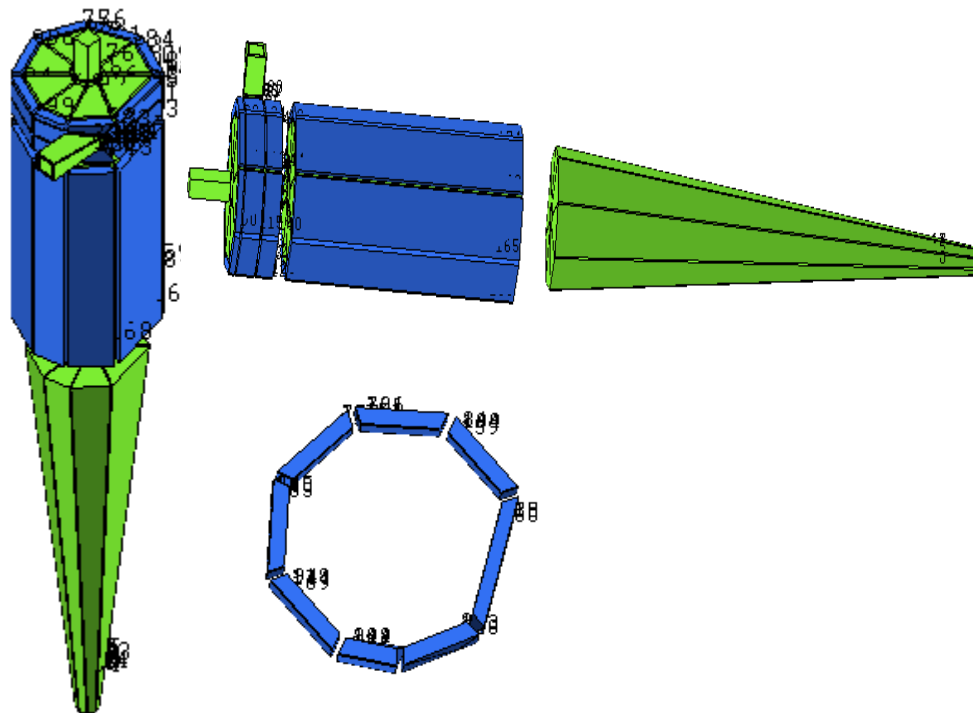
Figura 4.3: Representação do hidrociclone convencional (Hcon) e dimensões.

## 4.2. MALHA NÚMERICA

A geração da malha referente a cada um dos hidrociclones foi feita seguindo as seguintes etapas:

- Definição de um conjunto de pontos e curvas para representar a geometria;
- Escolha de um conjunto de blocos por meio de divisão, junção, definições de borda, modificações das faces e movimentos nos vértices;
- Verificação da qualidade dos blocos para assegurar que a blocagem gerasse uma malha de boa qualidade;
- Averiguação da qualidade da malha.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 estão representadas a blocagem adotada para a confecção das usadas nas simulações dos diferentes casos estudados.



4.4: Representação da blocagem: hidrociclone cilíndrico filtrante.

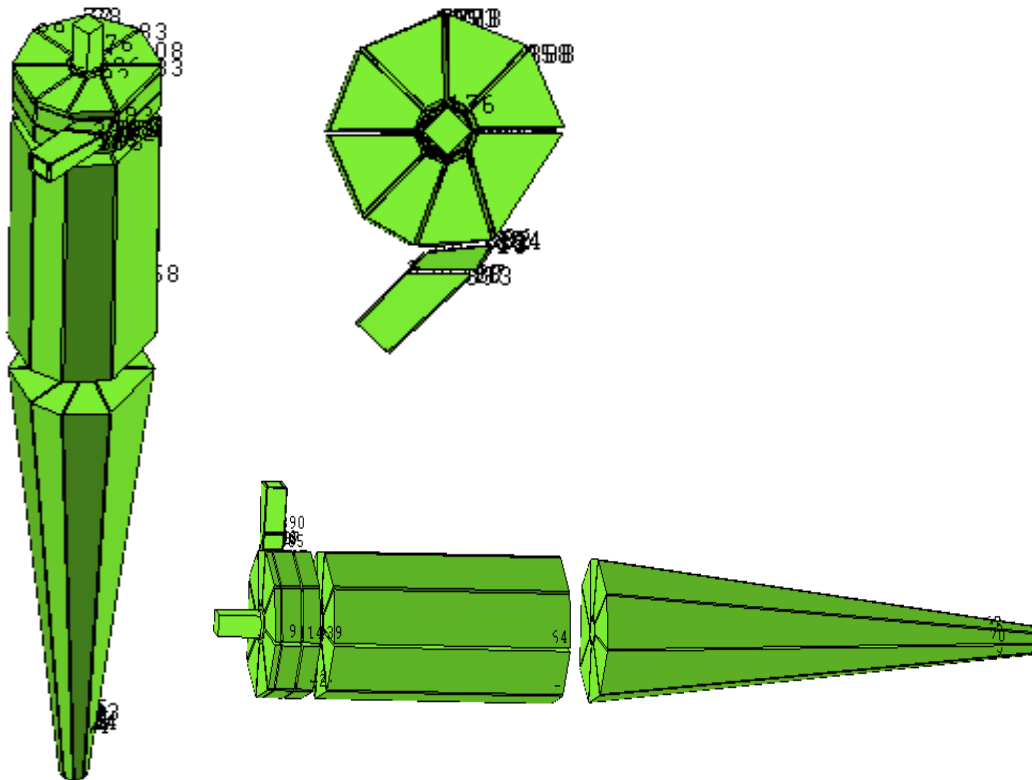


Figura 4.5: Representação da blocagem: hidrociclone convencional.

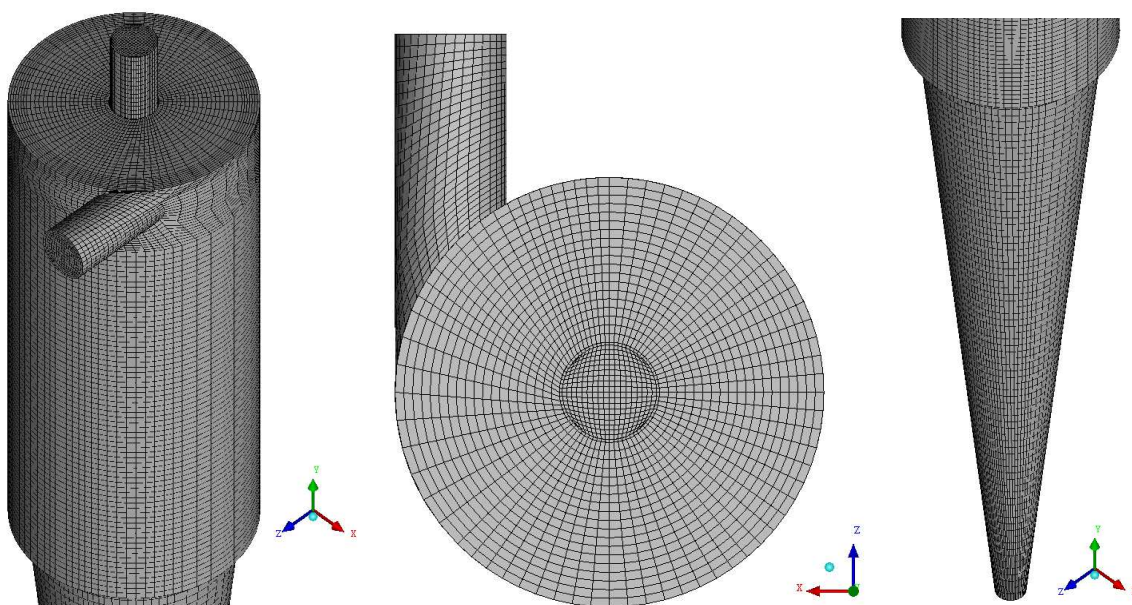


Figura 4.6: Representação da malha: hidrociclone cilíndrico filtrante.

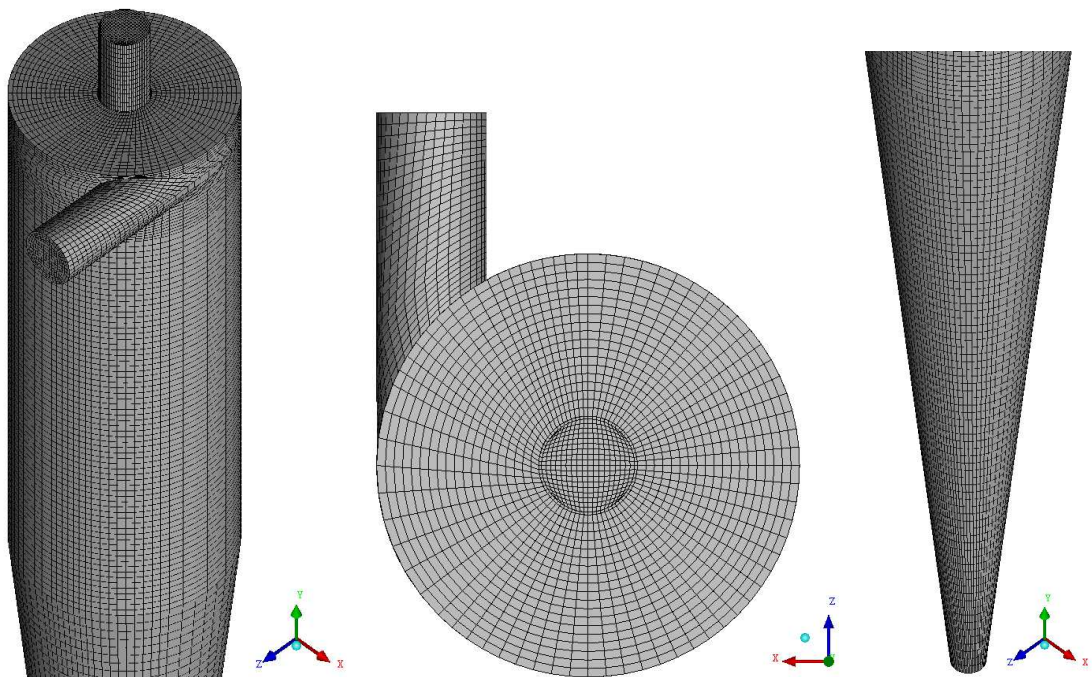


Figura 4.7: Representação da malha: hidrociclone convencional.

Foram geradas três malhas com diferentes densidades de volumes de controle (elementos) para realizar o estudo de dependência da malha. Assim realizou-se um estudo de dependência da malha em uma máquina com configuração core i7-6500, 64 bits, 8Gb de RAM e 3,40Ghz, para que se escolha a malha adequada levando-se igualmente em consideração o esforço computacional. O número de elementos e nós de cada malha estão mencionados na Tabela 4.1

TABELA 4.1 Malhas numéricas.

Nome	Número de elementos	Número de nós
Malha - 01	430.893	405.614
Malha - 02	664.463	630.643
Malha - 03	840.341	801.852

Na Figura 4.8 estão representadas as arestas dos blocos responsáveis pelo refinamento da malha. Os valores do número de divisões de cada aresta estão representados pela Tabela 4.2.

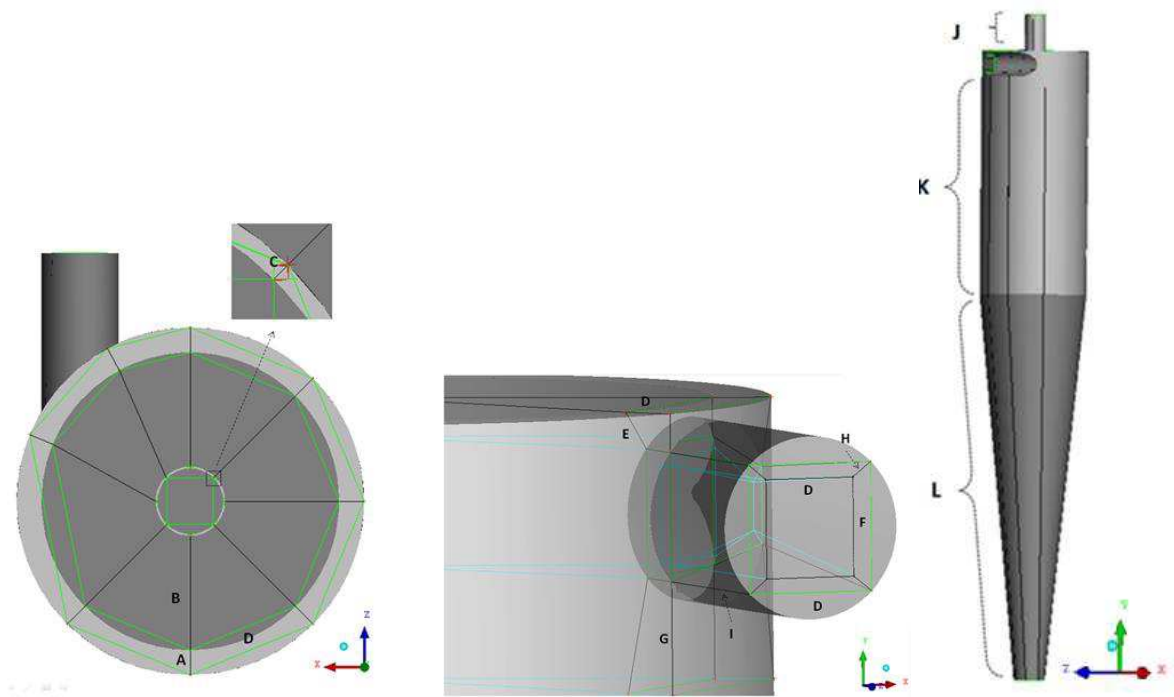


Figura 4.8: Linhas “arestas” para construção das malhas conforme Tabela 4.2.

TABELA 4.2: Numero de divisões sobre as arestas usadas no refinamento da malha

Nós											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
8	20	2	12	5	10	10	5	20	16	70	80
10	22	3	12	7	12	12	7	22	18	70	87
12	24	4	14	9	14	14	9	24	20	72	92

### 4.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático usado para descrever o comportamento do processo de separação no hidrociclone convencional e filtrante é baseado na abordagem euleriana-euleriana. Para cada uma das situações foram adotadas algumas considerações que possibilitam resolver as equações de conservação de massa e as de momento linear.

#### 4.3.1. HIDROCICLONE CONVENCIONAL - HCON

- Considerou-se a água como a fase contínua e partícula sólida como a fase dispersa;

- As partículas foram consideradas esféricas com diâmetro de  $9,34 \mu m$ ;
- Regime permanente com propriedades físicas e químicas constantes;
- escoamento incompressível e isotérmico;
- Não há fonte de massa,  $S_{MS,\alpha} = 0$ ;
- Superfícies lisas das paredes do hidrociclone;
- Não há transferência de massa interfacial.

Com estas considerações as equações de conservação de massa e do momento linear para o escoamento bifásico reduzem -se:

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] - f_\alpha \nabla p_\alpha + \left\{ f_\alpha \mu_\alpha \left[ \nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + M_\alpha + \rho \vec{g} \quad (4.2)$$

com  $M_\alpha$  definido por:

$$M_\alpha = \frac{3C_d}{4d_p} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (4.3)$$

Com  $C_d$  determinando usando o modelo de Schiller-Naumann.

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad (4.4)$$

O modelo de turbulência para a fase contínua (água) usado é o “Shear Stress Transport” com as considerações reduz-se a:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \varpi \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \vec{U} \bar{\omega}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \nabla \bar{\omega} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \bar{\omega}} \nabla k \nabla \bar{\omega} \\ + \alpha_2 \frac{\bar{\omega}}{k} P_k - \beta_2 \rho \bar{\omega}^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Para a fase dispersa foi adotado o modelo zero equação dispersa, definida pela Equação (4.7).

$$\mu_{t,d} = \left( \frac{\rho_d}{\rho_c} \right) \frac{\mu_{t,c}}{\sigma} \quad (4.7)$$

#### 4.3.2. HIDROCICLONE CILÍNDRICO FILTRANTE (HciF).

Além das considerações adotadas na seção anterior, para tal situação foi adotada um meio poroso com porosidade e permeabilidade distribuídas uniformemente no meio poroso (aproximação) da secção cilíndrica do hidrociclone filtrante:

As equações que descrevem o escoamento multifásico na membrana cilíndrica:

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (4.8)$$

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] - f_\alpha \nabla p_\alpha + \left\{ f_\alpha \mu_e \left[ \nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + M_\alpha + \rho \vec{g} \quad (4.9)$$

As equações de conservação do escoamento multifásico para a membrana cilíndrica:

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha K \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (4.10)$$

Onde:  $K = (K^{ij})$  é um tensor simétrico de segunda ordem, chamado de tensor permeabilidade.

$$\nabla \cdot [f_\alpha \rho_\alpha (K \cdot \vec{U}) \otimes \vec{U}] - \nabla p + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_e K \cdot \left[ \nabla U + (\nabla U)_i^T \right] \right\} + S_i^M \quad (4.11)$$

Onde  $\mu_e$  é a viscosidade efetiva definida pela equação:

$$\mu_e = \mu_\alpha + \mu_t \quad (4.12)$$

Onde  $\mu_\alpha$  é a viscosidade dinâmica e  $\mu_t$  viscosidade turbulenta.

#### 4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

##### 4.4.1. NA ENTRADA

Na seção referente à entrada de alimentação foram apresentados os valores das vazões volumétricas de entradas no hidrociclone filtrante, estas disponibilizadas nas tabelas de 4.6 a 4.10.

##### 4.4.2. NAS PAREDES

Nesta fronteira utilizou-se diferentes tipos de condições de contornos dependendo da variável a ser analisada.

Para as fases fluidas, utilizou-se condições de parede de não deslizamento que no caso é a condição onde o fluido próximo a parede assume velocidade nula. Assim por definição:

$$\vec{U}_\alpha = 0 \quad (4.13)$$

Onde:  $\vec{U}_\alpha$ : o vetor velocidade da fase água.

Para a fase particulada utilizou-se uma condição de deslizamento livre que é utilizada quando a tensão de cisalhamento na parede é zero, e a velocidade do fluido próxima a parede não é reduzida pelo efeito da fricção. É dada por:

$$\frac{\partial u_s}{\partial r} = \frac{\partial v_s}{\partial r} = \frac{\partial w_s}{\partial r} = 0 \quad (4.14)$$

onde  $u_s$ ,  $v_s$  e  $w_s$  são as componentes do vetor velocidade da fase sólida.

##### 4.4.3. NAS SAÍDAS

Nas seções de saídas superior e inferior foi prescrita uma pressão estática média “Average Static Pressure” e igual à pressão atmosférica.



As propriedades físico-químicas para a fase líquida e sólida para a temperatura ambiente de 293,15 K utilizadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 4.3 e 4.4:

Tabela 4.3: Propriedades físicas do fluido e partícula sólida do trabalho em estudo.

Propriedades		Fluido	
		Água	Partícula sólida
Densidade	(Kg/m <sup>3</sup> )	997	2860
Viscosidade	(Pa.s)	8,889×10 <sup>-4</sup>	
Massa molecular	(g/mol)	18,05	
Tensão superficial	(N/m)	0,01	

Fonte: Façanha (2012).

Tabela 4.4: Valores de permeabilidade e porosidade

	Permeabilidade $k \times 10^{-16}$ [m <sup>2</sup> ]		Porosidade [-]
K <sub>1</sub>	1,71	ε <sub>1</sub>	0,138
K <sub>2</sub>	2,95	ε <sub>2</sub>	0,129
K <sub>3</sub>	3,60	ε <sub>2</sub>	0,143

Fonte: Adaptado de Façanha (2012).

## 4.5. CÁLCULOS DOS VALORES NUMÉRICOS.

### 4.5.1. QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão ( $\Delta P$ ) é calculada levando em consideração a pressão na entrada e na saída superior ou “overflow”;

$$\Delta P = P_{\text{entrada}} - P_{\text{overflow}} \quad (4.15)$$

### 4.5.2. VAZÃO DE FILTRADO.

A vazão de filtrado é calculada pela razão da fração vazão mássica do fluido pela densidade da água, dada por:

$$Q_F = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{água}}} \quad (4.16)$$

### 4.5.3. NÚMERO DE EULER

O número de Euler foi calculado com auxílio de plano de secção transversal ZX e posição  $y = 165 \text{ mm}$  no interior do hidrociclone (Figura 4.10). Sobre este plano foi determinado a vazão mássica.

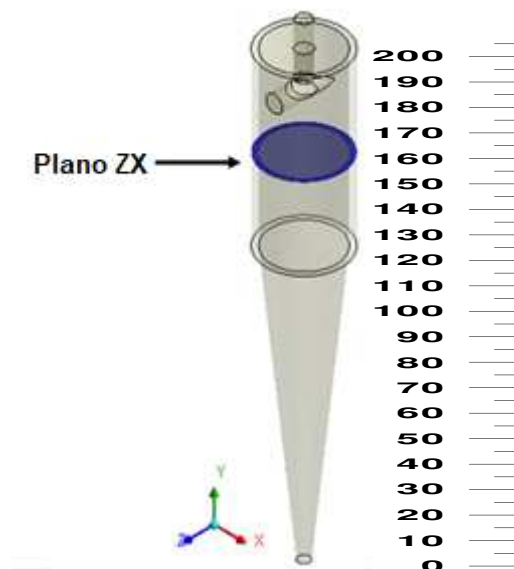


Figura 4.10: Representação do plano no interior do hidrociclone no ZX na altura  $y = 0,165 \text{ mm}$ .

Com o valor da vazão mássica no plano foi então determinado o número de Euler a partir da seguinte equação:

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (4.17)$$

Onde:

$$u_c = \frac{4\dot{m}}{\pi\rho_{\text{água}}D_C^2} \quad (4.18)$$

#### 4.5.4. RAZÃO DO LÍQUIDO

A razão do líquido foi calculada a partir das vazões volumétricas de entrada  $Q_a$  e da saída inferior (“*underflow*”)  $Q_u$ , definida por:

$$R_L = 1 - \frac{Q_u}{Q_a} \quad (4.19)$$

#### 4.5.5. EFICIÊNCIA TOTAL

A eficiência total foi calculada com as vazões mássicas de entrada  $W_a$  e da saída inferior (“*underflow*”)  $W_u$ , definida por:

$$\eta = \frac{W_u}{W_a} \quad (4.20)$$

#### 4.6. CASOS ESTUDADOS

Para a análise da dinâmica de escoamento no hidrociclone com meio filtrante cilíndrico foi avaliado o caso ilustrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Caso estudado para dinâmica no interior do hidrociclone

Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
	Continua	Dispersa		
295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,138

Fonte: Adaptado de Façanha (2012)

Nas Tabelas 4.6 a 4.8 ilustram-se os casos adotados no estudo da influência da vazão para os três meios filtrantes diferentes, permeabilidade e porosidades específicas.

Tabela 4.6: Casos estudados – HciF<sub>(K1- ε1)</sub>

Caso	Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
		Continua	Dispersa		
01	295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,129
02	329,6	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,129
03	352,2	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,129
04	373,2	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,129

Fonte: Adaptado de Façanha (2012)..

Tabela 4.7: Casos estudados – HciF<sub>(K2- ε2)</sub>

Caso	Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
		Continua	Dispersa		
05	311	0,9	0,1	2,95 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
06	346	0,9	0,1	2,95 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
07	376	0,9	0,1	2,95 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
08	406	0,9	0,1	2,95 x 10 <sup>-16</sup>	0,138

Fonte: Adaptado de Façanha (2012).

Tabela 4.8: Casos estudados – HciF<sub>(K3- ε3)</sub>

Caso	Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
		Continua	Dispersa		
09	266	0,9	0,1	3,60 x 10 <sup>-16</sup>	0,143
10	293	0,9	0,1	3,60 x 10 <sup>-16</sup>	0,143
11	311	0,9	0,1	3,60 x 10 <sup>-16</sup>	0,143
12	333	0,9	0,1	3,60 x 10 <sup>-16</sup>	0,143

Fonte: Fonte: Adaptado de Façanha (2012).

Para avaliar o efeito da porosidade do meio filtrante com forma cilíndrica foram avaliados os seguintes casos ilustrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Casos estudados para avaliação do efeito da porosidade no hidrociclone cilíndrico filtrante

Caso	Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
		Continua	Dispersa		
13	295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
14	295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,129
15	295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,143

Fonte: Adaptado de Façanha (2012).

Para analisar a influência da permeabilidade do hidrociclone com meio filtrante cilíndrico estão representados os casos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Casos estudados para avaliação do efeito da permeabilidade no hidrociclone cilíndrico filtrante

Caso	Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade $k \cdot 10^{-16}$ [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
		Continua	Dispersa		
16	295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
17	295,7	0,9	0,1	2,95 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
18	295,7	0,9	0,1	3,60 x 10 <sup>-16</sup>	0,138

Fonte: Adaptado de Façanha (2012).

Para análise do efeito da posição do meio filtrante foram analisados dois casos. O primeiro com meio filtrante cilíndrico e o segundo com meio cilíndrico impermeável conforme Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Casos estudados para avaliação da posição do meio filtrante

Caso	Vazão Volumétrica (cm <sup>3</sup> /s)	Fração volumétrica da fase		Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]	Porosidade
		Continua	Dispersa		
19	295,7	0,9	0,1	1,71 x 10 <sup>-16</sup>	0,138
20	295,7	0,9	0,1	[-]	[-]

Fonte: Adaptado de Façanha (2012).

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. AVALIAÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA MALHA NUMÉRICA

A malha criada para o presente estudo é um dos agentes responsáveis pela qualidade dos resultados numéricos, nos quais estes devem ser independentes da densidade de elementos, da relação entre o tamanho de cada elemento com o elemento de referência (fator de expansão), quantidade de elementos tetraédricos e/ou hexaédricos, refinamento da malha, entre outros. Uma malha não adequada a um estudo ocasiona impacto negativo sobre a precisão da solução, o tempo de simulação requerido, a taxa de convergência (ou divergência) dos resultados, e outros.

O caso estudado para dependência da malha foi o caso relacionado ao hidrociclone cilíndrico filtrante  $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$  de permeabilidade  $1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  e porosidade 0,138. As condições de simulação foram a construção de duas linhas  $y = 150 \text{ mm}$  e  $y = 80 \text{ mm}$  (Uma linha na parte cilíndrica e outra na parte cônica), a Figura 5.1, no qual foi abordada a velocidade do fluido nas três malhas construídas conforme tabela 5.1. Na figura 5.2 observa-se que as malhas 1,2,3 possuem o mesmo comportamento relacionado com a velocidade do fluido, ou seja, as malhas construídas não interferem na obtenção dos resultados mantendo-os inalterados. Na Figura 5.1 estão representados a velocidade do fluido da posição  $z$  nas posições  $y$  iguais a (a)  $150 \text{ mm}$  e (b)  $80 \text{ mm}$  respectivamente para os três refinamentos da malha. Observa-se que os perfis de velocidade apresentam comportamentos semelhantes indicando que não são afetados pelo refinamento da malha. Logo, escolheu-se a malha 02 para as simulações, por ter um grau de refinamento intermediário entre as malhas estudadas.

TABELA 5.1: Influência da malha sobre os resultados numéricos

Nome	Número de elementos	Número de nós	Convergência atingida	Interações	Tempo
Malha - 01	430893	405614	1E-5	3461	1 dia 12h 52min 3,4s
Malha - 02	664463	630643	1E-5	3465	1 dia 23h 55min 31s
Malha - 03	840341	801852	1E-5	3466	2 dias 10h 14min 33,8s

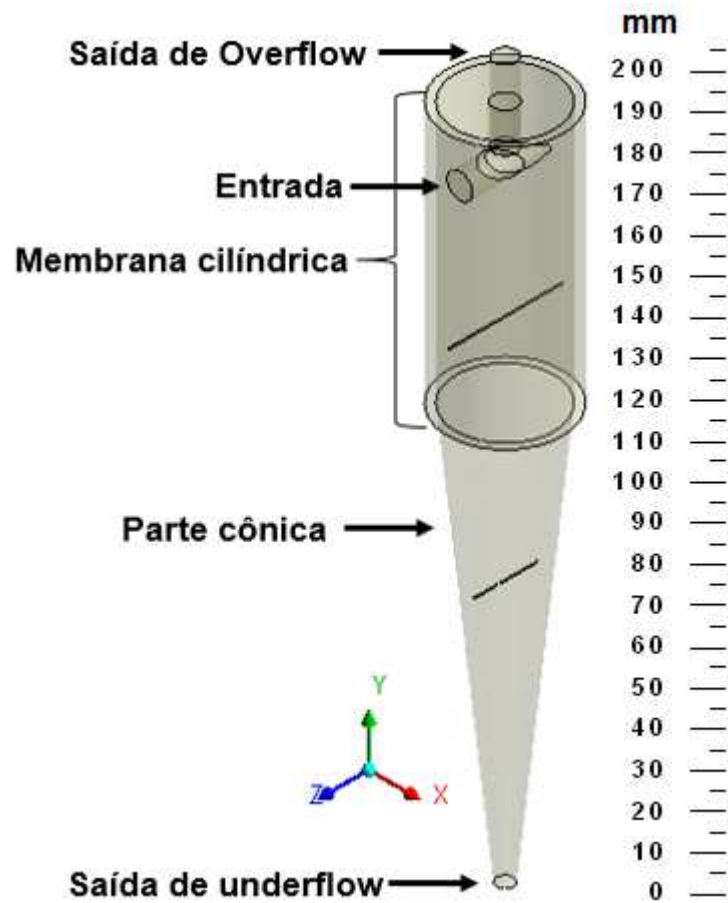


Figura 5.1: Hidrociclone com meio filtrante cilíndrico.

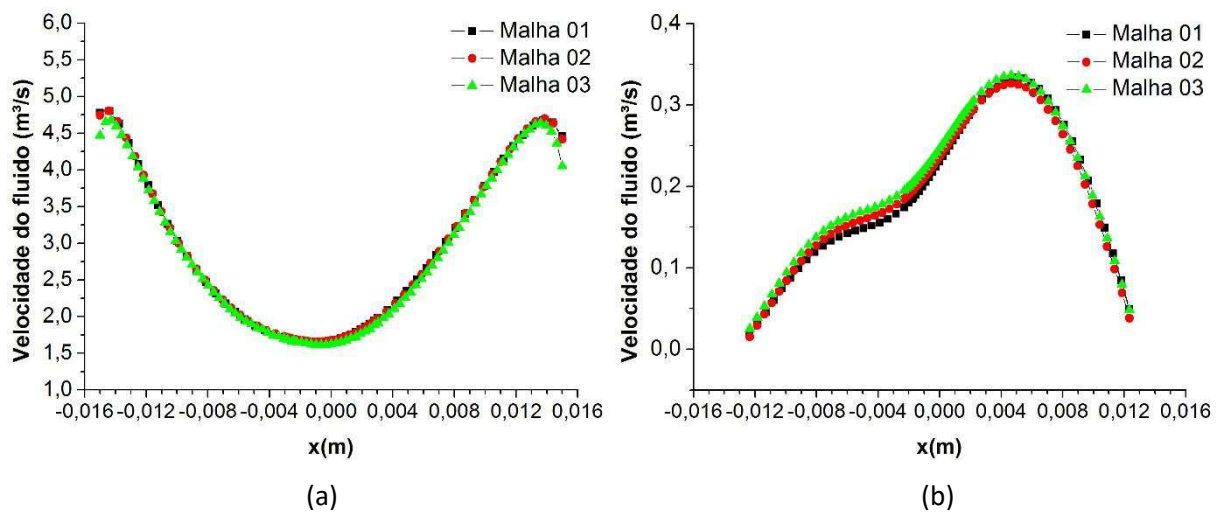


Figura 5.2: Velocidade resultante do fluido em função da posição  $z$ , nas posições  $y$  iguais a (a) 150mm e (b) 80mm para os três refinamentos da malha.

## 5.2. DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO HIDROCICLONE COM MEIO FILTRANTE CILÍNDRICO.

Devido a poucos trabalhos no âmbito de CFD para hidrociclones contendo a parte cilíndrica como filtrante e devido à alta complexidade de escoamento, a exemplo de: Vieira (2006); Lacerda (2007); Almeida (2008); WANG e Yu (2008); Oliveira *et al.* (2009); Cruz e Zanini (2010); Silva (2012); Façanha (2012); Martins *et al.* (2013); Salvador *et al.* (2013); Silva (2015); Gonçalves (2016). Esta seção, portanto, vem dar uma contribuição nesta área, visando compreender melhor o comportamento das fases durante o processo de separação neste tipo de hidrociclone.

Na Figura 5.3 é representado o campo de pressão no interior do hidrociclone, no plano longitudinal YZ e transversais XZ em diferentes posições y iguais a: 191,6 mm, 160,8 mm, 130 mm, 99,2 mm, 77,4 mm, 49,6 mm. É observado que o comportamento da pressão na parte cilíndrica, aumenta no sentido radial do centro para parede, ou seja, regiões de baixa pressão próxima ao eixo central do hidrociclone e de pressões mais elevadas nas regiões próximas às paredes, devido à força centrífuga ocasionada velocidade tangencial, tal comportamento é visto na Figura 5.4 (b) onde está representado o campo de velocidade tangencial no interior do HciF<sub>(K1-ε1)</sub> no plano XY com vazão de alimentação 295.7cm<sup>3</sup>/s. Estes resultados são semelhantes aos observados nos hidrociclones convencionais e cônicos filtrante conforme reportado na literatura (Vieira, 2006; Lacerda 2007; Almeida, 2008; Wang e Yu, 2008; Oliveira *et al.* 2009). A velocidade tangencial diminui no interior da parte cilíndrica, até chegar na transição com a parte conica, onde ocorre a diminuição significativa e sendo superada pelas velocidades radial e axial ao chegar na parte cônica, devido a diminuição progressiva do raio desta parte até a saída de “*underflow*”.

Uma explicação do comportamento do fluido mostrado na Figura 5.4 (b) é devido a diminuição da velocidade tangencial a medida que se distância da seção de entrada do hidrociclone, tal diminuição é ocasionado pela parede cilíndrica filtrante, devido a saída adicional de fluxo, ou seja, o filtrado. A vazão do filtrado correspondente foi 0,050 cm<sup>3</sup>/s, tal valor é muito menor, em relação à vazão de saída do fluido no “*overflow*” e “*underflow*”, mas o suficiente para tornar o escoamento no interior do hidrociclone complexo.



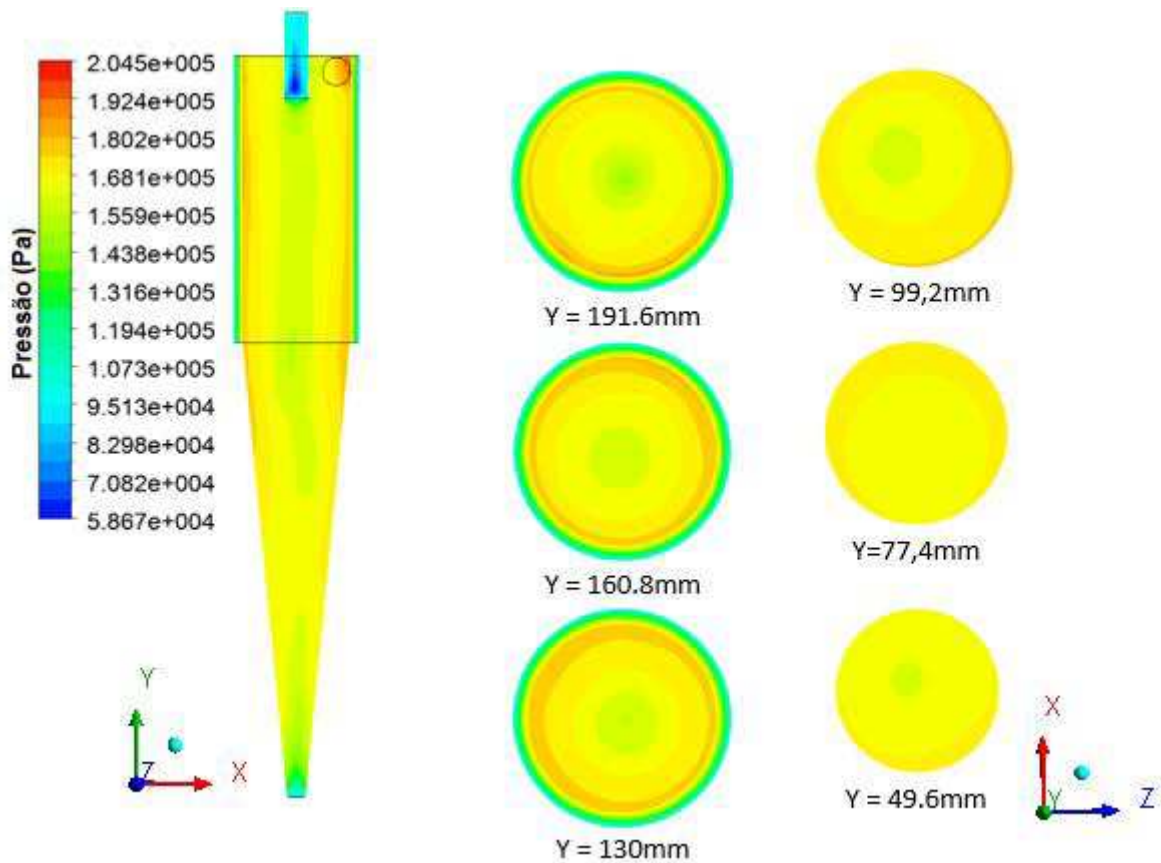


Figura 5.3: Campo de pressão sobre o plano XY para o caso cilíndrico filtrante de permeabilidade  $K_1$  e porosidade  $\varepsilon_1$  com vazão de alimentação de  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

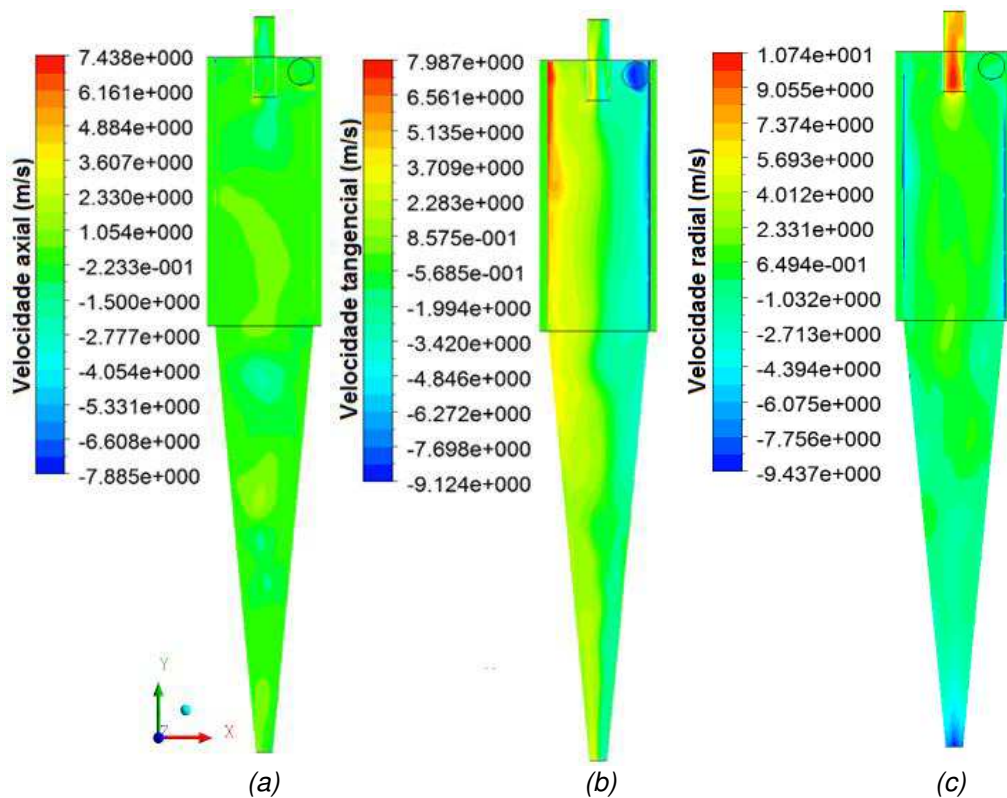


Figura 5.4: Campo de velocidade axial (a), tangencial (b) e radial (c) sobre o plano XY para  $\text{HciF}_{(K_1-\varepsilon_1)}$  com vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

Na Figura 5.4 (a), (b) e (c) estão representados os campos de velocidade axial, tangencial e radial no plano XY para  $H_{ciF_{(K1-\epsilon_1)}}$  com vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s. A velocidade tangencial aliada a velocidade radial geram no interior do hidrociclone, regiões de baixas pressão, chegando próximo aos valores da pressão atmosférica na região central do hidrociclone, logo foi ocasionado a formação de baixa pressão.

Na Figura 5.4 (a) e (c) indicam que o processo de filtração influenciou nas características da velocidade axial e radial do fluido ratificando o comportamento relatado na literatura. Na literatura é relatado que a velocidade radial do fluido cresce da parede para o eixo do hidrociclone (Vieira, 2006; Barbosa, 2011; Santos, 2010). As componentes de velocidade induzem, portanto, as partículas permanecerem no vórtice externo e, conseqüentemente deixarem o hidrociclone pela saída inferior ou “*underflow*”.

Ao analisar a Figura 5.4 (a) que representa a distribuição das componentes da velocidade axial no interior do hidrociclone indicam a redução da parede para o centro, esse comportamento é igualmente relatado por Oliveira *et al.* (2009). Verifica-se também na Figura 5.4 que as velocidades apresentam valor negativo, induzindo a presença de uma zona de recirculação de fluidos. Ao longo da parte cilíndrica e cônica, nota-se que a região de recirculação é mais acentuada quando há o aumento da velocidade radial e diminuição da velocidade tangencial, tal comportamento é mais acentuado na parte cônica do hidrociclone, onde a velocidade radial é acentuada.

Na Figura 5.5 é apresentado o campo vetorial de velocidade do fluido sobre o plano longitudinal XY para  $H_{ciF_{(K1-\epsilon_1)}}$  e vazão volumétrica de alimentação de 295,7 cm<sup>3</sup>/s, observa-se na parte superior do hidrociclone o fluxo caótico denominado curto circuito ou *by-pass* conforme Silva, 2012; Façanha, 2012; Salvador *et al.* 2013. A formação deste fluxo ocorre em virtude da fricção na parte superior do hidrociclone que desacelera o fluxo localmente. O fluido colide com a parede e forma esta parte caótica próxima à parede externa do “*vortex finder*”, ocasionando diminuição do fluxo consideravelmente. Com essa colisão, uma parte do fluido não segue o caminho preferencial, não passa pelo processo de separação independentemente do tamanho da partícula, ou densidade. Tal fenômeno é reportado na literatura para os mais

variados tipos de hidrociclones (Vieira, 2006; Almeida, 2008; Lacerda, 2010; Silva, 2012; Façanha, 2012; Salvador *et al.*, 2013; Gonçalves, 2016).

Na Figura 5.6 (a) e (b) está representado o campo de fração volumétrica sobre o plano longitudinal XY para as fases (a) fluido (b) partícula sólida. Verifica-se que há uma tendência de maior concentração de partícula na parte cônica do hidrociclone Figura 5.6 (b) e água na parte cilíndrica Figura 5.6 (a), isso ocorre devido à diferença de densidade entre as fases líquida e sólida. É observado na Figura 5.6 (b) a penetração da partícula sólida, no interior da membrana cilíndrica que pode aumentar a resistência no interior da membrana cilíndrica, acarretando possivelmente o entupimento parcial dos poros devido ao tamanho das partículas ser menor em relação à porosidade. Este comportamento é melhor observado na Figura 5.7, onde estão representados os campos de fração volumétrica do fluido e das partículas do meio filtrante.

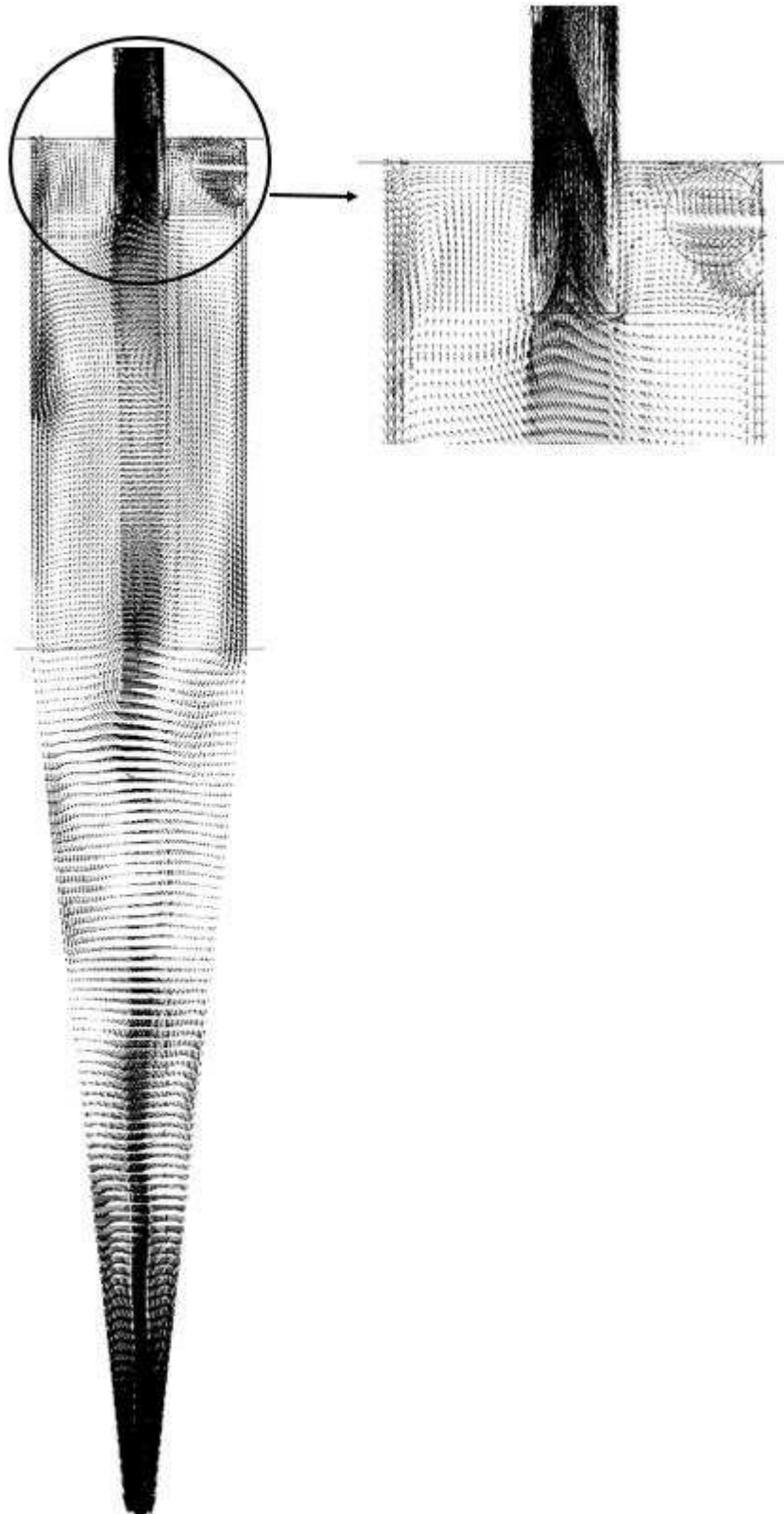


Figura 5.5: Campo vetorial do escoamento no interior do hidrociclone  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  com vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

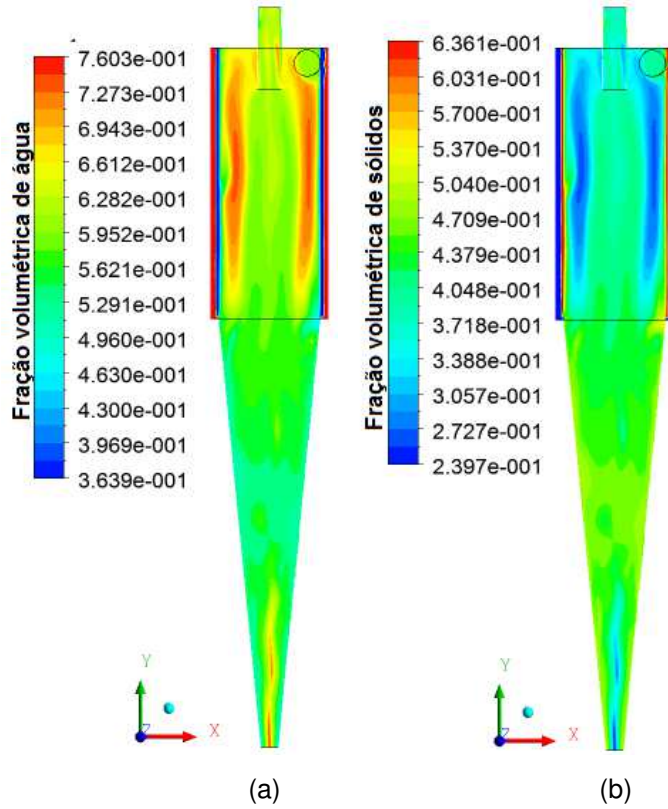


Figura 5.6: Campo de fração volumétrica da água (a) e partícula sólida (b) sobre o plano XY *para*  $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$  com vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

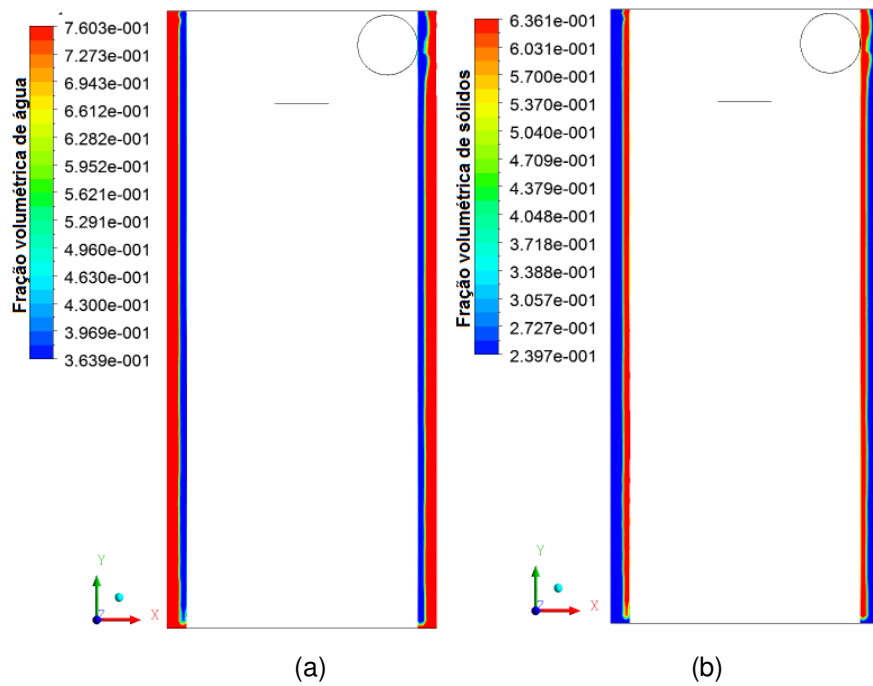


Figura 5.7: Campo de fração volumétrica da água (a) e partícula sólida (b) para a membrana cilíndrica sobre o plano XY *para*  $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$  com vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

## 5.1.2. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Visando proporcionar maior credibilidade e confiabilidade aos resultados das simulações obtidas, foi realizado um confronto dos resultados das simulações com dados experimentais disponibilizadas no trabalho de Façanha (2012). Foram comparados os resultados de vazão de alimentação e filtração, número de Euler, razão do líquido, para diferentes valores de queda de pressão de 88 kPa, 118 kPa, 147 kPa e 177 kPa.

### 5.1.2.1. VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO E FILTRADO.

Na Figura 5.8 e na Tabela 5.2 estão representados os resultados numéricos do presente trabalho relacionando as vazões de alimentação em função da queda de pressão para hidrociclones com meio filtrante cilíndrico de permeabilidade  $K_1=1,71 \times 10^{-16}$ ,  $K_2=2,95 \times 10^{-16}$  e  $K_3=3,60 \times 10^{-16}$  e porosidade  $\varepsilon_1=0,138$ ,  $\varepsilon_2=0,129$  e  $\varepsilon_3=0,143$ . Os resultados atestam um erro na faixa de 1,6%, ocasionando que os resultados numéricos estão em sintonia com os resultados reportados por Façanha (2012).

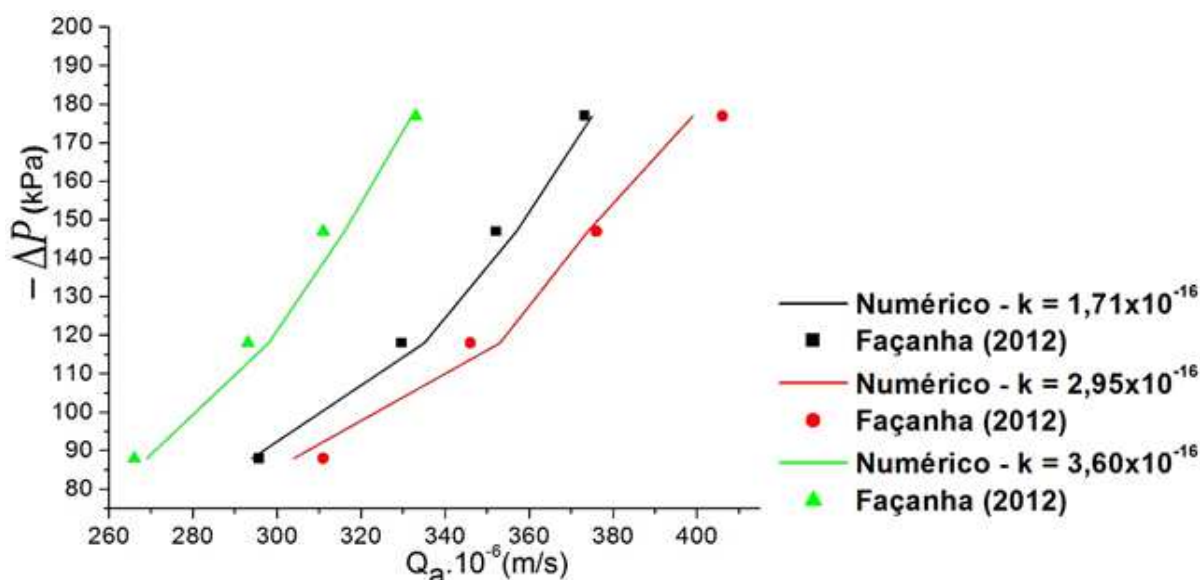


Figura 5.8: Vazão de alimentação em função da queda de pressão, para hidrociclones  $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\varepsilon2)}$ ,  $HciF_{(K3-\varepsilon3)}$ .

TABELA 5.2: Resultados experimentais da vazão de entrada (Façanha, 2012) e numérico em função de cada permeabilidade estudada.

$-\Delta P$ (kPa)	Q [cm <sup>3</sup> /s] K <sub>1</sub> =1,71x10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] ε <sub>1</sub> =0,138			Q [cm <sup>3</sup> /s] K <sub>2</sub> = 2,95x10 <sup>-16</sup> ε <sub>2</sub> =0,129			Q [cm <sup>3</sup> /s] K <sub>3</sub> = 3,60x10 <sup>-16</sup> ε <sub>3</sub> =0,143		
	Experimental (Façanha 2012)	Numérico (Presente Trabalho)	Erro (%)	Experimental (Façanha 2012)	Numérico (Presente Trabalho)	Erro	Experimental Façanha (2012)	Numérico (Presente Trabalho)	Erro
88	295,7	294	0,5	311	304	2,2	266	269	1,1
118	329,6	335	1,6	346	353	2,0	293	298	1,7
147	352,2	357	1,3	376	374	0,5	311	316	1,6
177	373,2	375	0,4	406	399	1,7	333	332	0,3

Na Tabela 5.3 e Figura 5.9 estão representados o comportamento da vazão volumétrica de filtrado em função da permeabilidade K<sub>1</sub>=1,71x10<sup>-16</sup>, K<sub>2</sub>=2,95x10<sup>-16</sup> e K<sub>3</sub>=3,60x10<sup>-16</sup> com porosidade ε<sub>1</sub>=0,138, ε<sub>2</sub>=0,129 e ε<sub>3</sub>=0,143. É observado um bom acordo dos resultados numéricos com os dados experimentais, com erro variando no máximo a 6,3%, demonstrando que o incremento da permeabilidade, ocasiona um aumento na vazão de filtrado, com o aumento da queda de pressão. Tais resultados numéricos estão em sintonia com os resultados apresentados por Façanha (2012).

TABELA 5.3: Resultados experimentais vazão do filtrado (Façanha, 2012) e numérico em função das Permeabilidades estudadas

$-\Delta P$ (kPa)	Q <sub>F</sub> [cm <sup>3</sup> /s] K <sub>1</sub> =1,71x10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] ε <sub>1</sub> =0,138			Q <sub>F</sub> [cm <sup>3</sup> /s] K <sub>2</sub> = 2,95x10 <sup>-16</sup> ε <sub>2</sub> =0,129			Q <sub>F</sub> [cm <sup>3</sup> /s] K <sub>3</sub> = 3,60x10 <sup>-16</sup> ε <sub>3</sub> =0,143		
	Experimental (Façanha 2012)	Numérico (Presente Trabalho)	Erro (%)	Experimental (Façanha 2012)	Numérico (Presente Trabalho)	Erro	Experimental Façanha (2012)	Numérico (Presente Trabalho)	Erro (%)
88	0,052	0,053	1,9	0,063	0,061	3,1	0,110	0,107	2,8
118	0,063	0,059	6,3	0,079	0,076	3,7	0,137	0,135	1,4
147	0,081	0,080	1,2	0,095	0,092	3,1	0,163	0,160	1,8
177	0,094	0,100	6,3	0,112	0,110	1,7	0,196	0,194	1,0

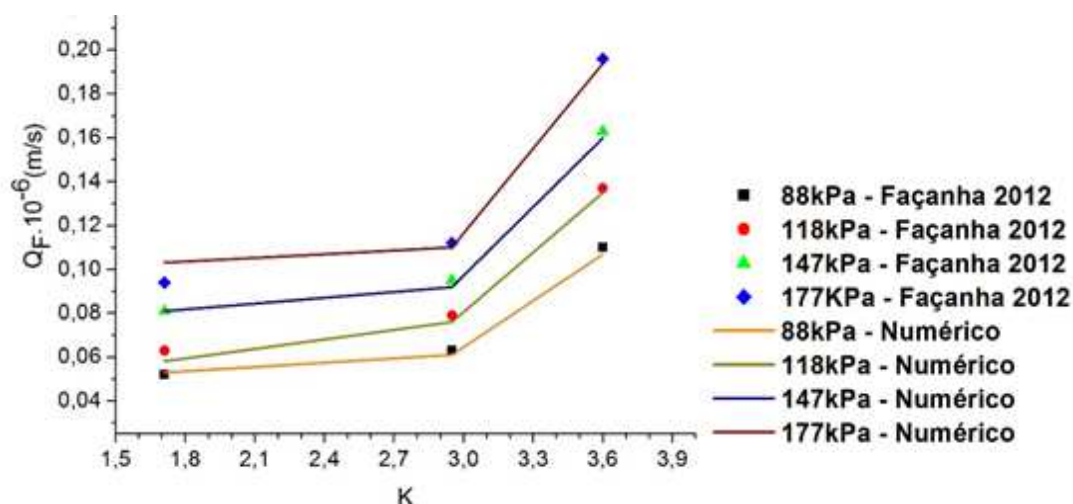


Figura 5.9: Vazão volumétrica de filtrado em função da permeabilidade HciF<sub>(K1-ε1)</sub>, HciF<sub>(K2-ε2)</sub>, HciF<sub>(K3-ε3)</sub>

### 5.1.2.2. NÚMERO DE EULER

O número de Euler é definido pela relação entre as forças de pressão e de inércia que permite descrever as perdas de energia e de pressão no fluido.

Assim foi representado na Figura 5.10 e Tabela 5.4 os resultados numéricos do número de Euler em função da queda de pressão para hidrociclones filtrantes de permeabilidade  $K_1=1,71 \times 10^{-16}$ ,  $K_2=2,95 \times 10^{-16}$  e  $K_3=3,60 \times 10^{-16}$  com porosidade  $\varepsilon_1=0,138$ ,  $\varepsilon_2=0,129$  e  $\varepsilon_3=0,143$ . Os resultados numéricos estão na margem de 3,9% de erro em relação ao reportado por Façanha (2012), ocasionando uma boa correlação experimental.

TABELA 5.4: Numero de Euler em função da queda de pressão e permeabilidade.

$-\Delta P$ (kPa)	Eu [-] $K_1=1,71 \times 10^{-16}$ $\varepsilon_1=0,138$			Eu [-] $K_2=2,95 \times 10^{-16}$ $\varepsilon_2=0,129$			Eu [-] $K_3=3,60 \times 10^{-16}$ $\varepsilon_3=0,143$		
	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)
88	1012	1049	3,6	917	950	3,5	1251	1300	3,9
118	1086	1050	3,3	986	1007	2,1	1379	1400	1,5
147	1190	1153	3,1	1044	1028	1,5	1522	1555	2,1
177	1271	1254	1,3	1073	1062	1,0	1593	1605	0,7

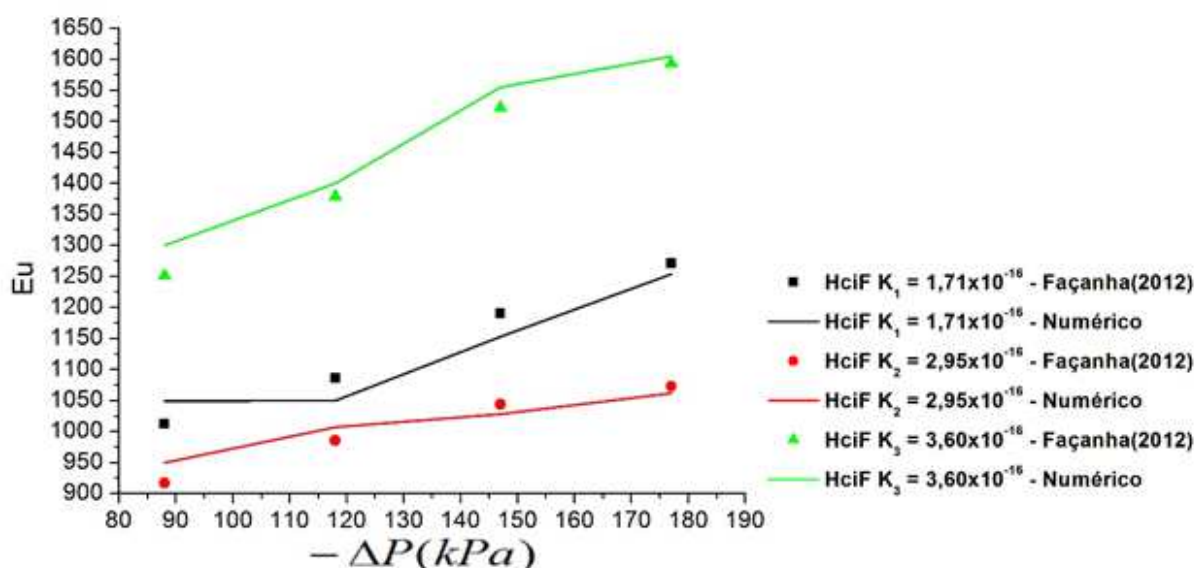


Figura 5.10: Numero de Euler em função da queda de pressão para HciF<sub>(K1-ε1)</sub>, HciF<sub>(K2-ε2)</sub>, HciF<sub>(K3-ε3)</sub>.

### 5.1.2.3. RAZÃO DO LÍQUIDO

A Figura 5.11 apresenta resultados numéricos da queda de pressão em função da razão líquido para hidrociclones filtrantes de permeabilidade  $K_1=1,71 \times 10^{-16}$ ,  $K_2=2,95 \times 10^{-16}$  e  $K_3=3,60 \times 10^{-16}$  m<sup>2</sup> com porosidade  $\varepsilon_1=0,138$ ,  $\varepsilon_2=0,129$  e  $\varepsilon_3=0,143$ .



Os resultados numéricos da Figura 5.11 relatam que estão com um grau aceitável de erro na faixa de 1%, ocasionando que seja válido para as simulações apresentadas. Tais resultados estão de acordo com os resultados apresentados por Façanha (2012), de acordo com Tabela 5.5.

TABELA 5.5: Razão do líquido em função da queda de pressão

$-\Delta P$ (kPa)	$K_1=1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ $\epsilon_1=0,138$			$K_2=2,95 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ $\epsilon_1=0,129$			$K_3=3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ $\epsilon_1=0,143$		
	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)
88	32,4	32,4	0,00	29,2	29,2	0,00	32,6	32,6	0,00
118	33,8	33,4	1,18	29,3	29	1,02	33,1	32,8	0,90
147	35,2	34,9	0,85	30,2	30	0,66	32,7	32,4	0,92
177	34,7	34,4	0,86	31,2	31	0,06	33,1	33	0,03

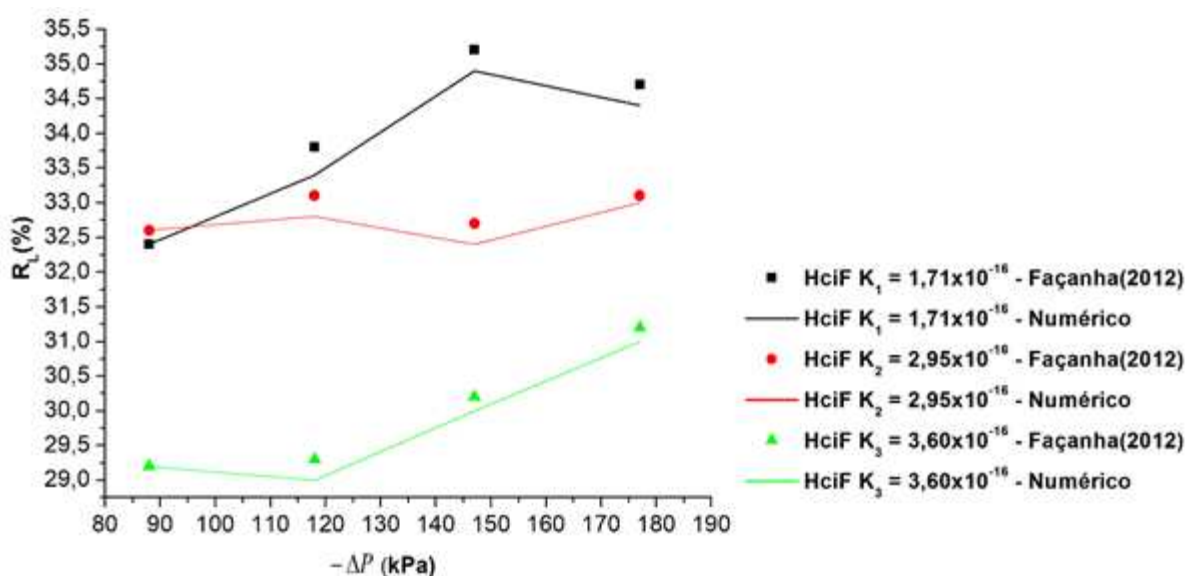


Figura 5.11: Queda de pressão em função da razão do líquido para HciF<sub>(K1-ε1)</sub>, HciF<sub>(K2-ε2)</sub>, HciF<sub>(K3-ε3)</sub>.

### 5.1.2.3. EFICIÊNCIA TOTAL

A Tabela 5.6 e Figura 5.12 ilustram os resultados experimentais de Façanha (2012) e resultados numéricos da queda de pressão em função razão do líquido para hidrociclones filtrantes de permeabilidade  $K_1=1,71 \times 10^{-16}$ ,  $K_2=2,95 \times 10^{-16}$  e  $K_3=3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  com porosidade  $\epsilon_1=0,138$ ,  $\epsilon_2=0,129$  e  $\epsilon_3=0,143$ .

Os resultados numéricos da Figura 5.12 mostram o erro em relação aos dados experimentais (Façanha, 2012) e numérico de no máximo 2,9%, conseqüentemente estão válidos para as simulações estudadas.

TABELA 5.6: Eficiência total em função da queda de pressão

$-\Delta P$ (kPa)	$K_1=1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ $\varepsilon_1=0,138$			$K_2=2,95 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ $\varepsilon_2=0,129$			$K_3=3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ $\varepsilon_3=0,143$		
	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)	Experimental	Numérico	Erro (%)
88	74,9	73,1	2,4	68,8	67,2	2,3	74,7	72,9	2,4
118	75,3	73,9	1,8	69,1	67,9	0,8	73,9	72,2	2,3
147	76,1	74,0	2,7	70,5	68,0	1,7	75,4	73,7	2,2
177	76,3	73,9	3,1	71,2	69,3	2,6	77,4	75,1	2,9

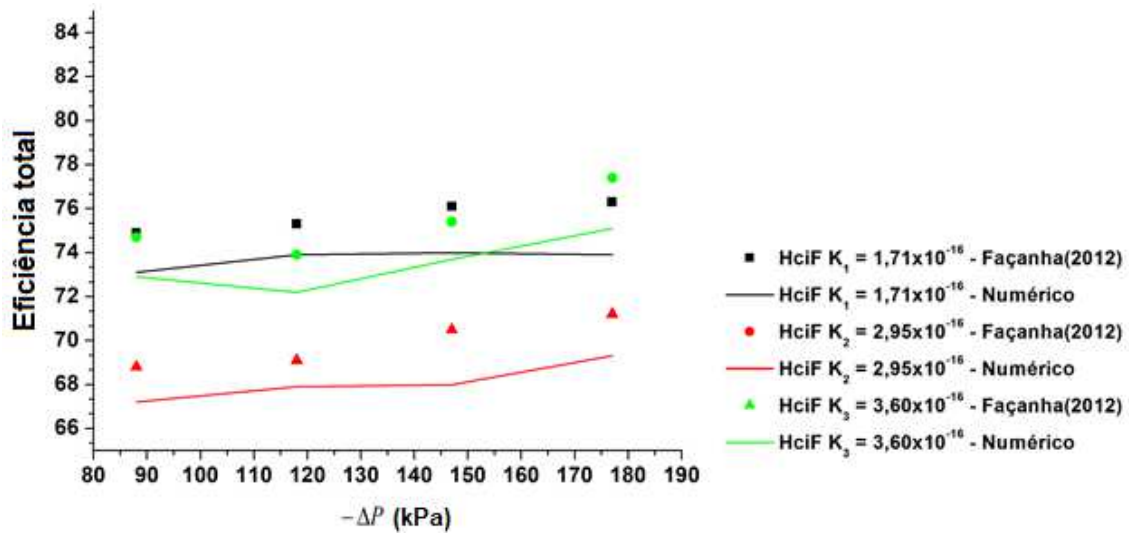


Figura 5.12: Queda de pressão em função da razão do líquido para HciF<sub>(K1-ε1)</sub>, HciF<sub>(K2-ε2)</sub>, HciF<sub>(K3-ε3)</sub>.

## 5.2. EFEITO DA POROSIDADE

Neste tópico é avaliado como a variação da porosidade  $\varepsilon_1=0,138$ ,  $\varepsilon_2=0,129$  e  $\varepsilon_3=0,143$ , com permeabilidade fixa  $1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , afeta o escoamento no interior do hidrocilone filtrante com vazão volumétrica de entrada de  $295,7 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Na Figura 5.13 está representado o campo de pressão nos hidrociclones do HciF<sub>(K1-ε1)</sub>, HciF<sub>(K1-ε2)</sub>, e HciF<sub>(K1-ε3)</sub>, com vazão volumétrica de entrada  $295,7 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Na Figura 5.13 observa-se uma diminuição de pressão quando a porosidade aumenta de 0,129 para 0,138 e um aumento de pressão quando a porosidade aumenta 0,138 para 0,143, pois apresenta um gradiente de pressão próximo a paredes da membrana, devido a porosidade da membrana ser pequena, que impede uma maior saída da vazão de filtrado. Tal fenômeno é ocasionado pela entrada de partículas no interior da membrana. Isso pode ser visto pelos valores de vazão de filtrado relacionados às porosidades  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_3$  onde  $Q_{F2} = 0,048 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_{F1} = 0,053$

cm<sup>3</sup>/s e  $Q_{F3} = 0,054$  cm<sup>3</sup>/s onde tal fenômeno pode ser visto na Figura 5.25, que correlaciona a fração volumétrica de partículas no interior da membrana para as porosidades estudadas, que demonstra uma maior concentração de partículas, no interior da membrana na medida que ocorre aumento da porosidade.

Fazendo uma análise do número de Euler é visto uma diminuição de  $\epsilon_2 = 0,129$  para  $\epsilon_1 = 0,138$  na proporção de 6.8% devido a diminuição de pressão. Agora em relação à  $\epsilon_1 = 0,138$  para  $\epsilon_3 = 0,143$ , tem-se um aumento do número de Euler em 6% no qual é ocasionado pelo aumento da queda de pressão.

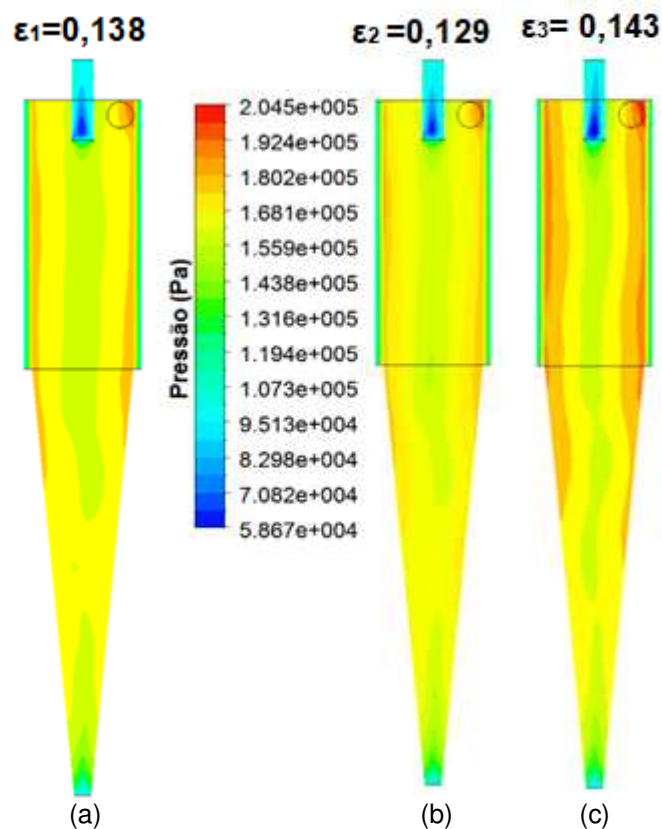


Figura 5.13: Campo de pressão sobre plano longitudinal XY para  $\epsilon_2$  (a),  $\epsilon_1$  (b) e  $\epsilon_3$  (c) para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

Analisando a razão do líquido pode-se observar que não houve um aumento significativo do seu valor com o aumento da porosidade, tal fato é visto na Figura 5.14, pois a velocidade axial não teve uma alteração satisfatória, ou seja, sendo a mesma com o aumento da porosidade. Os aumentos da razão no líquido ficaram na faixa de 1% em relação às porosidades.

A eficiência total em relação ao aumento de porosidade tivemos de  $\epsilon_1$  para e  $\epsilon_2$  (diminuição da porosidade) uma diminuição de 3,8% na eficiência e de  $\epsilon_2$  para  $\epsilon_3$

um aumento somente de 0,2%. Esta diminuição está relacionada com as partículas que entram na membrana.

Na Figura 5.19 (a), (b) e (c) está relacionado o campo de fração volumétrica sobre o plano XY para a água no hidrociclones  $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ ,  $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ , e  $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ , para a vazão volumétrica de entrada 295,7 cm<sup>3</sup>/s. Verifica-se que a fração volumétrica de água se concentra na parte cilíndrica e diminui ao longo do hidrociclone. Na parte cilíndrica ocorre uma pequena diminuição da fração da água devido à diminuição da força centrífuga ao longo do hidrociclone com o aumento da porosidade, tal diminuição é ocasionada pelo aumento dos poros, levando a um aumento, mesmo que pequeno, na vazão do filtrado. Na parte cônica ocorre uma diminuição da fração volumétrica da água.

Analisando a fração volumétrica da água próximo a saída de “overflow” percebe-se que ocorre, com o aumento da porosidade de  $\varepsilon_2$  para  $\varepsilon_1$  (aumento da porosidade) o aumento da vazão volumétrica de 0,48 cm<sup>3</sup>/s para 0,52 cm<sup>3</sup>/s. com o aumento de  $\varepsilon_1$  para  $\varepsilon_3$  os valores ficaram 0,052cm<sup>3</sup>/s e 0,053cm<sup>3</sup>/s respectivamente, devido ao aparecimento do efeito das partículas em relação a espessura da membrana que é ilustrado na Figura 5.23. Com o aparecimento das partículas na membrana  $\varepsilon_1$  para  $\varepsilon_3$  ocorre novamente um aumento da fração da água próximo a saída de “underflow”, favorecendo o efeito denominado curto circuito Figura 5.16(a) e (c).

A Figura 5.21 (a), (b) e (c) mostra a fração volumétrica de partícula sólida para os hidrociclones  $HciF_{(K1-\varepsilon1)}$ ,  $HciF_{(K1-\varepsilon2)}$ , e  $HciF_{(K1-\varepsilon3)}$ , para a vazão volumétrica de entrada 295,7cm<sup>3</sup>/s. É observado diminuição da fração das partículas próximo ao centro da parte cilíndrica. Tal fenômeno é ocasionado pelo aumento da porosidade, no que as partículas começam a penetrar na membrana ocasionando uma diminuição do fluxo de alimentação e ficando próxima à parede cilíndrica, como mostra a Figura 5.23.

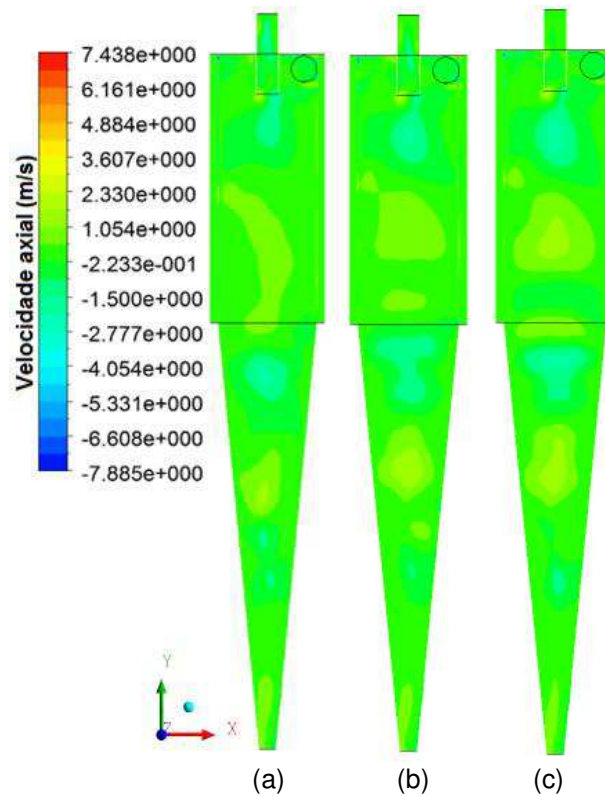


Figura 5.14: Campo de velocidade axial sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295.7\text{cm}^3/\text{s}$ .

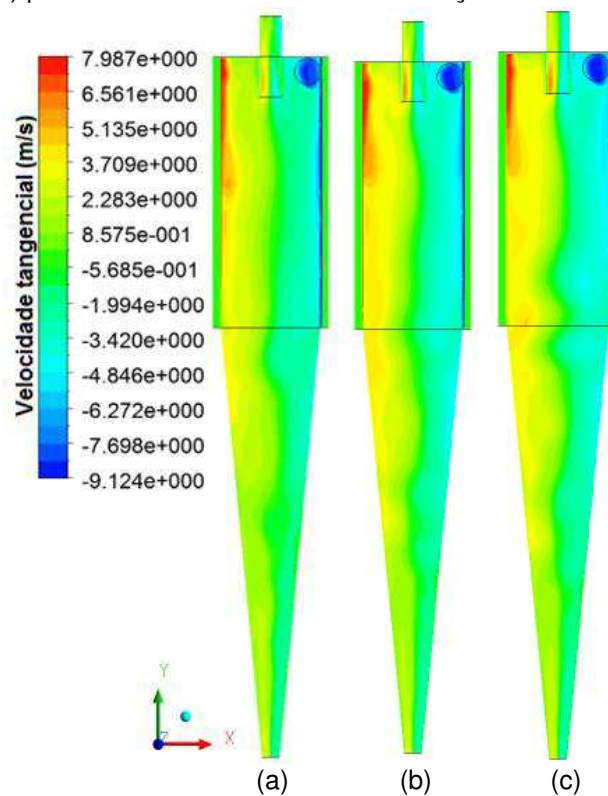


Figura 5.15: Campo de velocidade tangencial sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

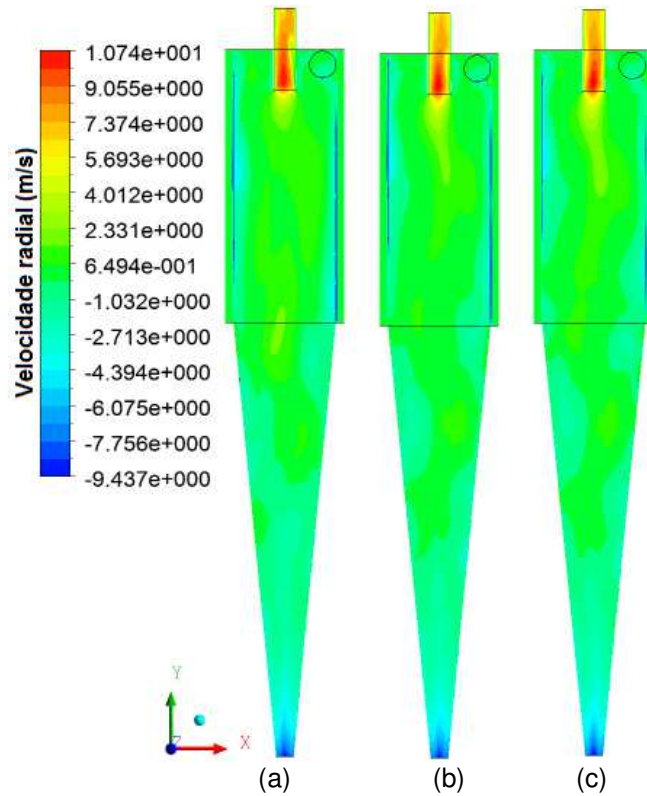


Figura 5.16: Campo de velocidade radial sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

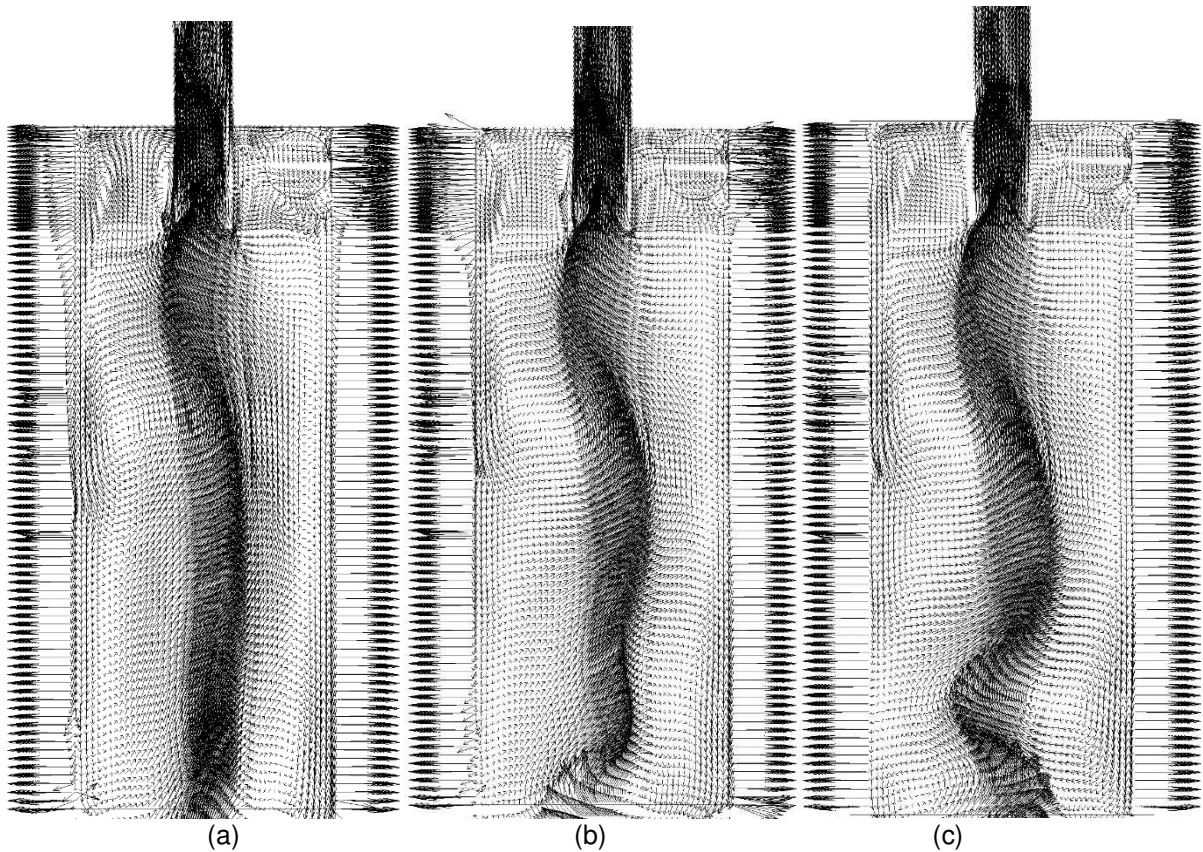


Figura 5.17: Campo vetorial do escoamento na parte cilíndrica sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

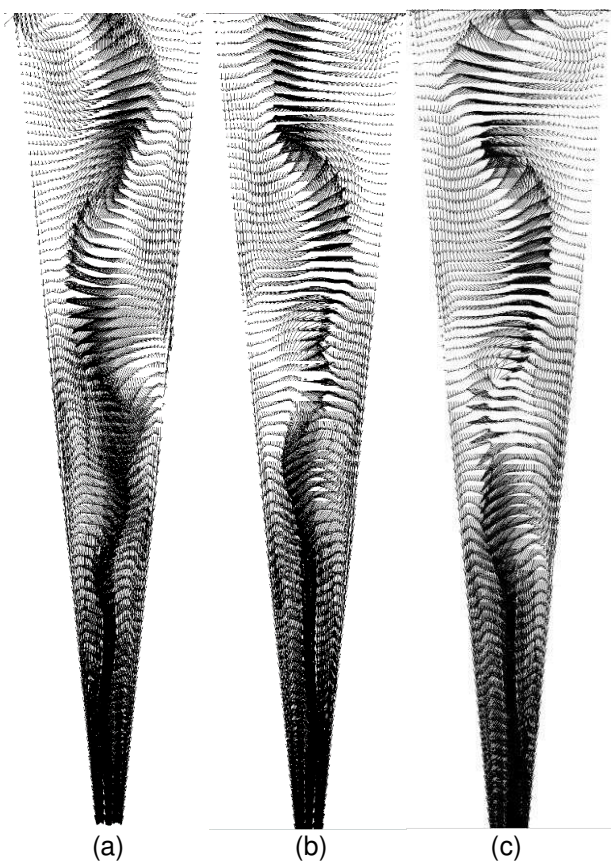


Figura 5.18: Campo vetorial do escoamento na parte cônica sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

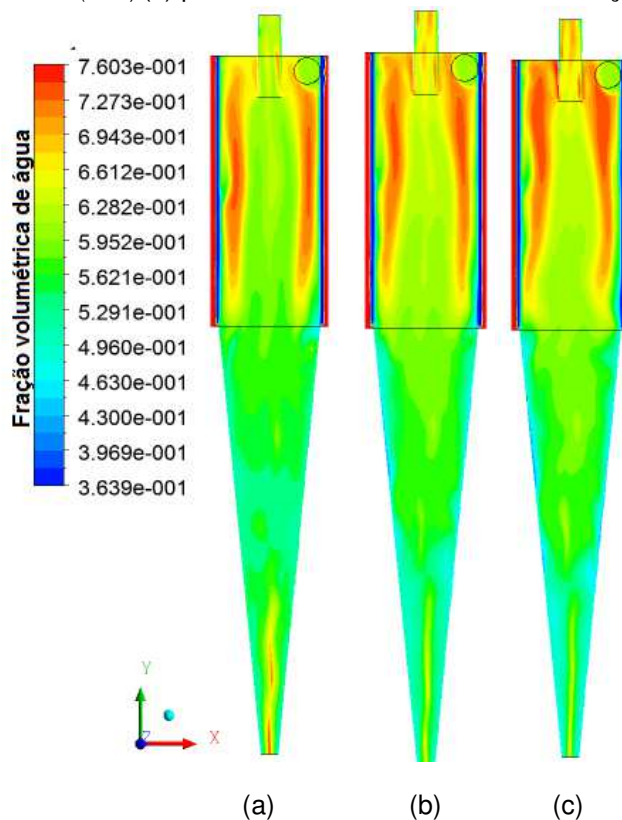


Figura 5.19: Campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

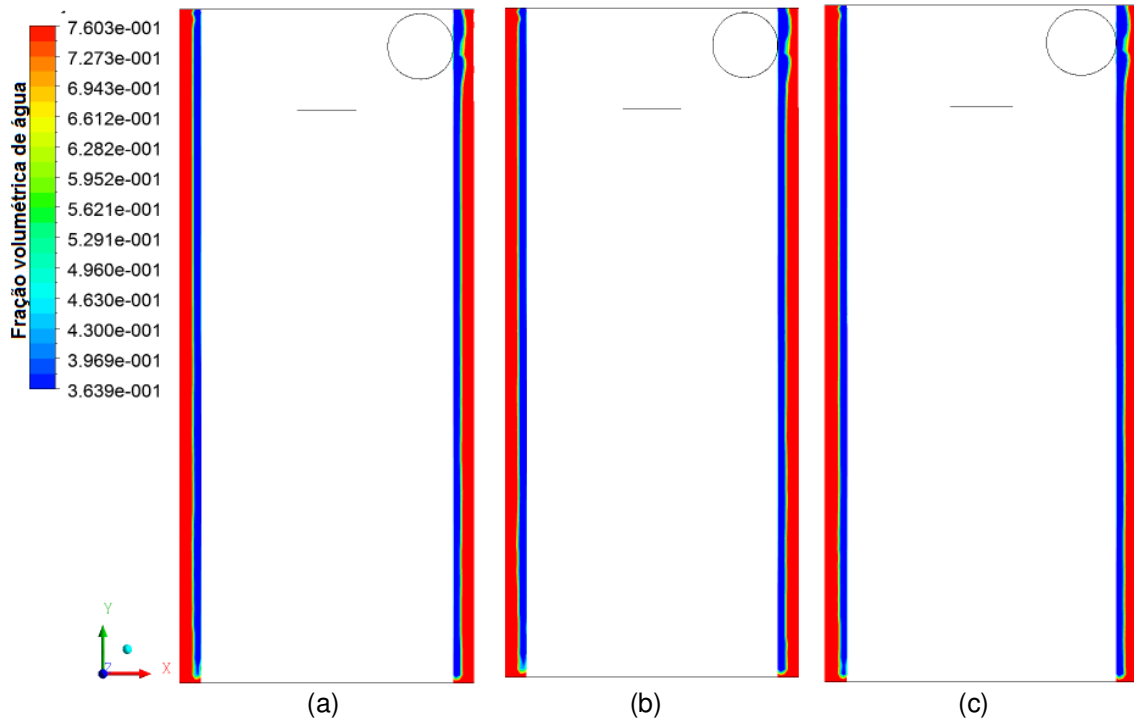


Figura 5.20: Campo de fração volumétrica de água na membrana cilíndrica sobre o plano para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

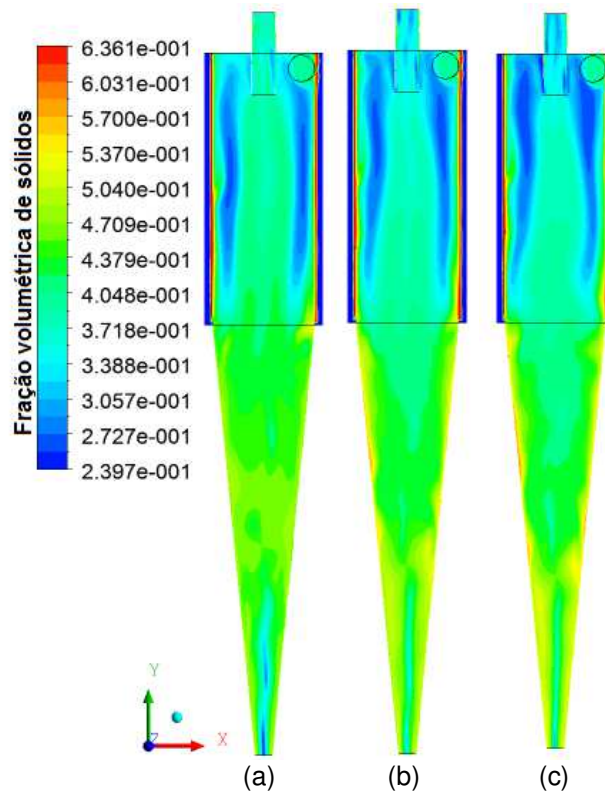


Figura 5.21: Campo de fração volumétrica de sólidos sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .



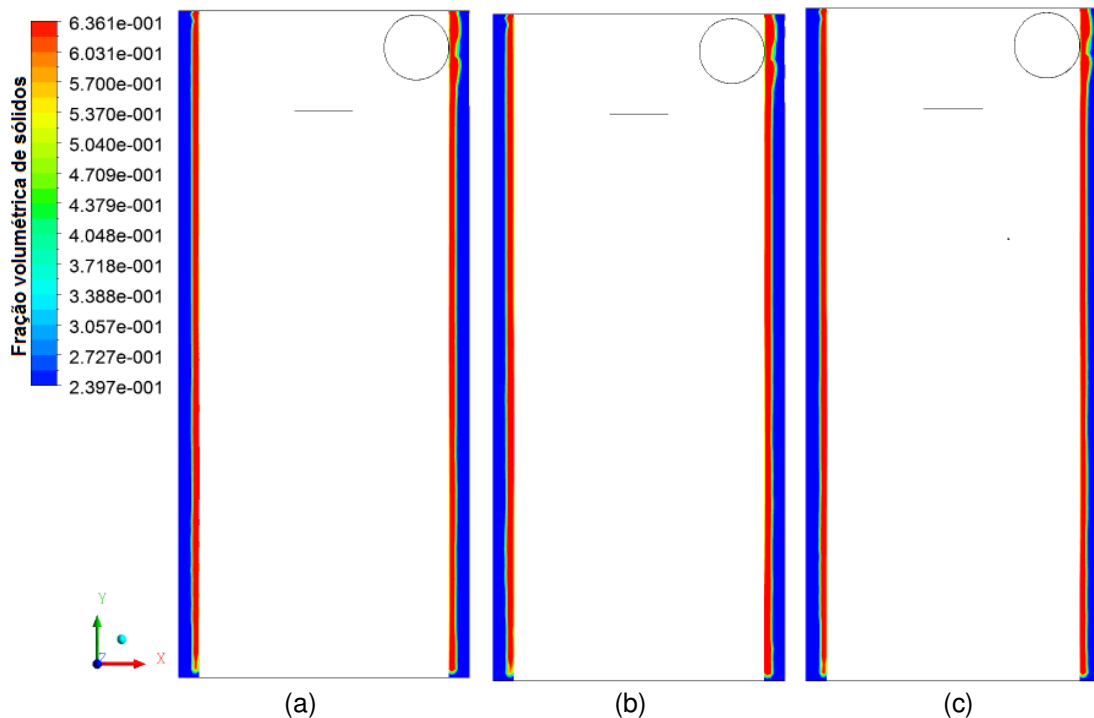


Figura 5.22: Campo de fração volumétrica de partícula sólida na membrana cilíndrica sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$  (a),  $HciF_{(K1-\epsilon_2)}$  (b) e  $HciF_{(K1-\epsilon_3)}$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

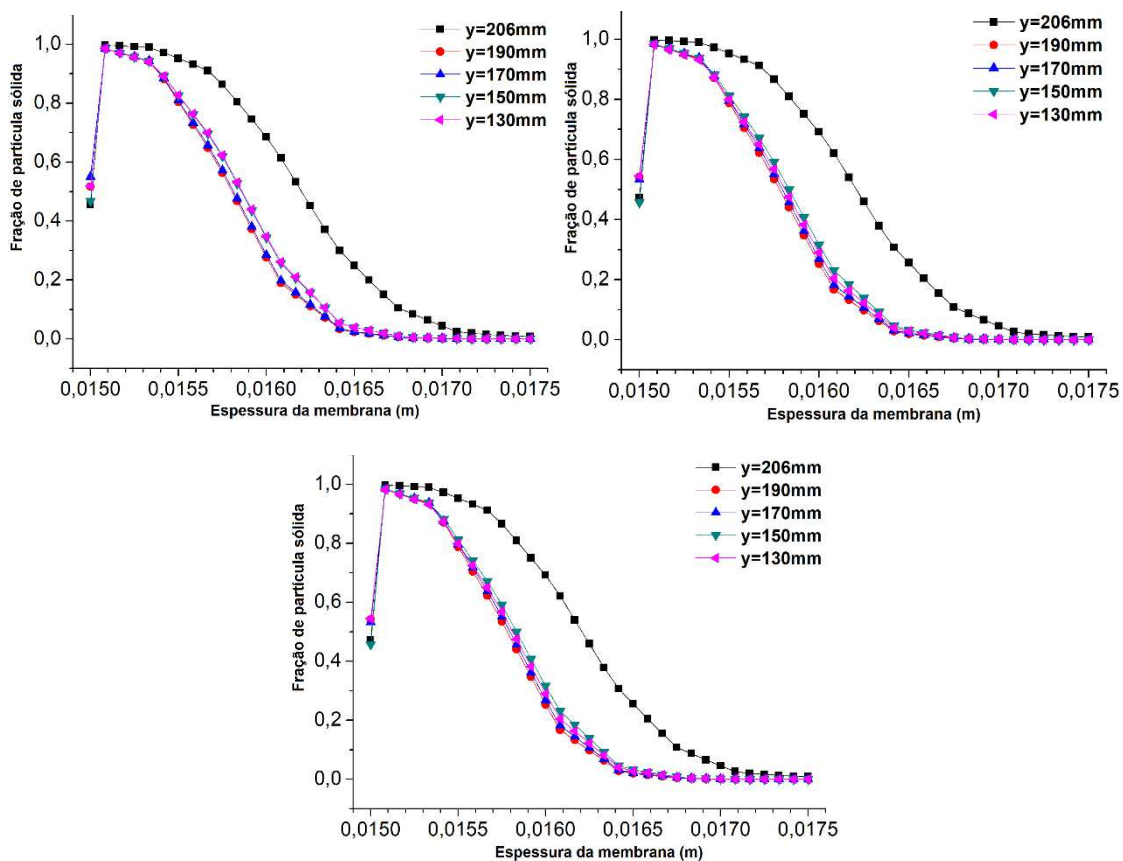


Figura 5.23: Campo de fração volumétrica de partícula sólida sobre a espessura da membrana da posição x, nas posições  $y = 206, 190, 170, 150, 130\text{mm}$  para porosidades  $\epsilon_2, \epsilon_1$  e  $\epsilon_3$ .

### 5.3. EFEITO DA PERMEABILIDADE

A Figura 5.24 está representando o campo de pressão na posição longitudinal XY de três hidrociclones filtrantes com permeabilidade  $1,71 \times 10^{-16}$ ,  $2,95 \times 10^{-16}$  e  $3,60 \times 10^{-16}$  e porosidade 0,138 e vazão volumétrica de entrada  $295,7 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

A Figura 5.24, mencionada anteriormente, apresenta o aumento da pressão no sentido radial do centro para parede, ou seja, regiões de baixa pressão próxima ao eixo central do hidrociclone e de pressões mais elevadas nas regiões próximas às paredes. Levando em consideração o aumento da permeabilidade de  $1,71 \times 10^{-16}$  a  $3,60 \times 10^{-16}$ , no qual é visto a diminuição da resistência do fluxo ao atravessar membrana, é notado a diminuição de pressão em algumas regiões da parede cilíndrica, ocasionado pelo aumento da permeabilidade que conseqüentemente diminui a resistência do fluxo do filtrado a atravessar a membrana, ou seja, melhorando a vazão do filtrado. As vazões volumétricas encontradas pelo filtrado foram:  $0,050 \text{ cm}^3/\text{s}$  para  $1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ,  $0,084 \text{ cm}^3/\text{s}$  para  $2,95 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  e  $0,109 \text{ cm}^3/\text{s}$  para  $3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ .

Na região cônica também ocorre uma diminuição da pressão no interior do hidrociclone, diminuindo em algumas regiões a pressão. Tal acontecimento está relacionado em termos da diminuição da velocidade tangencial Figura 5.26 e aumento da velocidade radial Figura 5.27 ao adentrar na parte cônica, tal diminuição mesmo sendo pequena está correlacionada com o aumento da permeabilidade e é, conseqüentemente, o aumento da vazão do filtrado no qual alterou as velocidades axial, tangencial e radial.

O aumento da permeabilidade ocasionou aumento do número de Euler, devido: (a) diminuição da velocidade cilíndrica no interior do hidrociclone; (b) aumento da vazão volumétrica do filtrado, e (c) aumento da queda de pressão no interior do hidrociclone. Os valores encontrados para os números de Euler para permeabilidade  $1,71 \times 10^{-16}$ ,  $2,95 \times 10^{-16}$  e  $3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  respectivamente são 1041, 1092 e 1162.

A razão do líquido praticamente não foi afetada em relação à vazão do filtrado, sendo praticamente baixo a variação, os valores encontrados foram 32,4% para  $K_1$ , 32,1% para  $K_2$  e 32% para  $K_3$ . Isso ocorreu devido os comportamentos de distribuição

de velocidade axial, ou seja, foram praticamente idênticos para as permeabilidades estudadas, conforme Figura 5.25 (a), (b) e (c).

Analisando agora a eficiência de separação, pode ser afetada pela diminuição do campo centrífugo, devido à diminuição da velocidade tangencial e aumento da velocidade radial, conforme as Figuras 5.26 (a), (b) e (c) e Figura 5.27 (a) (b) e (c). Esta diminuição de velocidade tangencial só pode ser levada em consideração quando analisamos isoladamente, logo temos que considerar a velocidade radial do fluido e a questão do filtrado que teve aumento significativo com o aumento da permeabilidade. O aumento da eficiência em relação à permeabilidade foi 1% para  $1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , 1% para  $2,95 \times 10^{-16}$  e 1,2% para  $3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ .

Na Figura 5.30 (a), (b) e (c) está representado o campo de fração volumétrica de água sobre o plano longitudinal XY para os hidrociclones  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$ , para a vazão volumétrica de entrada  $295,7 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Com o aumento da permeabilidade na parte cilíndrica, diminui a concentração de água próxima a parede do hidrociclone devido a diminuição da resistência da passagem da água e o aumento das partículas no interior da membrana, pois o fluido penetrou mais facilmente levando consigo as partículas sólidas.

Nota-se que próximo a saída inferior “*underflow*”, o aumento da permeabilidade influencia no fenômeno denominado curto circuito, quando vai de  $1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  para  $3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , ocasionando uma diminuição da fase fluida próximo do “*overflow*” e um aumento da fase sólida, que pode ser influenciado pelo aumento significativo dos sólidos no interior da membrana conforme ilustrado na Figura 5.33.

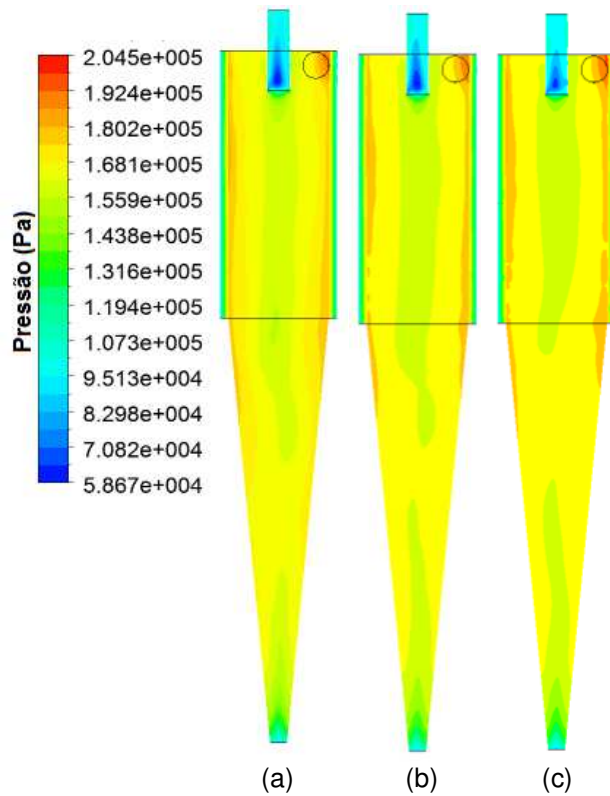


Figura 5.24: Campo de pressão sobre o planos XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

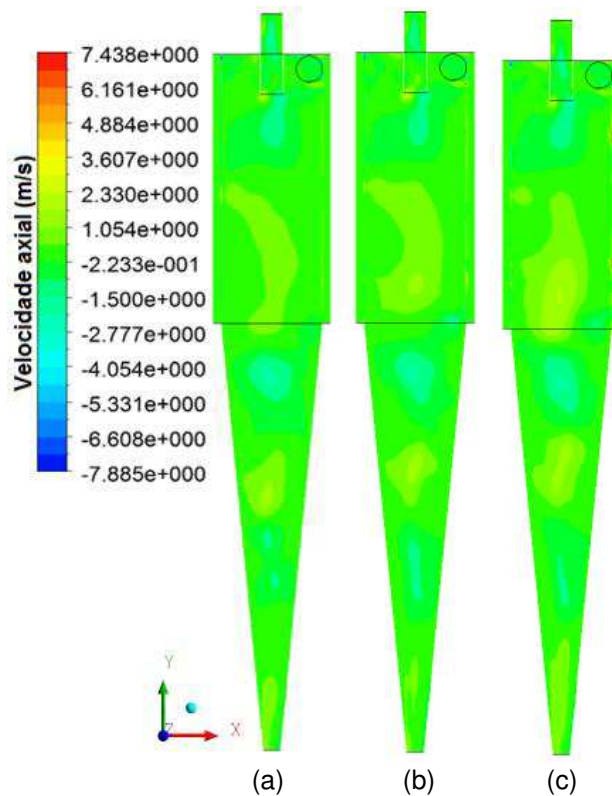


Figura 5.25: Campo de velocidade axial sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

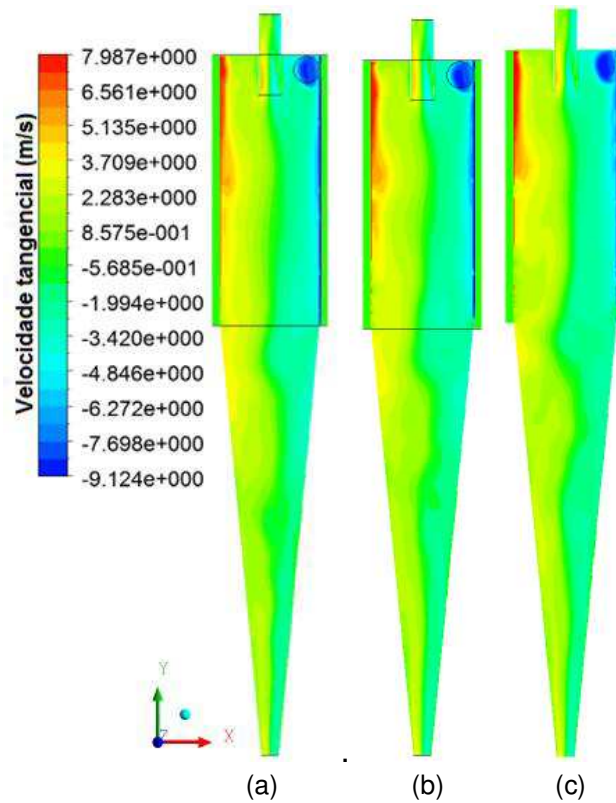


Figura 5.26: Campo de velocidade tangencial sobre o plano XY *para*  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

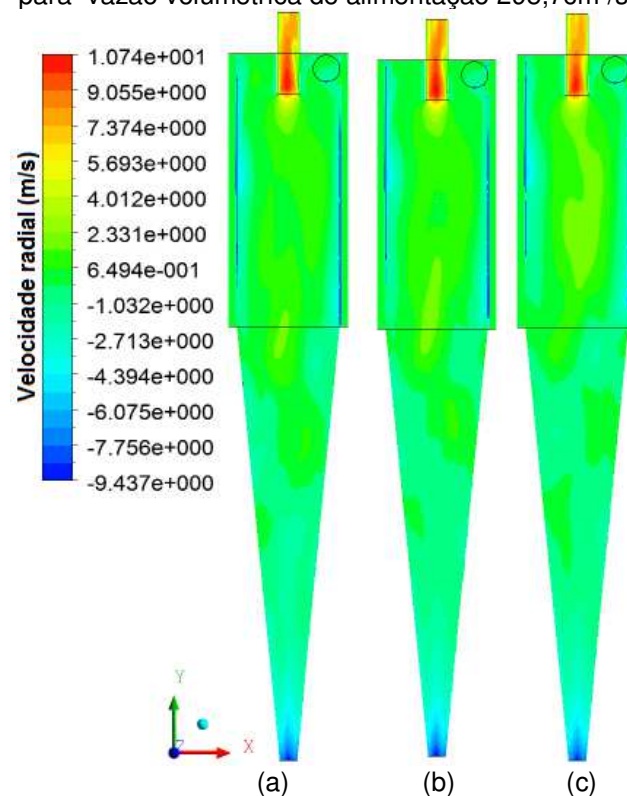


Figura 5.27: Campo de velocidade radial sobre o plano XY *para*  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

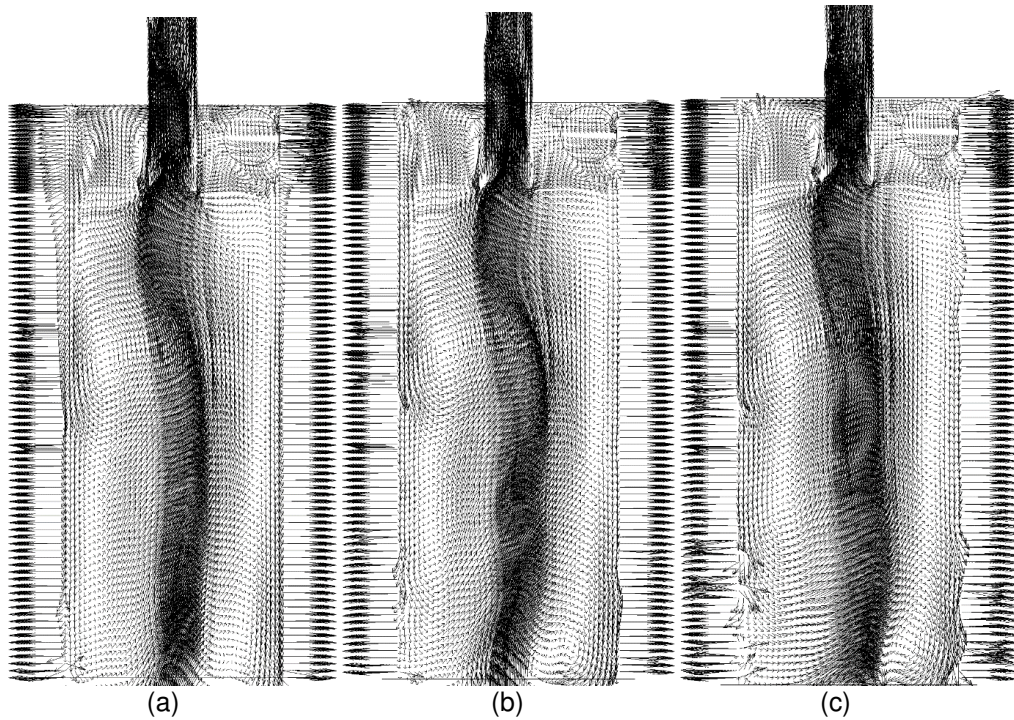


Figura 5.28: Campo vetorial da parte cilíndrica do escoamento do fluido no plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$

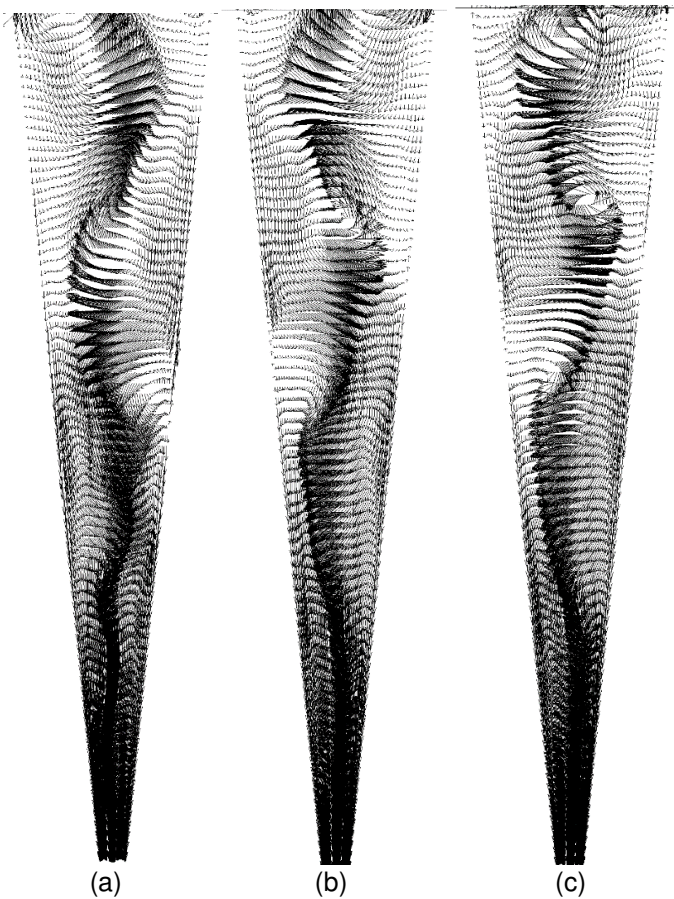


Figura 5.29: Campo vetorial da parte cônica do escoamento do fluido no plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

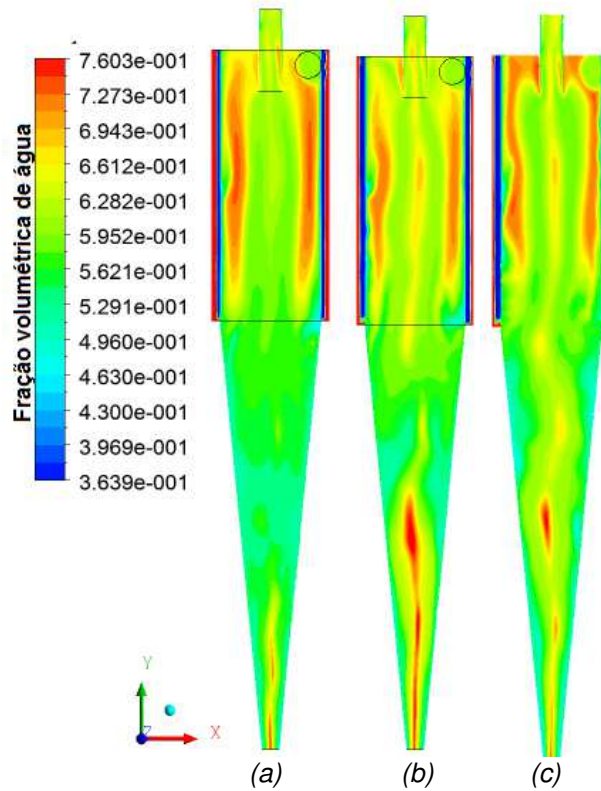


Figura 5.30: Campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para  $K_1$  (a),  $K_2$  (b) e  $K_3$  (c) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

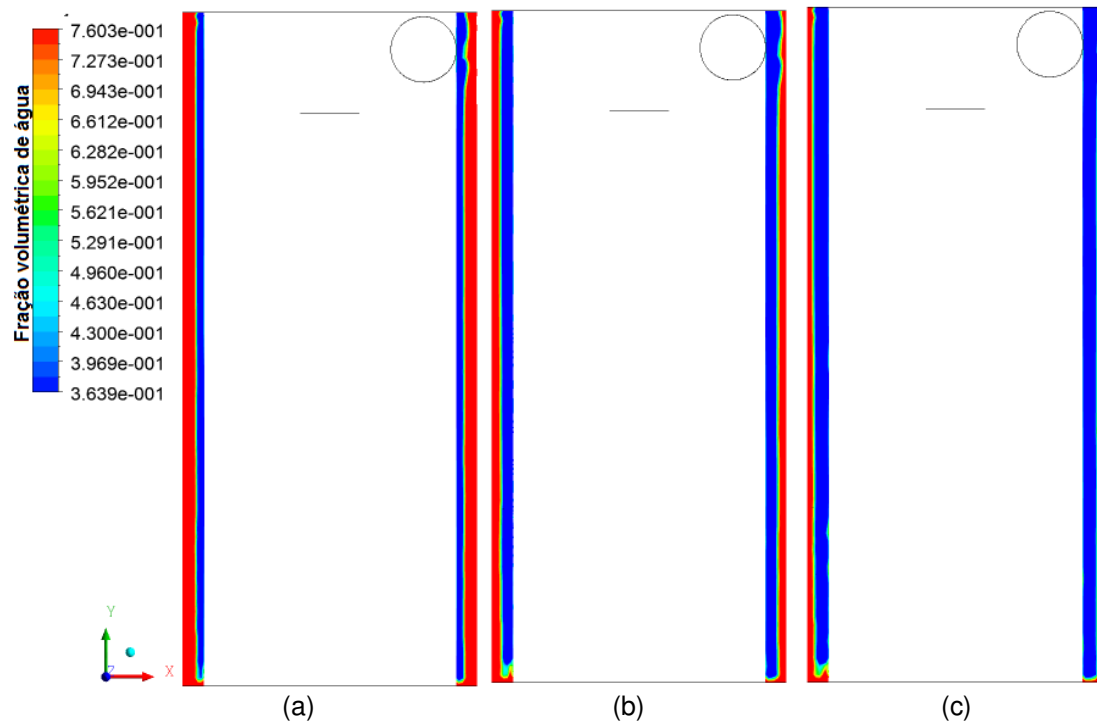


Figura 5.31: Campo vetorial de fração volumétrica de água na membrana cilíndrica sobre o plano XY para  $H_{ciF}(K_1-\epsilon_1)$ ,  $H_{ciF}(K_2-\epsilon_1)$ , e  $H_{ciF}(K_3-\epsilon_1)$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

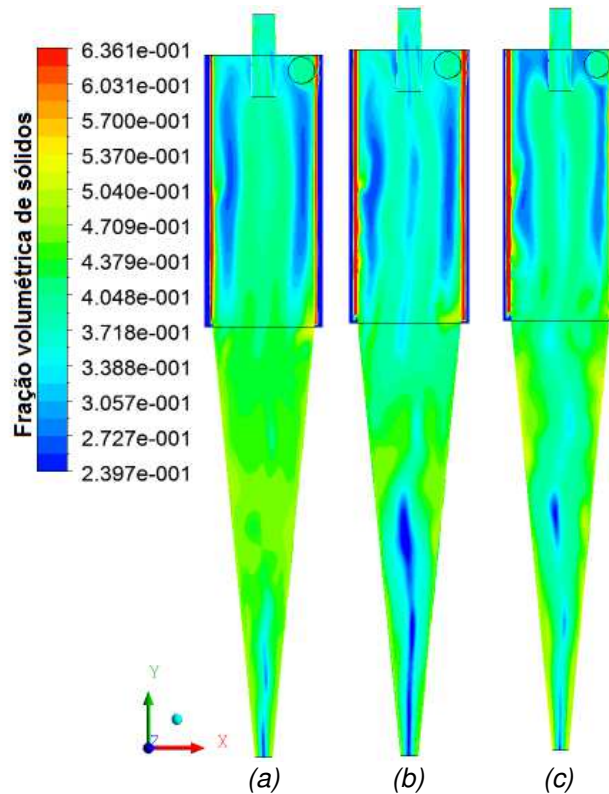


Figura 5.32: Campo de fração volumétrica de sólidos sobre o plano XY para  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ ,  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$ , e  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$  para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

#### 5.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS HIDROCICLONES CONVENCIONAL E FILTRANTE

Neste tópico é avaliado o efeito da posição do meio filtrante correlacionando um hidrociclone cilindro filtrante de permeabilidade  $1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  e porosidade 0,138 com o hidrociclone convencional, ambos com mesma geometria e vazão volumétrica de 295,7 cm<sup>3</sup>/s.

A Figura 5.33 representa o campo de pressão na posição longitudinal XY do  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  e um hidrociclone convencional (Hcon) ambos com vazão volumétrica de entrada 295,7cm<sup>3</sup>/s. A Figura ilustra que um campo de pressão para uma mesma vazão volumétrica de alimentação apresentou maior pressão nas proximidades das paredes do hidrociclone, tal processo é explicado pela presença do meio filtrante que proporciona uma vazão do filtrado reduzindo, assim, os gradientes de pressão nas proximidades da parede cilíndrica do hidrociclone quando comparado ao hidrociclone convencional.



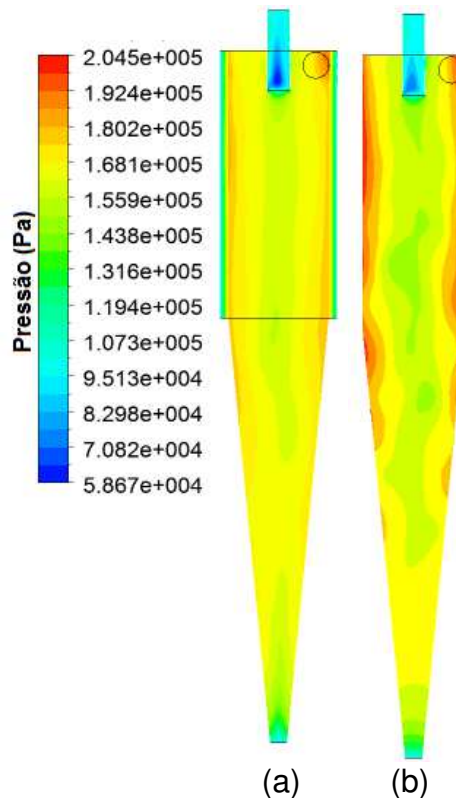


Figura 5.33: Campo de pressão sobre o plano XY para  $H_{ciF_{(K1-\epsilon1)}}$  (a) e  $H_{(Con)}$  (b) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

É observado que a presença da vazão de filtrado no hidrociclone de membrana filtrante alterou significativamente os perfis de velocidade axial, tangencial e radial em relação ao hidrociclone convencional Figuras 5.34, 5.35, 5.36. Em relação à velocidade axial aparece várias zonas de recirculação, em relação à velocidade tangencial é visto um aumento significativo em relação à membrana cilíndrica e cônica. Na velocidade radial é visto um aumento em relação às paredes.

O hidrociclone convencional possui uma queda de pressão maior que o hidrociclone com meio filtrante no qual ocasiona um número de Euler pouco maior do que o hidrociclone filtrante, ou seja, teve um gasto maior de energia para processamento, tal número de Euler encontrado no hidrociclone filtrante e convencional foram de 1012 e 1092, respectivamente.

Analisando a Figuras 5.34, 5.35 e 5.36, demonstra para o plano XY os campos de velocidade axial, tangencial e radial para  $H_{ciF_{(K1-\epsilon1)}}$  e  $H_{con}$ , ambos com vazão volumétrica de  $295\text{cm}^3/\text{s}$ . O campo centrífugo é diretamente proporcional a velocidade tangencial como ilustrado na Figura 5.36 e diretamente proporcional a eficiência de

separação, logo não se pode analisar separadamente a velocidade tangencial, tem-se que levar em conta a vazão do filtrado, velocidade axial e radial. Na velocidade radial conforme a Figura 5.36, é observado que existe um aumento em determinadas regiões na membrana cilíndrica, tal fato ocasiona partículas próxima a parede do hidrociclone e propicia a ser descarregado no orifício de “*underflow*”. Alterando a eficiência total, assim o hidrociclone convencional obteve uma eficiência maior que o filtrante, no caso o aumento foi de 12%.

Na Figura 5.39 representa-se o campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para  $H_{ciF(K1-\epsilon1)}$  (a) e  $H_{con}$  (b) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ . É visto próximo a saída de “*underflow*” que o aumento da fração volumétrica de água próximo ao eixo central em relação ao hidrociclone. De acordo com a Figura 5.40 campo de fração volumétrica de partícula sobre o plano XY para  $H_{ciF(K1-\epsilon1)}$  (a) e  $H_{con}$  (b) para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ , ocorre a diminuição da fração de partículas próximo a saída de *overflow*, diminuindo o fenômeno de curto circuito Figura 5.37 e 5.38 e melhorando a eficiência do hidrociclone convencional em relação ao filtrante.

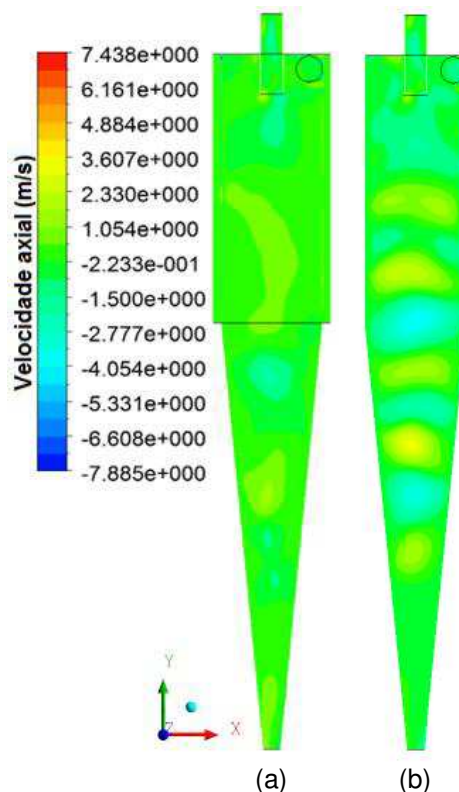


Figura 5.34: Campo de velocidade axial sobre o plano XY para (a)  $H_{ciF(K1-\epsilon1)}$  e (b)  $H_{con}$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

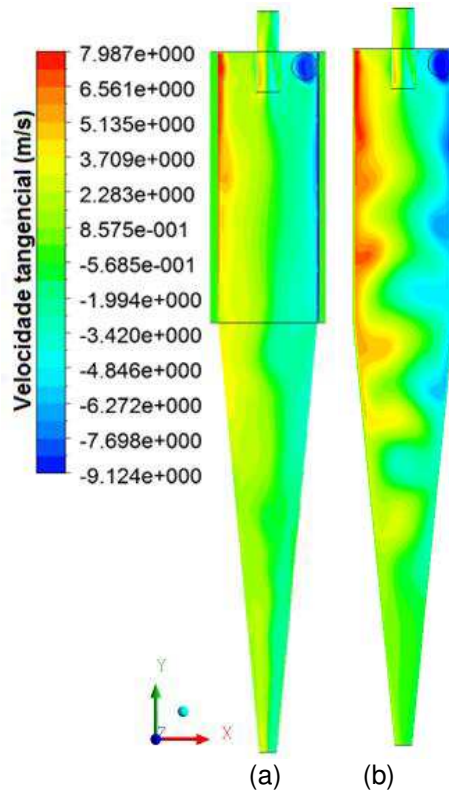


Figura 5.35: Campo de velocidade tangencial sobre o plano XY para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  e (b)  $Hcon$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

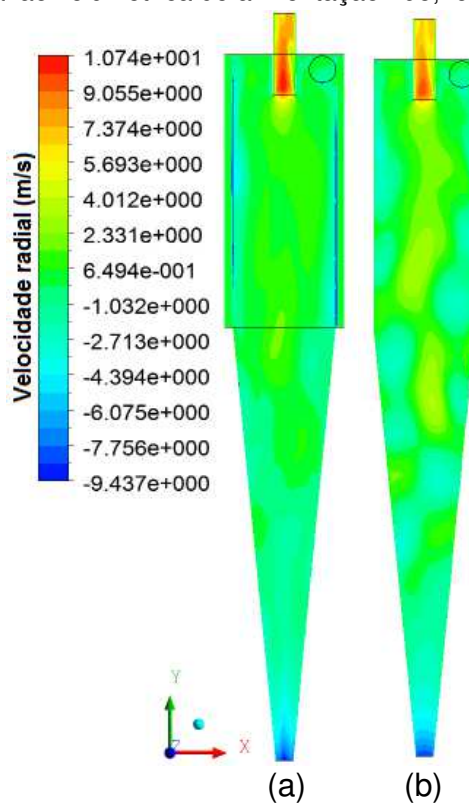


Figura 5.36: Campo de velocidade radial sobre o plano XY para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  e (b)  $Hcon$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

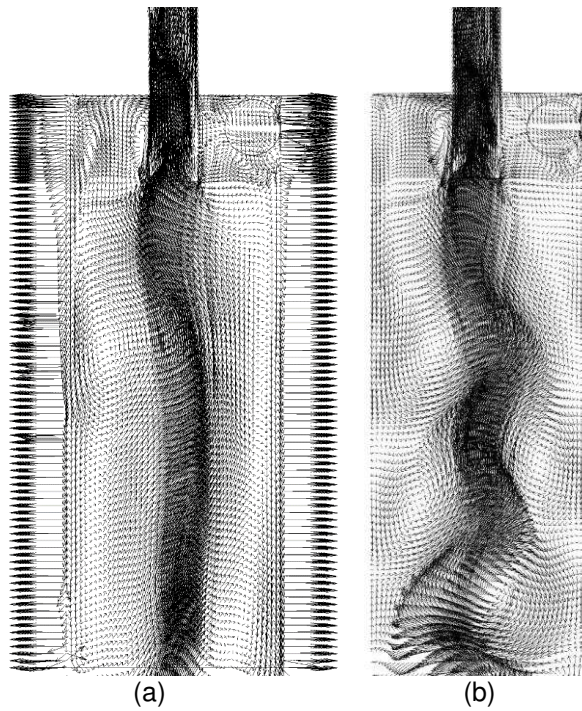


Figura 5.37: Campo vetorial da parte cilíndrica do escoamento do fluido no plano XY para (a)  $H_{ciF_{(K1-\epsilon_1)}}$  e (b)  $H_{con}$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

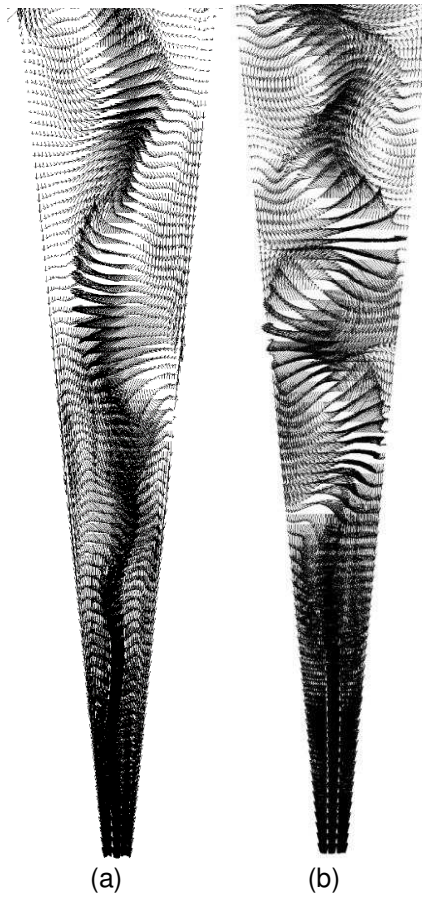


Figura 5.38: Campo vetorial da parte cilíndrica do escoamento do fluido no plano XY para (a)  $H_{ciF_{(K1-\epsilon_1)}}$  e (b)  $H_{con}$  para vazão volumétrica de alimentação  $295,7\text{cm}^3/\text{s}$ .

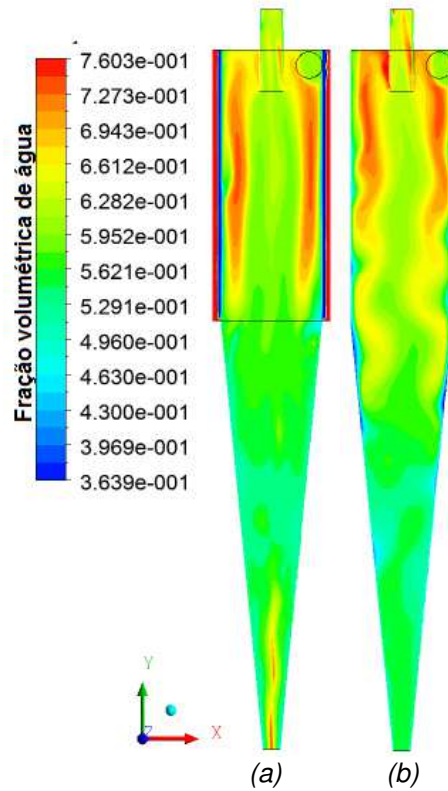


Figura 5.39: Campo de fração volumétrica de água sobre o plano XY para (a) HciF<sub>(K1-ε1)</sub> e (b) Hcon para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

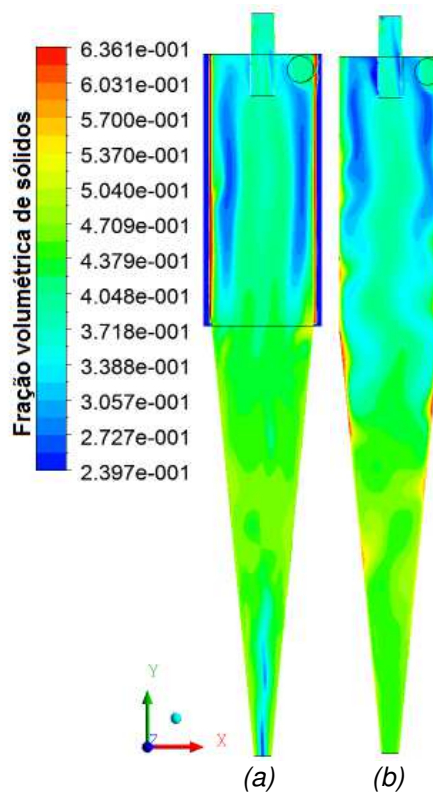


Figura 5.40: Campo de fração volumétrica de partícula sobre o plano XY para (a) HciF<sub>(K1-ε1)</sub> e (b) Hcon para vazão volumétrica de alimentação 295,7cm<sup>3</sup>/s.

## CONCLUSÕES

Com os resultados numéricos da simulação do processo de separação água-partícula sólida em hidrociclone cilíndrico filtrante pode-se concluir que:

- O modelo matemático utilizado permitiu avaliar adequadamente o comportamento fluidodinâmico do hidrociclone filtrante estudado;
- Os resultados das simulações indicam que a vazão volumétrica do filtrado afeta o escoamento interno do hidrociclone quando comparado com os resultados do hidrociclone convencional sem a parede cilíndrica porosa;
- Observou-se que as distribuições das pressões no interior do hidrociclone são afetadas pelas alterações da porosidade da parede cilíndrica e, conseqüentemente na vazão do filtrado da parede porosa;
- Pode-se observar que não houve um aumento significativo em relação à razão do líquido com o aumento da porosidade, não ultrapassando 1% ao alterar a porosidade dentro dos casos avaliados;
- A eficiência total em relação ao aumento de porosidade de  $\epsilon_1$  para  $\epsilon_2$  (diminuição da porosidade) uma diminuição de 3,8% na eficiência e de  $\epsilon_2$  para  $\epsilon_3$  um aumento somente de 0,2%. Esta diminuição está relacionada com as partículas que entram na membrana;
- O aumento da permeabilidade ocasionou aumento do número de Euler e, portanto, uma diminuição das componentes da velocidade no interior do hidrociclone e aumento da vazão volumétrica do filtrado;
- A razão do líquido praticamente não foi afetada em relação à vazão do filtrado, sendo praticamente baixo a variação, os valores encontrados foram 32,4% para  $K_1$ , 32,1% para  $K_2$  e 32% para  $K_3$ ;

- O aumento da eficiência do hidrociclone em relação à variação da permeabilidade foi 1% para  $K_1=1,71 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , 1% para  $K_2=2,95 \times 10^{-16}$  e 1,2% para  $K_3=3,60 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ;
- Para as mesmas condições geométricas e operacionais o hidrociclone convencional apresentou maiores gradientes de pressão nas proximidades das paredes cilíndrica comparado ao hidrociclone filtrante;
- O hidrociclone convencional se mostrou mais eficiente na separação partícula sólida/líquido do que o filtrante apresentando uma diferença de 12% a favor do hidrociclone convencional.

## SUGESTÕES DE TRABALHOS

- Avaliar a influência das forças interfaciais (sustentação, massa virtual e lubrificação parietal) sobre o desempenho hidrociclone cilíndrico filtrante;
- Avaliar o processo de separação para diferentes permeabilidades e porosidades em um hidrociclone com membrana cilíndrica e cônica simultaneamente;
- Analisar o processo de separação do hidrociclone cilíndrico filtrante na presença de efeitos térmicos;
- Analisar o efeito da geometria no processo de separação água/partícula sólida com o objetivo de otimizar o processo de separação em hidrociclone cilíndrico filtrante.



## REFERÊNCIAS

ALEIXO, L. A. G.; TACHIBANA, T. I.; CASAGRANDE, D. Poluição por óleo – Formas de introdução de petróleo e derivados no meio ambiente. **Revista Integração**. São Paulo, Ano XII, n.49, p.159-166, 2007.

ALHO, A. T. P.; ILHA, A. Simulação numérica de escoamentos complexos. **Anais da V escola de primavera em transição e turbulência**, p.414, 2006.

ALMEIDA, C. K. A. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

ARRUDA, E. B.; KOBOLDT, C.A.; VIEIRA, L.G.M.; BARROZO, J.J.R. Avaliação do comportamento de hidrociclones filtrantes de Krebs. *In: XXX Encontro nacional sobre escoamento em meios porosos, São Carlos, 2002.*

ARRUDA, E. B. **Performance de hidrociclones filtrantes de geometria demco**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

BARBOSA, E. A. **Performance de hidrociclones Filtrantes com Geometria Demco**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

BARBOSA, E. A.; KOBOLDT, C. A.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Avaliação do comportamento de hidrociclones filtrantes de Krebs. *In: XXX Encontro Nacional sobre escoamento em meios porosos, São Carlos, 2002.*

BARBOSA, E.S.; **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria do**

petróleo. Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

BARROZO, M. A. S., DAMASCENO, J.J.R; LANNA, A. E. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. **Revista Ciência & Engenharia**. Uberlândia, p. 175-186, 1992.

BERWALDT, A. P. S., **Simulação numérica de escoamento ao redor de cilindro circular oscilando segundo trajetórias em forma de oito, arco e intermediárias**, Dissertação, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BHASKAR, K.U; RAMA MURTHY, Y.; RAMAKRISHNAN, N.; SRIVASTAVA, J.K, SARKAR, S.; KUMAR, V., CFD validation for flyash particle classification in hydrocyclones. **Mineral Engineering**, v.20, p.290-302, 2007.

BRADSHAW, P. Understanding and prediction of turbulent flow, **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.18, n.1, pp. 45-54, 1997.

BURITI, C.J.O., **Aplicação de um hidrociclone no processo de separação de fluidos multifásico óleo/água/areia durante produção de petróleo**, Monografia PRH- 25/ANP-UFCG, 2009.

Cepetro – Centro de Pesquisas sobre petróleo. Teorias sobre a possível origem do petróleo. Fonte Apostila da petrobras. Disponível em: <http://www.cepetro.unicamp.br/petroleo/origem.html>. Acesso em: abril de 2013.

CORREA JUNIOR, C. A. **Desenvolvimento de um modelo computacional de previsão de quebra de gotas em simulador de separação de óleo e água em um hidrociclone**. Dissertação, Instituto Politécnico, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2008.

CRUZ, C. C.; ZANINI, J. R. I Eficiência de um hidrociclone de geometria “rietema” para pré-filtragem de água para. **Brazilian Journal of Chemical Engineering. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.4, p.637-645, jul./ago. 2010.**

Cunha, A. **Tratamento de efluentes da indústria de petróleo via membranas cerâmicas – modelagem e simulação.** Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

CUNHA, G. M. A; CHIAVONE FILHO, O.; SILVA, D. N.; NASCIMENTO, C. A. O. Tratamento de águas produzidas em campos de petróleo: estudo de caso da estação Guamaré/RN. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (COBEC2010).** Campinas, p. 1-6. 6, 2005.

DAMASCENO, J. J. R.; MASSARANI, G. Estudo de um sedimentador contínuo com fundo filtrante. In: XIV **Encontro Nacional Sobre Escoamento em Meios Porosos. Campinas, p.283-290, 1986.**

DOBY, M. J.; NOWAKOWSKI, A. F.; YIU, I.; DVAKOWSKI, T. Understanding air core formation in hydrocyclones by studying pressure distribution as a function of viscosity. **Minerals Engineering.** Vol 86, p.18–25, 2008.

FAÇANHA, J. M. F. **Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido – líquido em hidrociclones.** Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

FAHLLSTROM, P. H. Int. Min. Processing Congress, p.632-643, 1960.

FARIAS NETO, S. R., FARIAS, F. P. M., DELGADO J. M. P. Q., LIMA, A. G. B., CUNHA, A. L., **Cyclone: Their characteristics and technological applications,** industrial and Technological Applications of Transport in Porous Materials. Series: Advanced Structured Materials. 1ed.Heidelberg (Germany): Springer-Verlag, v. 36, pp. 1-36, 2013.

FARIAS, F. P. M.; BURITI, C.; LIMA, W.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. The effect of droplet diameter on the separation of heavy-oil from water using a hydrocyclone. **Defect and Diffusion Forum**, v. 303-304, p. 131–137, 2010.

FARIAS, F. P. M.; LIMA, A. G. B.; NETO, S. R. F. Influência do duto de saída inferior do ciclone utilizado como secador: Modelagem e simulação. In: XVII **Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ2010)**. Recife, p. 1–8. 135, 2008.

FARIAS, F. P. M.; NETO, S. R. de F.; LIMA, A. G. B. de; BURITI, C. J. O.; Performance of the water/glycerine separation by hydrocyclone. In: **The 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2008) & 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008)**. Venice: University of Padua and Politecnico di Milano, 2008.

FARIAS, F.P.M.; BURITI, C.J.O.; LIMA, W.C.P.B. de; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B.; **Simulação Numérica do Processo de Separação Areia/Água/Óleos Pesados em Hidrociclones**. In: Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, v. 1. p. 1-14. 2009.

FILGUEIRAS, N. G. T. **Modelagem, Análise e controle de um processo de separação óleo/água**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

Fisher, M.J., Flack R.D. Velocity distributions in a hydrocyclone separator, **Experiments in Fluids**, Vol. 32, pp 302-312. 2002.

GOMES, E. A. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo por eletroflotação e processo fenton**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracaju, 2009.

GONÇALVES, M. G. **Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador**. 109p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2016.

GONÇALVES, S. M.; SALVADOR, F.; BARROSO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. **INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS NA ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE CONCENTRADOR OTIMIZADO**. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos, 2015.

HARGREAVES, J. H., SILVESTER, R.S.; Computational fluid dynamics applied to the analysis of deoling hydroclone performance. **Institution of Chemical Engineers**, Vol. 68, part A, 1990.

HENRIQUE, H.M., BARROZO, M.A.S., DAMASCENO, J.J.R., “**Estudo da Dinâmica de um Sedimentador Filtrante**”, XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Uberlândia, p.303-310, 1987.

HUSVEG, T., RAMBEAU, O., DRENGSTIG, T., BILSTAD, T. Performance of deoling hydrocyclone during variables flow rates. **Minerals Engineering** Vol. 20, pp. 368-379, 2007.

INCROPERA, F.P., WITT, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Ed. Guanabara Koogan, 1992.

INOUE, F.K., **Modelagem matemática em obras hidráulicas**. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPA, Paraná, 2009.

KYRIAKIDIS, Y. N.; SALVADOR, F. F.; BARROSO, M. A.S.; VIEIRA, L.G.M. Efeito da filtração no desempenho energético do Hidrociclone HCICOF em relação aos separadores HCIF e HCOF. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Goiania, Brasil, 2013.

LACERDA, A. F. **Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LANA, A. E.; BARROZO, M. A. S; DAMASCENO, J. J. R. Estudo do desempenho de um hidrociclone filtrante. **Revista Ciência & Engenharia**, Uberlândia, 1992.

LÉDO, P, G. **Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de moringa oleifera como coagulantes**. Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LIMA, U.A.; AQUARONE, E.;BORZANI, W.;SCHIMEDELL. **Biotecnologia Industrial**. São Paulo:Edgard Blucher, 2001.

LOUZADA, C. G. **Flotação seletiva entre calcita e apatita utilizando-se ácido fosfórico e ácido cítrico como depressores**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

LUNA, F. D. T. **Estudo numérico do processo de separação de um sistema bifásico em separadores ciclônicos**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

MARINS, L. P. M. **Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, Rio de Janeiro - RJ, 2007.

MARTINS, D. A., PADILHA, E., SILVEIRA NETO, A., **Implementação do Modelo de Turbulência  $k - \omega$  SST em uma Cavidade Tridimensional**, 17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

MARTINS, M. P. B.; SILVA, N. K. G.; BARROSO, M. A. S. **Análise do diâmetro do orifício de underflow em um hidrociclone filtrante ótimo (hfot 1)**. In: X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica. Vassouras, 2013.

MASSARANI, G. **Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones**. In: XVII Encontro nacional sobre escoamento em meios porosos. São Carlos, 1989.

MASSI, L.; SOUSA, S. R.; LALUCE, C.; JAVELICCI, M. Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas. **Química na nova escola**. São Paulo, n.28, 2008.

MELO, C. H. **Modelagem da classificação de minério de ferros em hidrociclones**. Monografia. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MENTER F. R. Two-equation turbulence-models for engineering applications. **AIAA Journal**, v. 32, nº 8, pp.1598-605, 1994.

MONREDON, T.C., HSIEH, K.T., RAJAMANI, R.K., Fluid flow of the hydrocyclone:an investigation of device dimensions. **International Journal of Mineral Processing**, v.35, p 65–83, 1992.

MOUSAVIAN, S.M., NAJAFI, A.F. Numerical simulations of gas-liquid-solid flows in a hydrocyclone separator. **Arch Appl Mech**. 2008.

MUCK, K. C., HOFFMANN, P. H., BRADSHAW, P., The effect of convex surface curvature on turbulent boundary layer, **Journal of Fluid Mechanics**, v.161, pp.347-369, 1985.

MUNSON, B. R., OKIISHI, T. H., YONG, D. F., **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**, EDGARD BLUCHER, p. 568, 2004.

NEESSE, T.; DUECK, J. Air Core formation in the hydrocyclone, Minerals Engineering, **Minerals Engineering**. Vol 20, p.349–354, 2007.

NEESSE, T.; SCHNEIDER, M.; GOLYK, V.; TIEFEL, H. Measuring the operating state of the hydrocyclone, Minerals Engineering. **Minerals Engineering**. Vol 17, p.697–703, 2004.

NOLETO L. G., **Estudo Numérico do escoamento turbulento em Modelos Florestais**, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2006.

NOWAKOWSKI, A. F.; YIU, I.; Kraipech, W.; DVAKOWSKI, T. Williams, R. The hydrodynamics of a hydrocyclone based on a threedimensional multi-continuum mode. **Chemical Engineering Journal**, Vol 80, p.275–282, 2000.

OLIVEIRA, D. C.; ALMEIDA, C. A. K.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO. J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Influence of geometric dimensions on the performance of a Filtering Hydrocyclone: an experimental and cfd Study. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v.26, n.3, p.575-582, 2009.

PALADINO, E., E. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial**. 263p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

RAPOSO, G. M.; **Simulação numérica do escoamento em hidrociclone destinado a Aplicações de alto teor de óleo**. Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação em Mecânica, PUC-Rio, 2008.

REGO, F. C. A. **Estudo do hidrociclone cilíndrico de uma unidade de flotação centrífuga com auxílio de fluidodinâmica computacional**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.



RIETEMA, K. Performance and design of hidrociclone. **Chemical Engineering Science**, Vol. 15, p.298-325, 1961.

RODRIGUES, M. V.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Analysis of the efficiency of a cloth cyclone: the effect of the permeability of the filtering medium. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. Vol 20. n.04, p.435–443, 2003.

ROSA, J.J.; **Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação** – Processo FF, Tese de doutorado na PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 2002.

SALVADOR, F. F.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. effect of a cylindrical permeable wall on the performance of hydrocyclones. **Chemical Engineering Technology**. . Vol 39. n.06, p.1015–1022, 2016.

SALVADOR, F. F.; KYRIAKIDIS, Y. N.; GONÇALVES, S. M.; BARROSO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. **Estudo do efeito da permeabilidade na performance do hidrociclone cilíndrico filtrante**. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos, 2015.

SALVADOR, F. F.; SILVA, D. O.; BARROSO, M. A. S; VIEIRA, L. G. M. **Influência da concentração volumétrica na alimentação de hidrociclones filtrantes**. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Goiania, 2013.

SALVADOR, F. F.; SILVA, N. K. G.; BARROSO, M. A. S; VIEIRA, L. G. M. **Estudo experimental do tipo de separação de partículas em um hidrociclone concentrador**. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis, 2014.

SANTOS, J. S. S.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B.; CRIVELARO, K. C. O. **Transporte de Óleos Pesados em Catenárias Via Técnica Core-Flow** –

**Modelagem e Simulação.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande-PB, (2010).

SCHLICHTING, H., GERSTEN, K., **Boundary-Layer Theory**, ISBN 3540662707, 8th ed., 2000.

SILOTTI, T. O.; EDDINE, V. P. K.; SILVA, N. K. G.; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. **Estudo de uma geometria de hidrociclone filtrante com a mínima razão de líquido.** In: XIX Jornada em engenharia química, Uberlândia , 2014.

SILVA, C. R. R. **Água produzida na extração de petróleo.** Monografia. Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais a indústria. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola Politécnica, São Paulo, 2000.

SILVA, D. O. **Otimização da separação sólido líquido em hidrociclones mediante a modificações geométricas.** 189p. Tese (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.

SILVA, M. A. P.; MEDRONHO, R. A. **Modelos que preveem o desempenho de hidrociclones: uma avaliação crítica.** In: XVI Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos. Petrópolis, Brasil, p.353-361, 1988.

SILVA, N. K. G.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. Effects of underflow diameter and vortex finder length on the performance of a newly designed filtering hydrocyclone. **Powder Technology.** V.286, p. 305–310, 2015.

SILVA, P. R. da. **Transporte marítimo de petróleo e derivados na costa brasileira: estrutura e implicações ambientais.** Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ciências em Planejamento Energético, COPPE, Rio de Janeiro. 2004.

SILVA, R. C. R. **Alteração da Molhabilidade de Superfícies Internas de Tubulações Utilizadas no Transporte de Óleos Pesados Via Core-Flow.** 71p.

Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Universidade Estadual de Campina, Campinas-SP, 2003.

SIMÕES, A.M.B.M. **Separação de água-óleo derramado no mar usando hidrociclone: Um estudo numérico da intensidade turbilhonar provocado pelo duto de alimentação**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande, PB- Brasil. 2008.

SIMÕES, A.M.B.M., FARIAS NETO, S.R., CAVALCANTI, R.S.; **Avaliação da intensidade turbilhonar em um corpo cilíndrico-cônico via CFX**, In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Curitiba, 2004.

SLACK, M.D, PRASAD, R O.,BOYSAN, F., Advances in cyclone modeling using unstructure grids. **Trans IChemE**, v. 78, p.78-89, 2000.

SOCOL O. J.; RODRIGUES, L. N.; BOTREL, T. A.; ULLMANN, M. N. Evaluation of hydrocyclone as pre-filter in Irrigation system. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. V.50, n.2, p.193-199, 2007.

Souza, F. J. **Análise da influência do meio filtrante no comportamento do hidrociclone filtrante**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1999.

SOUZA, F. J.; NETO, A. S. G.; BARROSO, M. A. S. **Simulação numérica de escoamentos turbulentos em hidrociclones com modelagem sub malha**. In: II Escola Brasileira de transição e turbulência . Uberlândia, 2000.

SOUZA, J.A.R.; **Secagem de sólidos via ciclones: modelagem e simulação**, Tese de doutorado em Engenharia de Processos, UFCG, 2012.

SVAROVSKY, L. **Solid-liquid Separation**. London: Butterwords,1981.

TAVARES, D. P. S. **Escoamento Trifásico Não-Isotérmico em oleodutos Horizontais com Vazamento: Modelagem e Simulação**. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.

TAVARES, J. T. **Abordagem química do beneficiamento mineral**. Monografia. Instituto de ciências exatas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

THOMAS, J.E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TONIN, P. C. **Otimização computacional de hidrociclone na irrigação pressurizada**. 92p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2012.

TU, J; YEOH, G. H.; CHAOQUN, L. **Computational fluid dynamics**. 1edD. 2008. 470p

VEERSTEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 503p., 2 ed., England: Ed. Pearson Education Limited, 2007.

VERARDI, M., **Análise do escoamento e da geração de ruídos no sistema de ventilação externo de um motor de indução trifásico**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VIEIRA, L. G. M.; BARBOSA, E. A.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Performance analysis and design of filtering hydrocyclones. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. Vol 22. n.01, p.143–152, 2005.

VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. I Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator. **Minerals Engineering**. Vol 56, p.50–56, 2014.

VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. Vol 49, p.460–467, 2010.

VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.49, p. 460 – 467, 2007.

VIEIRA, L. G. M.; DANILLO, O. S.; BARROZO, M. A. S. Effect of inlet diameter on the performance of a filtering hydrocyclone separator. **Chemical Engineering Technology**. Vol 39. n.08, p.1406–1412, 2016.

VIEIRA, L. G. M.; SILVA JUNIOR, C. A.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. A study of the fluid dynamic behaviour of filtering hydrocyclones. **Separation and Purification Technology**. n.58, p.282–287, 2007.

VIEIRA, L.G.M, “**Estudo da Performance de hidrociclones Filtrantes de Rietema**”, Dissertação de Mestrado, 141p., UFU, Uberlândia, MG, 2001.

VIEIRA, L.G.M.; **Otimização dos Processos de Separação em hidrociclones Filtrantes**, tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

VIEIRA, L.G.M. **Análise da separação sólido – líquido em hidrociclone filtrante**, Relatório de iniciação científica, UFU, Uberlândia 1997.

WANG, B.; YU, A. B. Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions, Minerals Engineering . **Minerals Engineering**. Vol 19, p.1022–1033, 2006.

Yurdem, H.; DEMIR, V.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of a mathematical model to predict clean water head losses in hydrocyclone filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. **biosystems engineering**. v.105, p.495-506, 2010.

## APÊNDICE

Para o cálculo do campo de pressão, perfis de velocidades axial, tangencial e radial nos hidrociclones cilíndrico filtrante e convencional, foram construídas 4 linhas na posição Z para alturas  $y=50\text{ mm}, 90\text{ mm}, 150\text{ mm}, 180\text{ mm}$  conforme Figura 8.1.

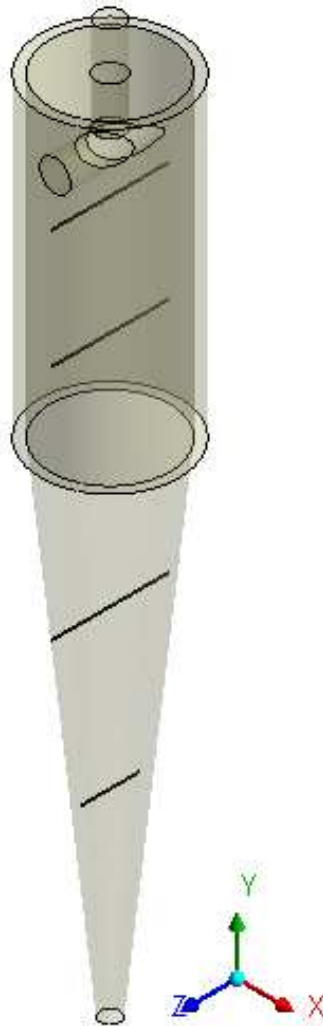


Figura 8.1: Posição Z e linhas para alturas  $y=50\text{ mm}, 90\text{ mm}, 150\text{ mm}, 180\text{ mm}$  para construção de campo de pressão e perfis de velocidade axial, tangencia e radial.

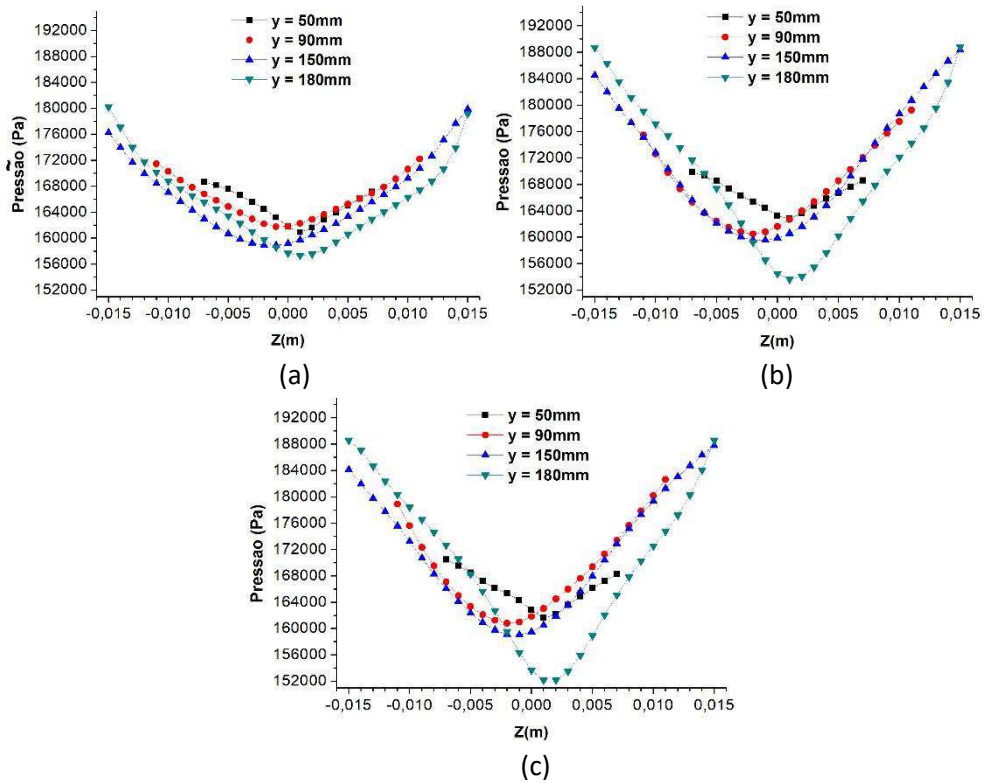


Figura 8.2: Campo de pressão para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ , (b)  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  e (c)  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$ .

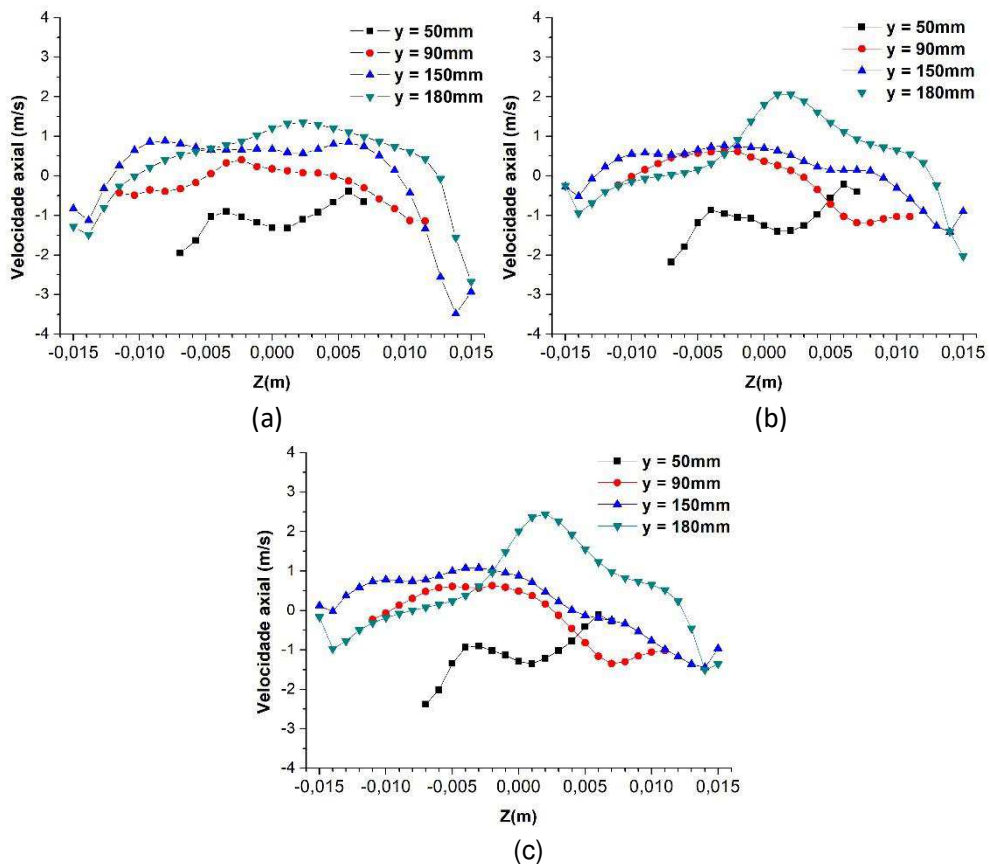


Figura 8.3: Perfil de velocidade axial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ , (b)  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  e (c)  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$ .



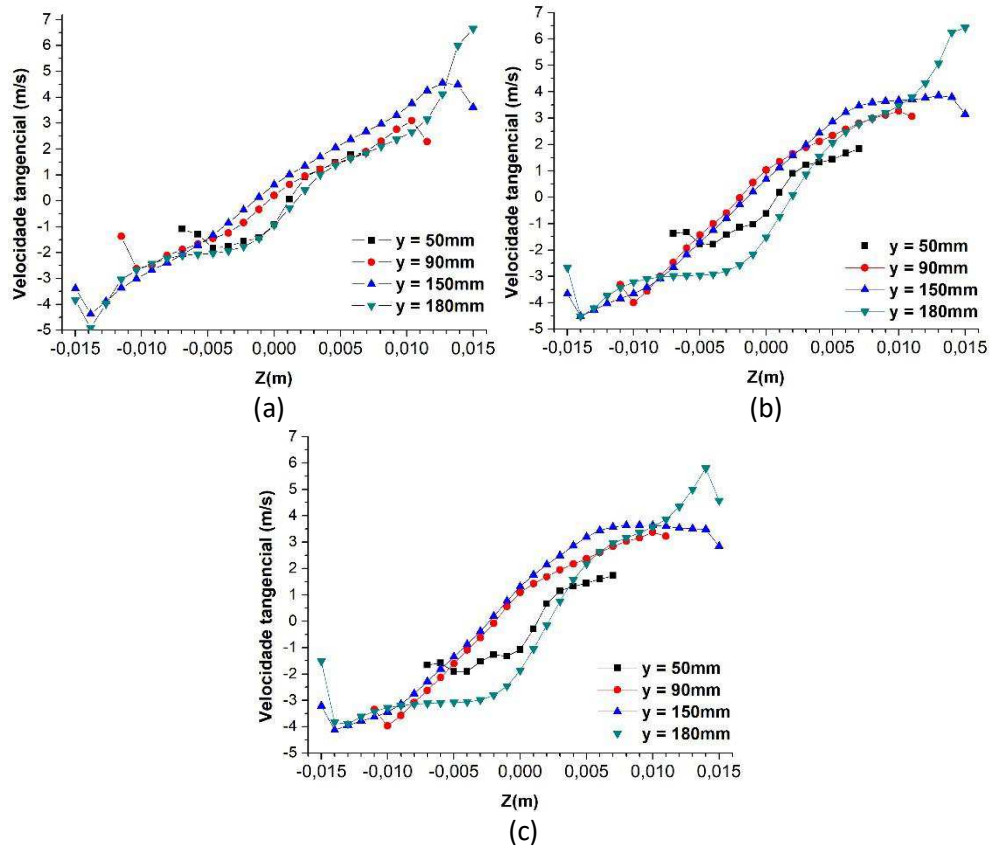


Figura 8.4: Perfil de velocidade tangencial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ , (b)  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  e (c)  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$ ,

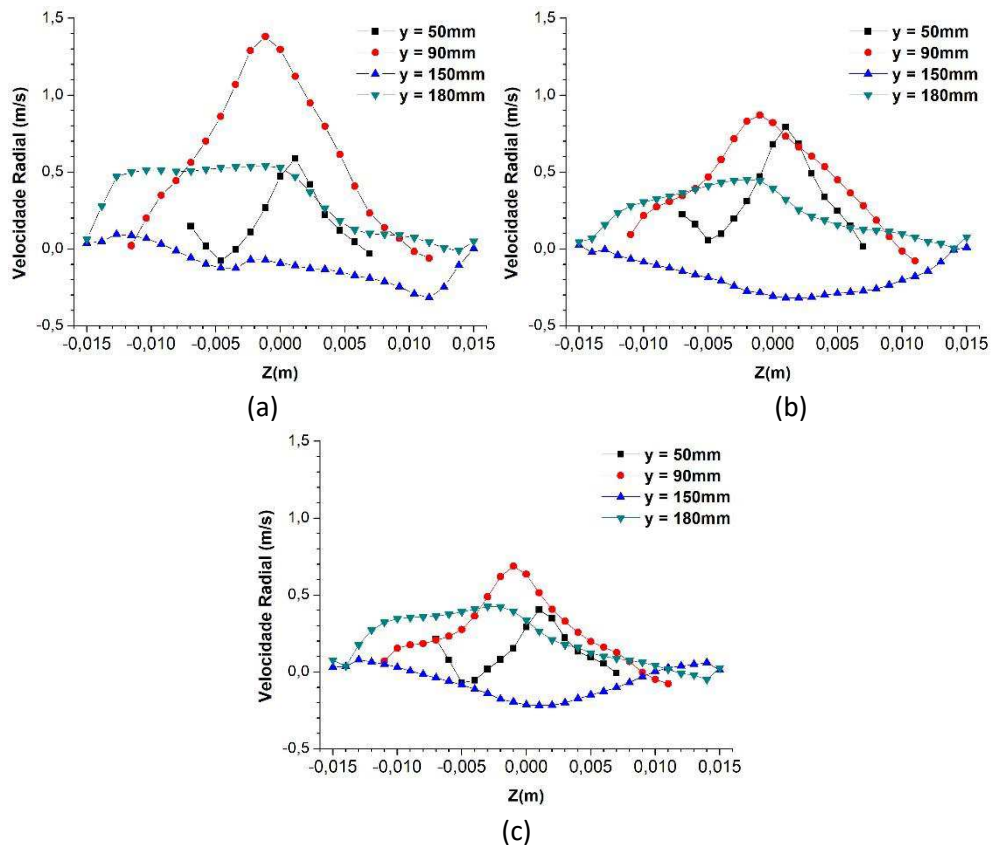


Figura 8.5: Perfil de velocidade radial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ , (b)  $HciF_{(K1-\epsilon2)}$  e (c)  $HciF_{(K1-\epsilon3)}$ ,

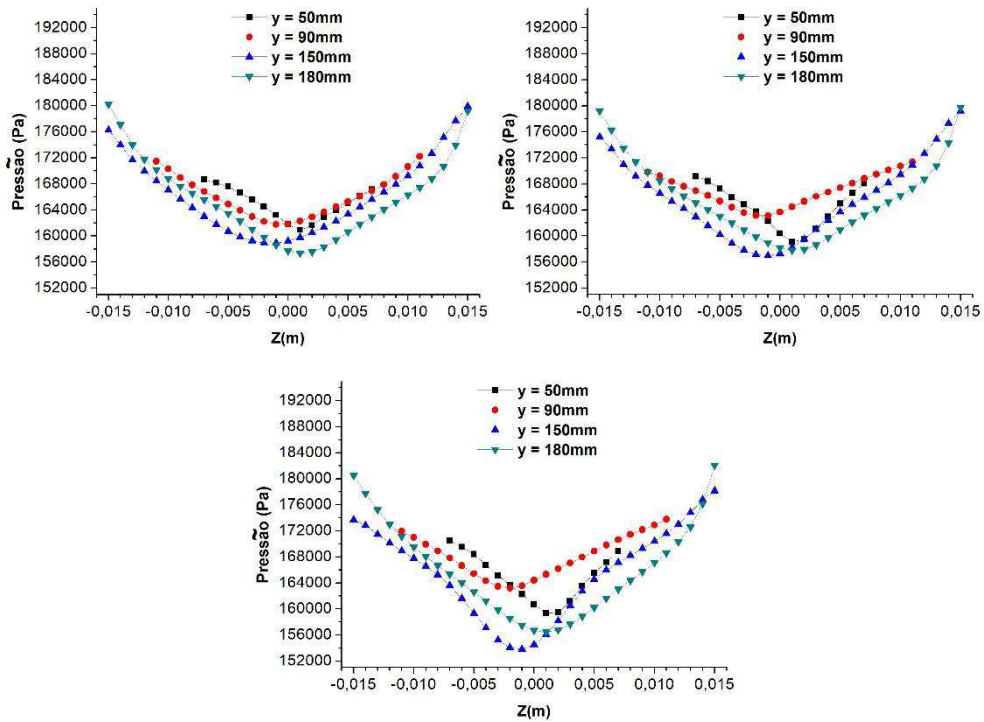


Figura 8.6: Campo de pressão para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , (b)  $HciF_{(K2-\epsilon_1)}$  e (c)  $HciF_{(K3-\epsilon_1)}$ ,

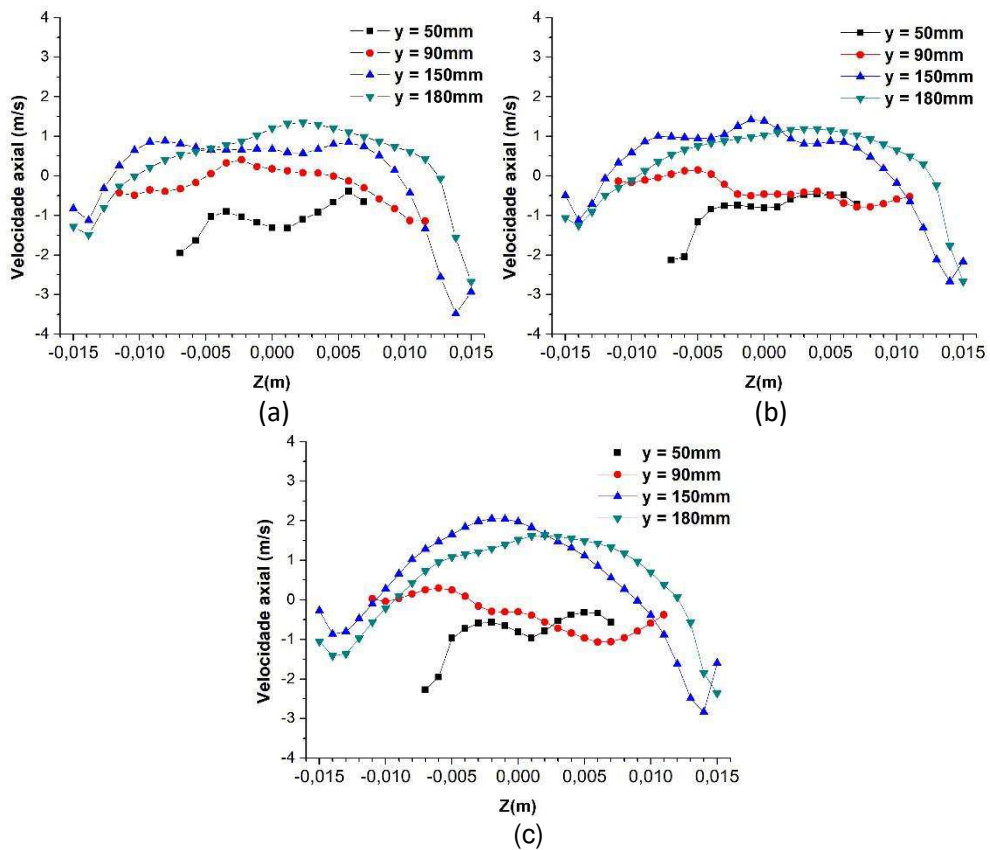


Figura 8.7: Perfil de velocidade axial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon_1)}$ , (b)  $HciF_{(K2-\epsilon_1)}$  e (c)  $HciF_{(K3-\epsilon_1)}$ ,

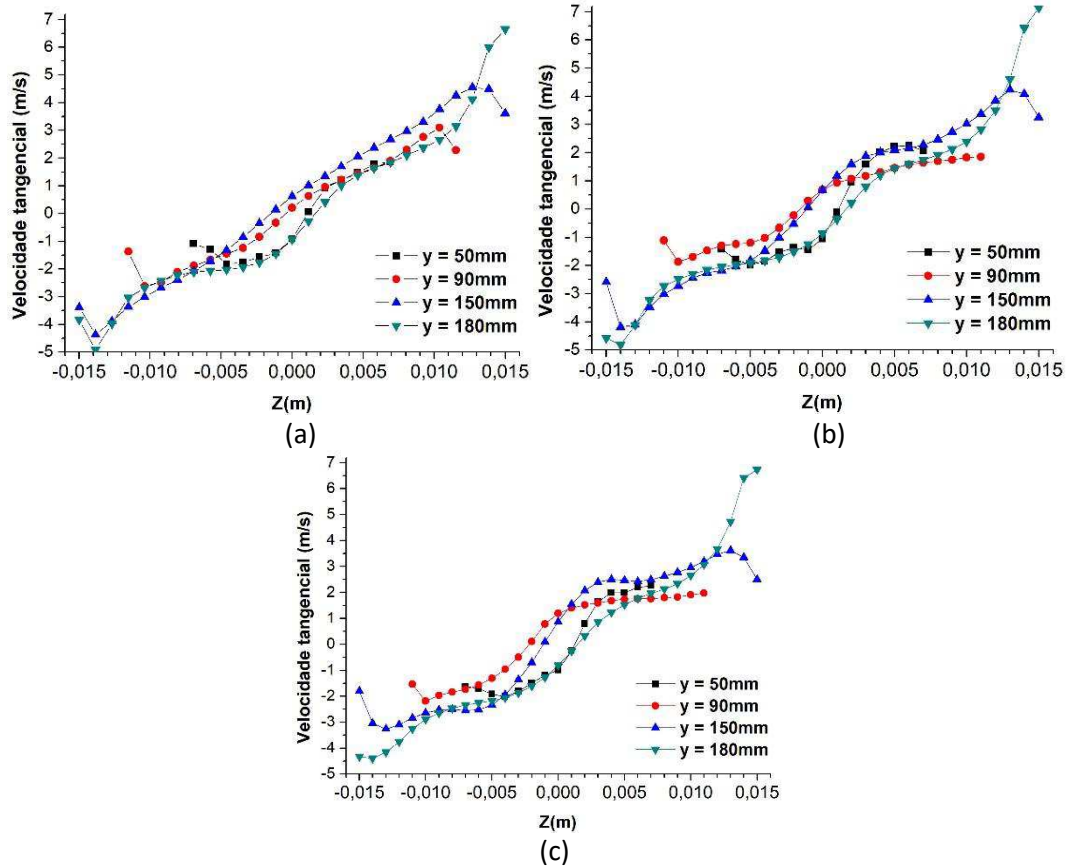


Figura 8.8: Perfil de velocidade tangencial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ , (b)  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$  e (c)  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$ ,

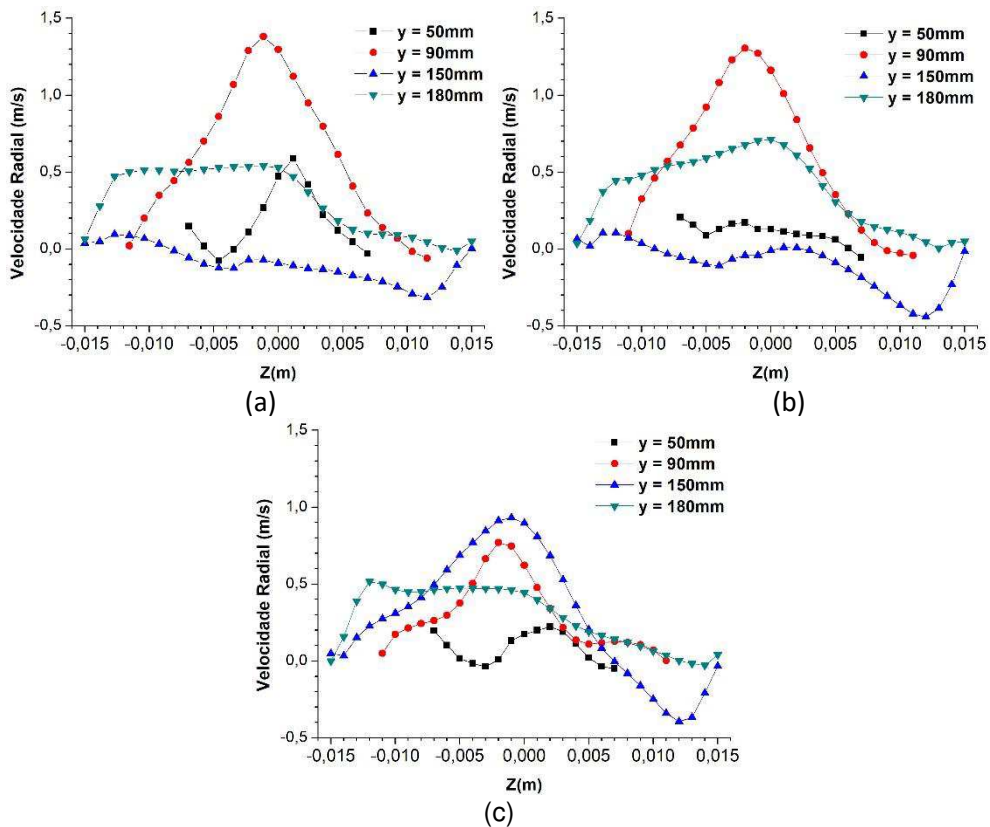


Figura 8.9: Perfil de velocidade radial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$ , (b)  $HciF_{(K2-\epsilon1)}$  e (c)  $HciF_{(K3-\epsilon1)}$ ,

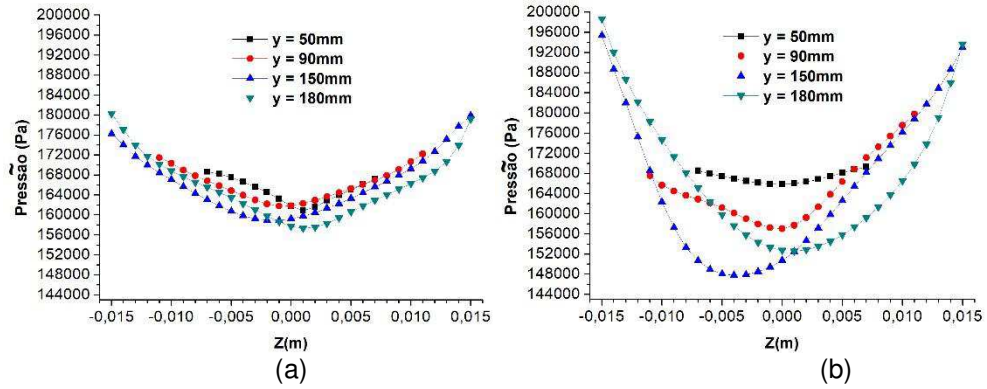


Figura 8.10: Campo de pressão para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a) HciF<sub>(K1-ε<sub>1</sub>)</sub> e (b) Hcon

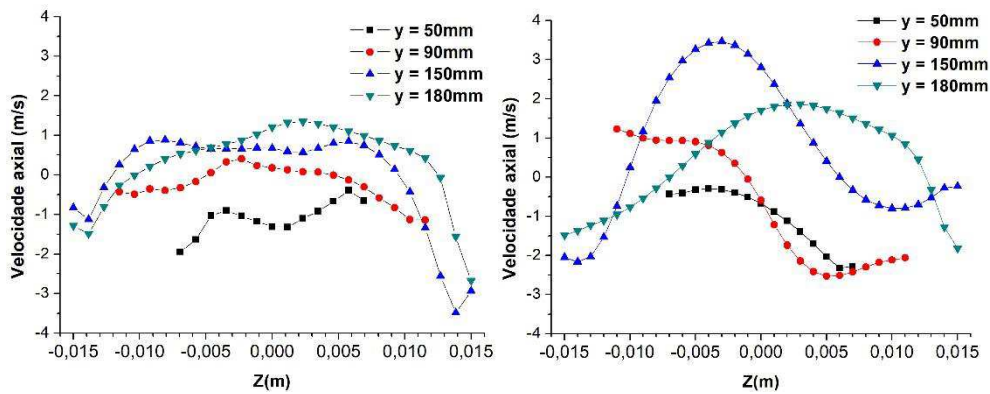


Figura 8.11: Perfil de velocidade axial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a) HciF<sub>(K1-ε<sub>1</sub>)</sub> e (b) Hcon

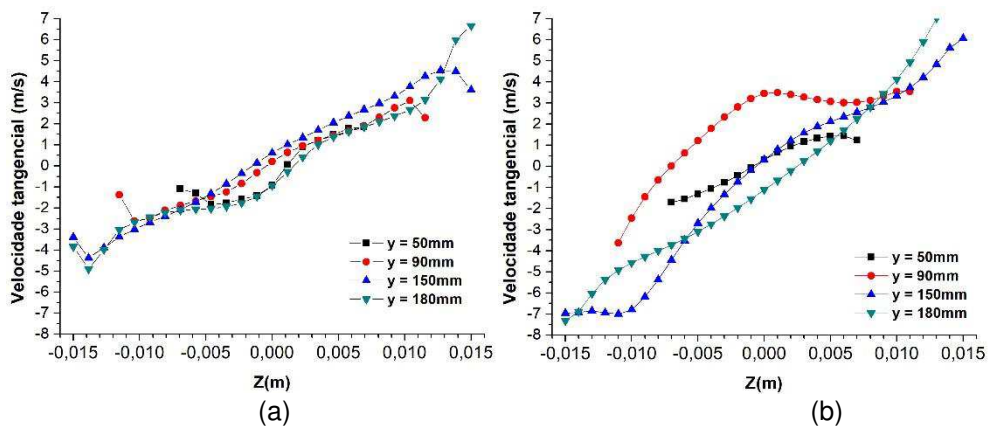


Figura 8.12: Perfil de velocidade tangencial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a) HciF<sub>(K1-ε<sub>1</sub>)</sub> e (b) Hcon

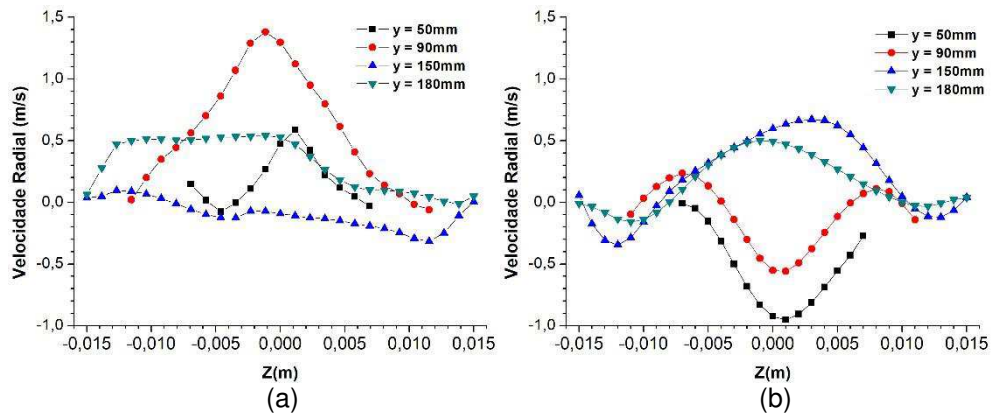


Figura 8.13: Perfil de velocidade radial para posição Z e Y=50 mm,90 mm,150 mm,180mm para (a)  $HciF_{(K1-\epsilon1)}$  e (b) Hcon