



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE UM  
HIDROCICLONE COM CONE E CILINDRO FILTRANTES**

**Fernanda Falqueto Salvador**

**Uberlândia – MG**

**2013**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



## **ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE UM HIDROCICLONE COM CONE E CILINDRO FILTRANTES**

Fernanda Falqueto Salvador

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira

Marcos Antonio de Souza Barrozo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Uberlândia – MG**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

---

S182e Salvador, Fernanda Falqueto, 1988-  
2013 Estudo experimental do comportamento de um hidrociclone com  
cone e cilindro filtrantes / Fernanda Falqueto Salvador. - 2013.  
119 f. : il.

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira e Marcos Antonio de  
Souza Barrozo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-  
grama de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Hidrociclone - Teses. 3. Filtros e  
filtração - Teses. I. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976- II. Barrozo,  
Marcos Antonio de Souza. III. Universidade Federal de Uberlândia.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

---

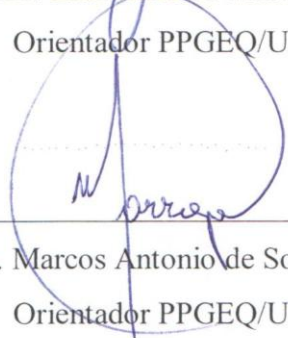
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 23 DE JULHO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:




---

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira  
Orientador PPGEQ/UFU



---

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
Orientador PPGEQ/UFU



---

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva  
FEQUI/UFU



---

Prof. Dr. André Carlos Silva  
DEMIN/CAC/UFU

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela sua benção e proteção em todos os momentos da minha vida. À minha mãe, Sandra, e meu pai, Edson, que sempre estiveram ao meu lado, me encorajando a seguir em frente por mais difícil que fosse o caminho. À minha irmã, Eduarda, com quem compartilho momentos de muita alegria. Aos meus familiares e amigos que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento profissional e pessoal.

Às amigas Betânia Braz Romão, Taciana Soares do Carmo e Tais Abrantes que me acolheram e foram essenciais para que esses dois anos em Uberlândia fossem os melhores possíveis, dividindo comigo diversos momentos de alegria, mas também de preocupações.

À Nathacha Kare, amiga e companheira de laboratório, que esteve sempre presente durante a execução deste trabalho, compartilhando comigo todo seu conhecimento e também as dificuldades que tive durante esse último semestre.

Aos colegas de laboratório Marcus Paulo Barbosa, Luiz Gustavo Abdalla e João Paulo Siqueira, que estiveram sempre dispostos a ajudar e tornaram os dias no laboratório mais alegres e agradáveis.

Ao Curt Max Panisset que deu dicas valiosas para a execução deste trabalho e pela ajuda nas diversas dúvidas e dificuldades que apareciam.

Ao Danylo de Oliveira Silva, que como colega de pós-graduação, me transmitiu seu conhecimento sobre laboratório e, como professor, contribuiu para a melhoria desta dissertação.

Ao meu orientador Luiz Gustavo Martins Vieira, pelo apoio ao longo desses dois anos, pela confiança em mim depositada e por toda dedicação, profissionalismo e ensinamentos.

Ao meu também orientador Marcos Antonio de Souza Barrozo, que esteve sempre direcionando este trabalho e contribuindo para minha formação acadêmica.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química, que colaboraram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade concedida.

Ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro durante todo o meu trabalho.

Enfim, a todos que, de uma forma ou de outra, foram essenciais para o desenvolvimento e conclusão dessa dissertação e que colaboraram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Confiança para não cair.  
Força para levantar.  
E fé em Deus para continuar.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 - Objetivos .....	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 - Funcionamento de um Hidrociclone .....	6
2.2 - Famílias de Hidrociclones .....	7
2.3 - Teorias de Separação.....	9
2.3.1 - Teoria da Órbita de Equilíbrio .....	9
2.3.2 - Teoria do Tempo de Residência.....	10
2.3.3 - Teoria Populacional.....	10
2.3.4 - Teoria do Escoamento Bifásico em Regime Turbulento.....	11
2.4 - Abordagem por Meio de Número Adimensional .....	11
2.5 - Fluidodinâmica Computacional.....	12
2.6 - Hidrociclones Não Convencionais.....	13
2.6.1 - Hidrociclones Com Mais de Uma Alimentação .....	14
2.6.2 - Hidrociclones com Modificações na Entrada .....	15
2.6.3 - Hidrociclones de Três Produtos .....	17
2.6.4 - Mini-Hidrociclones com Diferentes Arranjos na Alimentação .....	19
2.6.5 - Hidrociclone com Entrada Tangencial de Água .....	20
2.6.6 - Hidrociclone Elétrico.....	21
2.6.7 - Hidrociclones com Alterações no <i>Vortex Finder</i> .....	22



2.7 - Hidrociclone Filtrante .....	23
Capítulo 3 – Material e Métodos .....	37
3.1 - Material Particulado .....	37
3.2 - Descrição da Unidade Experimental.....	38
3.2.1 - Reservatório para Armazenamento da Suspensão .....	39
3.2.2 - Bomba Centrífuga .....	40
3.2.3 - Medidor de Vazão .....	40
3.2.4 - Manômetro Digital .....	41
3.2.5 - Hidrociclones .....	41
3.3 - Procedimento Experimental .....	44
3.4 - Cálculo das variáveis associadas à separação em hidrociclones .....	46
Capítulo 4 – Resultados e Discussão .....	50
4.1 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Convencional Frente a Modificações no Diâmetro de <i>Underflow</i> .....	50
4.2 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante Frente a Modificações no Diâmetro de <i>Underflow</i> e na Permeabilidade do Meio Poroso .....	54
4.3 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Cônico-Filtrante Frente a Modificações no Diâmetro de <i>Underflow</i> e na Permeabilidade do Meio Poroso .....	60
4.4 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Totalmente Filtrante Frente a Modificações no Diâmetro de <i>Underflow</i> e na Permeabilidade do Meio Poroso.....	66
4.5 - Comparação do Comportamento do Hidrociclone Convencional com os Hidrociclones Filtrantes .....	73
Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões.....	83
5.1 - Conclusões.....	83
5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros .....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICE A.....	94
A.1 - Determinação da Permeabilidade dos Cilindros e Cones Porosos.....	94

A.2 - Determinação da Porosidade dos Cilindros e Cones Permeáveis .....	96
APÊNDICE B .....	98
B.1 - HCon com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	98
B.2 - HCiF-k <sub>1</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	99
B.3 - HCiF-k <sub>2</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	99
B.4 - HCiF-k <sub>3</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	100
B.5 - HCoF-k <sub>a</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	101
B.6 - HCoF-k <sub>b</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	102
B.7 - HCoF-k <sub>c</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	102
B.8 - HCiCoF-k <sub>1a</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	103
B.9 - HCiCoF-k <sub>2b</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	104
B.10 - HCiCoF-k <sub>3c</sub> com diferentes diâmetros de <i>underflow</i> .....	105
APÊNDICE C .....	106
C.1 - Equações de Projeto para os Hidrociclones Convencional e Filtrantes .....	106
C.2 - Curvas de Eficiência dos Hidrociclones Convencional e Filtrantes .....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Trajetória simplificada da suspensão no interior de um hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).....	2
Figura 1.2 – Hidrociclone Convencional (I), Hidrociclone Filtrante com cone poroso (II) e filtrado aflorando da região cônica porosa (III). Fonte: Vieira (2006). ....	3
Figura 2.1 - Principais dimensões de um hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984). ....	8
Figura 2.2 – Diferentes modelos de entrada, (O) original, (A) dupla entrada com metade da largura original, (B) dupla entrada com a mesma largura original, (C) quádrupla entrada com metade da largura original (HWANG <i>et al.</i> , 2013). ....	14
Figura 2.3 – Comparação das distribuições de velocidade entre os diferentes modelos de entrada (HWANG <i>et al.</i> , 2013).....	15
Figura 2.4 – Diferentes modificações nos hidrociclones, (D) 30° - cone, (E) 45° - cone, (F) 60° - cone, (G) 180° - canal guia, (H) 270° - canal guia (HWANG <i>et al.</i> , 2013). ....	16
Figura 2.5 - Comparação das distribuições de velocidade entre os diferentes modelos de hidrociclone (HWANG <i>et al.</i> , 2013).....	16
Figura 2.6 – Hidrociclone de três produtos (MAINZA <i>et al.</i> , 2004).....	18
Figura 2.7 – Representações esquemática (a) e real (b) do hidrociclone de três produtos (AHMED <i>et al.</i> , 2009). ....	18
Figura 2.8 – Diagrama esquemático dos arranjos de partículas (YANG <i>et al.</i> , 2013). ....	19
Figura 2.9 – a) Malha para o CM-hidrociclone; b) Malha para o PRM-hidrociclone; c) Malha para o RRM-hidrociclone (YANG <i>et al.</i> , 2013).....	20
Figura 2.10 – Mecanismo de coleta de partículas em hidrociclone elétrico (NENU <i>et al.</i> , 2010). ....	21
Figura 2.11 – Dutos de <i>overflow</i> com as diferentes espessuras de parede do <i>vortex finder</i> ( $\kappa$ ) avaliadas (SILVA, 2012).....	22
Figura 2.12 - <i>Vortex finder</i> tipo coifa (SILVA, 2012). ....	23
Figura 2.13 – Esquema de um Hidrociclone Convencional e de um Hidrociclone Filtrante...	24
Figura 2.14 – Perfis de velocidade tangencial segundo Dabir (1983) e simulações via CFD realizadas por Vieira (2006). ....	32

Figura 2.15 – Comparação entre os números de Euler e as Eficiências Totais para os Hidrociclones Filtrantes na queda de pressão de 1,5 kgf/cm <sup>2</sup> (VIEIRA, 2006).....	34
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica típica da rocha fosfática.....	38
Figura 3.2 – Unidade experimental.....	39
Figura 3.3 – Medidor de vazão tipo Coriolis instalado na unidade de hidrociclonagem – (I) sensor e (II) totalizador.....	40
Figura 3.4 – Dimensões características do hidrociclone HC11 em milímetros. ....	42
Figura 3.5 – (I) HCon, (II) HCoF, (III) HCoF e (IV) HCoF.....	43
Figura 4.1 – Valores de vazão de alimentação ( $Q$ ) para o Hidrociclone Convencional em função de $D_U$ e $-ΔP$ . ....	51
Figura 4.2 – Números de Euler ( $Eu$ ) em função do diâmetro de <i>underflow</i> para o Hidrociclone Convencional em função do $D_U$ .....	52
Figura 4.3 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) em função do diâmetro de <i>underflow</i> para o Hidrociclone Convencional. ....	52
Figura 4.4 – Eficiência Total ( $\eta$ ) em função do diâmetro de <i>underflow</i> o Hidrociclone Convencional. ....	53
Figura 4.5 – Vazões de filtrado em função das permeabilidades para o hidrociclone HCoF. ..	55
Figura 4.6 – Vazões de alimentação obtidas experimentalmente para os hidrociclones do tipo HCoF em função do diâmetro de <i>underflow</i> , queda de pressão e permeabilidade.....	56
Figura 4.7 – Número de Euler em função do diâmetro de <i>underflow</i> e permeabilidade para Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes. ....	57
Figura 4.8 – Razão de Líquido em função do diâmetro de <i>underflow</i> e permeabilidade para Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes. ....	58
Figura 4.9 – Eficiência Total para Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes em função do diâmetro de <i>underflow</i> e queda de pressão. ....	59
Figura 4.10 – Eficiência Total média do hidrociclone HCoF em função da permeabilidade no diâmetro de <i>underflow</i> de 4 mm. ....	60
Figura 4.11 - Vazões de filtrado em função das permeabilidades para o hidrociclone HCoF. 61	
Figura 4.12 – Vazões de alimentação obtidas experimentalmente para os hidrociclones HCoF em função do diâmetro de <i>underflow</i> , queda de pressão e permeabilidade. ....	62

Figura 4.13 - Número de Euler em função do diâmetro de <i>underflow</i> e permeabilidade para Hidrociclones Cônico-Filtrantes.....	63
Figura 4.14 – Razão de Líquido em função do diâmetro de <i>underflow</i> e permeabilidade para Hidrociclones Cônico-Filtrantes.....	64
Figura 4.15 – Eficiência Total para Hidrociclones Cônico-Filtrantes em função do diâmetro de <i>underflow</i> e queda de pressão.....	65
Figura 4.16 – Eficiência Total média do hidrociclone HCoF em função da permeabilidade no diâmetro de <i>underflow</i> de 4 mm.....	66
Figura 4.17 – Vazões de filtrado em função das permeabilidades para os hidrociclones HCoF.....	67
Figura 4.18 – Vazões de alimentação obtidas experimentalmente para os hidrociclones HCoF em função do diâmetro de <i>underflow</i> , queda de pressão e permeabilidade.....	68
Figura 4.19 - Número de Euler em função do diâmetro de <i>underflow</i> e permeabilidade para Hidrociclones Totalmente Filtrantes.....	70
Figura 4.20 – Razão de Líquido em função do diâmetro de <i>underflow</i> e permeabilidade para hidrociclones totalmente filtrantes.....	70
Figura 4.21 – Eficiência Total para Hidrociclones Totalmente Filtrantes em função do diâmetro de <i>underflow</i> , queda de pressão e permeabilidade.....	72
Figura 4.22 – Eficiência Total média do hidrociclone HCoF em função da permeabilidade no diâmetro de <i>underflow</i> de 4 mm.....	72
Figura 4.23 – Vazão de alimentação dos hidrociclones HCon, HCIF-k <sub>1</sub> , HCoF-k <sub>a</sub> e HCoF-k <sub>1a</sub> em função da queda de pressão e diâmetro de <i>underflow</i> .....	73
Figura 4.24 – Vazão de alimentação dos hidrociclones HCon, HCIF-k <sub>2</sub> , HCoF-k <sub>b</sub> e HCoF-k <sub>2b</sub> em função da queda de pressão e do diâmetro de <i>underflow</i> .....	74
Figura 4.25 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon, HCIF-k <sub>3</sub> , HCoF-k <sub>c</sub> e HCoF-k <sub>3c</sub> em função da queda de pressão e do diâmetro de <i>underflow</i> .....	75
Figura 4.26 – Vazão volumétrica dos Hidrociclones Filtrantes em função da permeabilidade e queda de pressão no $D_U = 5\text{mm}$ .....	76
Figura 4.27 – Desvios médios da vazão de alimentação dos Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional.....	77

Figura 4.28 – Número de Euler para os hidrociclones HCon, HCiF, HCoF e HCiCoF em função do diâmetro de <i>underflow</i> e da permeabilidade. ....	78
Figura 4.29 – Desvios médios do Número de Euler dos Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional. ....	79
Figura 4.30 – Razão de Líquido para os hidrociclones HCon, HCiF, HCoF e HCiCoF em função do diâmetro de <i>underflow</i> e da permeabilidade. ....	80
Figura 4.31 – Desvios médios da Razão de Líquido dos Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional. ....	80
Figura 4.32 – Eficiência Total para os hidrociclones HCon, HCiF, HCoF e HCiCoF para o diâmetro de <i>underflow</i> de 4 mm. ....	81
Figura C.1 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone Convencional para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	110
Figura C.2 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiF-k <sub>1</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	111
Figura C.3 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiF-k <sub>2</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	112
Figura C.4 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiF-k <sub>3</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	113
Figura C.5 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCoF-k <sub>a</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	114
Figura C.6 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCoF-k <sub>b</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	115
Figura C.7 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCoF-k <sub>c</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	116
Figura C.8 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiCoF-k <sub>1a</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	117
Figura C.9 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiCoF-k <sub>2b</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	118
Figura C.10 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiCoF-k <sub>3c</sub> para os diâmetros de <i>underflow</i> de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas. ....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações geométricas para algumas famílias de hidrociclones conhecidas (SVAROVSKY, 1984).....	8
Tabela 2.2 – Matriz de planejamento para a confecção dos hidrociclones (VIEIRA, 2006)...	31
Tabela 3.1 – Relações geométricas dos Hidrociclones Convencionais e Filtrantes otimizadas por Vieira (2006) e utilizadas neste trabalho.....	41
Tabela 3.2 – Propriedades das matrizes porosas cilíndricas e cônicas. ....	43
Tabela 3.3 – Valores dos desvios experimentais das grandezas analisadas neste trabalho. ....	46
Tabela A.1 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cilindros porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação. ....	95
Tabela A.2 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cones porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação. ....	96
Tabela A.3 – Valores para $\psi$ e $k_m$ para os cilindros e cones porosos.....	96
Tabela A.4 – Valores de porosidade dos cilindros e cones filtrantes após o processo de colmatação.....	97
Tabela B.1 – Resultados experimentais para o HCon com $D_U = 3$ mm. ....	98
Tabela B.2 – Resultados experimentais para o HCon com $D_U = 4$ mm. ....	98
Tabela B.3 – Resultados experimentais para o HCon com $D_U = 5$ mm. ....	98
Tabela B.4 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_1$ com $D_U = 3$ mm.....	99
Tabela B.5 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_1$ com $D_U = 4$ mm.....	99
Tabela B.6 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_1$ com $D_U = 5$ mm.....	99
Tabela B.7 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_2$ com $D_U = 3$ mm.....	99
Tabela B.8 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_2$ com $D_U = 4$ mm.....	100
Tabela B.9 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_2$ com $D_U = 5$ mm.....	100
Tabela B.10 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_3$ com $D_U = 3$ mm.....	100
Tabela B.11 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_3$ com $D_U = 4$ mm.....	100
Tabela B.12 – Resultados experimentais para o HCiF- $k_3$ com $D_U = 5$ mm.....	101

Tabela B.13 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_a$ com $D_U = 3$ mm. ....	101
Tabela B.14 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_a$ com $D_U = 4$ mm. ....	101
Tabela B.15 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_a$ com $D_U = 5$ mm. ....	101
Tabela B.16 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_b$ com $D_U = 3$ mm. ....	102
Tabela B.17 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_b$ com $D_U = 4$ mm. ....	102
Tabela B.18 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_b$ com $D_U = 5$ mm. ....	102
Tabela B.19 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_c$ com $D_U = 3$ mm. ....	102
Tabela B.20 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_c$ com $D_U = 4$ mm. ....	103
Tabela B.21 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_c$ com $D_U = 5$ mm. ....	103
Tabela B.22 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{1a}$ com $D_U = 3$ mm. ....	103
Tabela B.23 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{1a}$ com $D_U = 4$ mm. ....	103
Tabela B.24 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{1a}$ com $D_U = 5$ mm. ....	104
Tabela B.25 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{2b}$ com $D_U = 3$ mm. ....	104
Tabela B.26 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{2b}$ com $D_U = 4$ mm. ....	104
Tabela B.27 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{2b}$ com $D_U = 5$ mm. ....	104
Tabela B.28 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{3c}$ com $D_U = 3$ mm. ....	105
Tabela B.29 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{3c}$ com $D_U = 4$ mm. ....	105
Tabela B.30 – Resultados experimentais para o HCoF- $k_{3c}$ com $D_U = 5$ mm. ....	105
Tabela C.1 – Parâmetros da Equação C.1 estimados estatisticamente. ....	107
Tabela C.2 – Parâmetros da Equação C.2 estimados estatisticamente. ....	107



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Constante característica de uma família de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$A_{lateral}$	Área lateral do meio poroso, $[M^0L^2T^0]$
$a$	Constante característica de uma família de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$b$	Constante característica de uma família de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$C_V$	Concentração volumétrica de sólidos, $[M^0L^0T^0]$
$C_{VA}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$C_{VU}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$C_{WA}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$C_{WO}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>overflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$C_{WU}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$d_{50}$	Diâmetro de Corte, $[M^0L^1T^0]$
$d'_{50}$	Diâmetro de Corte Reduzido, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2A}$	Parâmetro $d_{63,2}$ do modelo RRB para a corrente de alimentação, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2U}$	Parâmetro $d_{63,2}$ do modelo RRB para a corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^1T^0]$
$D_c$	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_i$	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_{inf}$	Diâmetro inferior do tronco de cone, $[M^0L^1T^0]$
$D_o$	Diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$d_p$	Diâmetro da partícula, $[M^0L^1T^0]$
$D_U$	Diâmetro do duto de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$Eu$	Número de Euler, $[M^0L^0T^0]$
$Eu_{conv}$	Número de Euler do Hidrociclone Convencional, $[M^0L^0T^0]$
$G$	Eficiência granulométrica, $[M^0L^0T^0]$

$G'$	Eficiência granulométrica reduzida, $[M^0L^0T^0]$
$H$	Altura do meio filtrante, $[M^0L^1T^0]$
$K$	Constante característica de uma família de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$k_i$	Permeabilidade do cilindro filtrante $i$ , $[M^0L^2T^0]$
$k_j$	Permeabilidade do cone filtrante $j$ , $[M^0L^2T^0]$
$k_{ij}$	Permeabilidade do sistema cilindro/cone filtrante $ij$ , $[M^0L^2T^0]$
$k_m$	Permeabilidade do meio filtrante, $[M^0L^2T^0]$
$L$	Comprimento total do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$L_I$	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$L$	Comprimento do <i>vortex finder</i> , $[M^0L^1T^0]$
$m$	Constante característica de uma família de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$N$	Constante característica de uma família de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$N$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^0T^0]$
$n_A$	Parâmetro ajustado $n$ do modelo RRB para a corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$n_U$	Parâmetro ajustado $n$ do modelo RRB para a corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$Q$	Velocidade superficial do fluido, $[M^0L^1T^{-1}]$
$Q$	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_{conv}$	Vazão volumétrica do hidrociclone convencional, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_F$	Vazão volumétrica da corrente de filtrado do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_O$	Vazão volumétrica da corrente de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_U$	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Re$	Número de Reynolds, $[M^0L^0T^0]$
$R_L$	Razão de líquido, $[M^0L^0T^0]$
$R_m$	Resistência do meio filtrante, $[M^0L^{-1}T^0]$

$Stk_{50}$	Número de Stokes, $[M^0L^0T^0]$
$u_c$	Velocidade do fluido na seção cilíndrica, $[M^0L^1T^{-1}]$
$W$	Vazão mássica da corrente de alimentação, $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_o$	Vazão mássica da corrente de <i>overflow</i> , $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_u$	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1L^0T^{-1}]$
$X$	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que $d_p$ na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$X_u$	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que $d_p$ na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$X_i$	Variável i codificada, $[M^0L^0T^0]$

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Resistividade da torta, $[M^{-1}L^1T^0]$
$-\Delta P$	Queda de pressão, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
$\delta_A$	Desvio padrão relacionado à constante A, $[M^0L^0T^0]$
$\delta_a$	Desvio padrão relacionado à constante a, $[M^0L^0T^0]$
$\delta_b$	Desvio padrão relacionado à constante b, $[M^0L^0T^0]$
$\delta_K$	Desvio padrão relacionado à constante K, $[M^0L^0T^0]$
$\varepsilon$	Porosidade do meio filtrante, $[M^0L^0T^0]$
$\eta$	Eficiência total de separação, $[M^0L^0T^0]$
$\eta'$	Eficiência de separação reduzida, $[M^0L^0T^0]$
$\mu$	Viscosidade do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$
$\theta$	Ângulo da parte cônica do hidrociclone, $[^\circ]$
$\rho$	Densidade da corrente de alimentação, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_s$	Densidade dos sólidos, $[M^1L^{-3}T^0]$

$\rho_o$	Densidade da corrente de <i>overflow</i> , $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_u$	Densidade da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1L^{-3}T^0]$
$\xi$	Espessura da parede filtrante, $[M^0L^1T^0]$

---

---

## RESUMO

---

---

Hidrociclones são equipamentos destinados à separação sólido-líquido amplamente utilizados na indústria devido a suas vantagens, incluindo geometria compacta, alta eficiência de separação, manutenção simples e baixo custo. Dependendo da finalidade almejada pelo usuário (concentração ou classificação), é possível potencializar o desempenho dos hidrociclones mediante o uso simultâneo de novas operações unitárias à hidrociclonagem como, por exemplo, a filtração. O hidrociclone filtrante foi um equipamento desenvolvido e aperfeiçoado por pesquisadores da FEQUI/UFU. Dessa maneira, o intuito deste trabalho foi estudar, experimentalmente, o efeito da incorporação do cilindro e cone porosos, conjunta ou separadamente, ao Hidrociclone Convencional de geometria otimizada (H11). Para tanto, os ensaios foram conduzidos com suspensão aquosa de rocha fosfática em três valores de permeabilidade para os meios porosos e três diâmetros de *underflow*. De acordo com os principais resultados, os hidrociclones HClF, HCoF e HClCoF apresentaram decréscimos médios no consumo energético de 13, 32 e 35% respectivamente, em comparação ao Hidrociclone Convencional (HCon), na menor permeabilidade utilizada para o meio filtrante. No entanto, a Razão de Líquido dos hidrociclones HClF, HCoF e HClCoF aumentou em relação à do Hidrociclone Convencional, independente da permeabilidade ou do diâmetro de *underflow* utilizados. Em se tratando da Eficiência Total dos equipamentos filtrantes foram observadas pequenas diferenças em relação ao separador convencional, podendo dizer que essa variável permaneceu praticamente constante para a mesma condição operacional. A partir dos dados experimentais, foi possível obter as equações de projeto, bem como as curvas de Eficiência Total para granulometrias distintas da utilizada para cada hidrociclone estudado. Em suma, pôde-se concluir que, em se tratando de hidrociclones filtrantes, não é aconselhável empregar meios filtrantes com o valor de permeabilidade maior do que aproximadamente  $2,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , já que, em termos energéticos, consumiriam mais energia do que a utilizada pelo Hidrociclone Convencional e em termos de separação, seriam praticamente idênticos ao separador convencional.

Palavras-chave: hidrociclone, filtração, HClCoF, estruturas porosas.

---

---

## ABSTRACT

---

---

Hydrocyclones are equipments destined to solid-liquid separation broadly used in industry due to its advantages, including compact geometry, high separation efficiency, simple maintenance and low cost. Depending on the user desired finality (concentration or classification), it is possible to potentiate the hydrocyclones performance by the simultaneous use of new unit operations to hydrocycloning, for example, the filtration. The filtering hydrocyclone was an equipment developed and improved by FEQUI/UFU researchers. In this way the objective of this work was to experimentally study the effect of incorporating a porous cylinder and cone, together or separately, to the optimized geometry conventional hydrocyclone (H11). Experiments were done with aqueous suspension of phosphate rock in three different permeability values for the porous media and three underflow diameters. According to the main results, the hydrocyclones HClF, HCoF and HClCoF showed mean decrease in the energetic consume of 13, 32 and 35% respectively, in comparison to conventional hydrocyclone (HCon), in the lowest permeability used for the filtering medium. However the underflow-to-throughput ratio of the hydrocyclones HClF, HCoF and HClCoF increased in relation to the conventional hydrocyclone (HCon), regardless the permeability or the underflow diameter used. About the total efficiency of the filtering equipments, little differences in relation to the conventional separator were observed, and can be said that this variable remained practically constant for the same operational condition. From the experimental data it was possible to obtain the project equations and the total efficiency curves even for distinct granulometries of each hydrocyclone studied. In summary can be concluded that in the case of filtering hydrocyclones, it is not advisable to use filtering medium with permeability higher than  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  because, in energetic terms, they will consume more energy than the conventional hydrocyclone, and in terms of separation they will be practically equal to the conventional separator.

Keywords: hydrocyclone, filtration, HClCoF, porous structures.

---

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

Os hidrociclones fazem parte de um grupo de equipamentos que realizam separação sólido-líquido ou líquido-líquido. O princípio de separação básico empregado nos hidrociclones é a sedimentação centrífuga, isto é, a suspensão de partículas é submetida a aceleração centrífuga que promove a separação partícula-fluido. Diferentemente das centrífugas (que utilizam o mesmo princípio de separação), os hidrociclones não possuem partes móveis, fazendo com que os custos de aquisição, manutenção e operação sejam reduzidos. Do ponto de vista de operação e investimento, tais dispositivos oferecem um dos meios mais baratos de separação, justamente por serem equipamentos simples e de fácil construção (SVAROVSKY, 2000).

Conhecidos há mais de um século, os hidrociclones eram utilizados inicialmente com o intuito de separar areia da água. Atualmente, são empregados em diversos setores industriais, tais como químico, petroquímico, de alimentos, têxtil, de tratamento de efluentes, indústria extrativista, processamento mineral etc.

Em virtude de seu grande potencial de aplicação, diversas configurações de hidrociclones vêm sendo propostas nos últimos anos. Essas configurações são denominadas famílias e são caracterizadas pelas proporções fixas entre as principais dimensões geométricas destes equipamentos com o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone. A necessidade de um separador com alto poder classificador ou com grande poder concentrador é que determina o emprego de uma família específica em um processo. Além do mais, os hidrociclones podem apresentar altos valores de eficiência de separação quando aplicados a partículas com diâmetros entre 5 e 400  $\mu\text{m}$ . É devido a essa grande versatilidade que os hidrociclones podem ser aplicados em processos de deslamagem, fracionamento, espessamento, classificação seletiva, pré-concentração, recuperação de líquidos etc. (VIEIRA, 2006).

Os hidrociclones consistem de uma seção cilíndrica acoplada a um tronco de cone. No topo da seção cilíndrica está situado o duto de alimentação, por onde é injetada a suspensão de interesse. Na parte superior do cilindro há um duto instalado concentricamente ao eixo do equipamento, denominado de tubo de *overflow*. Por sua vez, a parte inferior do tronco de cone é denominada de orifício de *underflow* (SVAROVSKY, 2000).

A Figura 1.1 apresenta um esquema da trajetória simplificada adquirida pela suspensão no interior de um Hidrociclone Convencional. A suspensão é alimentada sob pressão, tangencialmente no topo da parte cilíndrica do hidrociclone, o que provoca um movimento rotacional, gerando acelerações centrífugas que atuam diretamente nas partículas. Dessa forma, as partículas com maior densidade ou tamanho tendem a se movimentar em direção à parede do equipamento, de onde são conduzidas num movimento espiral descendente até a saída inferior (*underflow*). Já as partículas menores ou menos densas tendem a ser arrastadas para o interior do equipamento, juntamente com a maior parte do líquido, adquirindo um movimento espiral ascendente, com rotação inversa ao primeiro, sendo, por fim, coletadas pelo orifício superior (*overflow*).

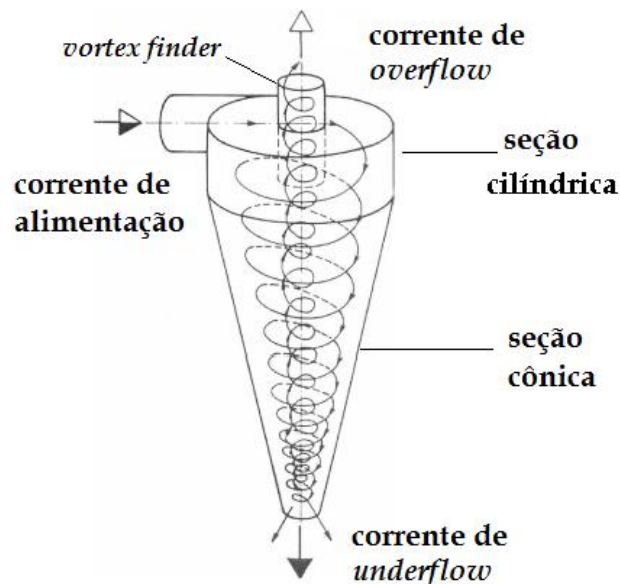


Figura 1.1 – Trajetória simplificada da suspensão no interior de um hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).

Tal como acontece em todos os princípios de separação envolvendo a dinâmica de partículas, o conhecimento do escoamento no interior do hidrociclone é essencial para



compreender a sua função e avaliar a trajetória das partículas, que por sua vez, permite a previsão da eficiência de separação.

Devido à grande aplicabilidade dos hidrociclones nas indústrias, vários estudos têm sido realizados visando à otimização dos mesmos, tendo em vista melhorias na tecnologia de separação. Também são encontrados na literatura, estudos propondo equações de projeto, para avaliação dos fatores que tenham influência sobre o desempenho do equipamento. Dentre esses estudos, estão as modificações nos hidrociclones com o intuito de atender as necessidades individuais de cada processo industrial. Essas modificações podem ser feitas através da criação de equipamentos não convencionais, seja alterando a geometria dos hidrociclones, seja agregando outra operação unitária no processo de hidrociclonagem, ou ainda, qualquer outra modificação que seja diferente do modelo de hidrociclone inicialmente proposto.

Diante do exposto, pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) propuseram a incorporação de um cone permeável a um hidrociclone de geometria convencional, a fim de estudar os efeitos relevantes relacionados ao custo energético e ao poder de separação. A incorporação de uma parede cônica filtrante originou um tipo de separador até então inédito, cuja denominação dada foi a de Hidrociclone Filtrante.

A operação do Hidrociclone Filtrante é semelhante à do equipamento convencional, diferenciando apenas na existência da corrente de filtrado, proveniente da região cônica porosa, além das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow*. A Figura 1.2 apresenta o Hidrociclone Convencional, o Hidrociclone Filtrante e, em destaque, a corrente de filtrado.

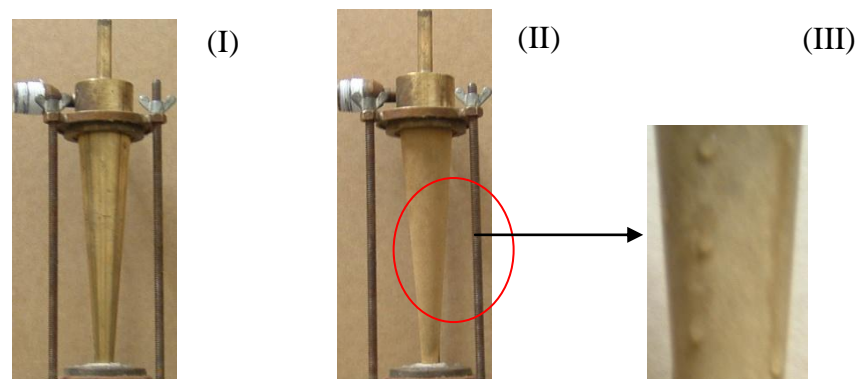


Figura 1.2 – Hidrociclone Convencional (I), Hidrociclone Filtrante com cone poroso (II) e filtrado afluindo da região cônica porosa (III). Fonte: Vieira (2006).

O primeiro trabalho realizado com Hidrociclones Filtrantes foi conduzido por Lanna *et al.* (1992). Em sequência, diversos pesquisadores (SOUZA, 1999; VIEIRA, 2001; ARRUDA, 2003) deram continuidade aos estudos utilizando as geometrias das famílias clássicas de hidrociclones, tais como Bradley, Rietema, Krebs e Demco. Nos trabalhos citados foram comparados os desempenhos do Hidrociclone Convencional com o do Hidrociclone Filtrante, e os resultados obtidos mostraram que a incorporação do meio filtrante proporcionou menores custos energéticos ao equipamento. Verificou-se ainda que o separador filtrante poderia aumentar a eficiência de separação dependendo do tipo de família empregada para o hidrociclone.

Partindo dos trabalhos anteriores, Vieira (2006) deu seguimento aos estudos em relação aos Hidrociclones Filtrantes com o objetivo de investigar e otimizar as relações geométricas, embasado pela Técnica de Planejamento de Experimentos, com intuito de minimizar os custos energéticos e obter maiores eficiências de separação. Além disso, utilizou técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD), para simular o escoamento interno nos Hidrociclones Filtrantes e Convencionais e explicar fenomenologicamente os resultados obtidos no laboratório. Combinando os dados experimentais e simulados, Vieira (2006) realizou um estudo no qual as relações geométricas empregadas alcançaram toda a faixa de famílias utilizadas comercialmente com o objetivo de encontrar dimensões geométricas e condições operacionais ótimas, nas quais os hidrociclones apresentassem uma alta eficiência associada a um baixo custo energético. Neste estudo, o autor avaliou 25 hidrociclones filtrantes de diferentes geometrias, sendo que o hidrociclone HF11 foi o que apresentou o melhor desempenho.

Na sequência, com o intuito de otimizar ainda mais o hidrociclone HF11, Almeida (2008) estudou qual seria a influência do diâmetro de *underflow* e do comprimento do *vortex finder* no desempenho do referido equipamento, verificando que o nível ideal das variáveis estudadas dependia da necessidade de um separador classificador ou concentrador.

Contudo, os trabalhos mencionados anteriormente, centraram foco em um equipamento cuja seção filtrante foi sempre a região cônica, os quais foram denominados de hidrociclones HCoF. Esse fato motivou a dissertação de Façanha (2012), que ao invés de utilizar um cone poroso, manteve-o com parede maciça e substituiu a seção cilíndrica de parede maciça por uma permeável. A essa nova categoria de hidrociclones foi dada a denominação de hidrociclones HCoF.

Enfim, é possível verificar que sempre houve na FEQUI/UFU um estudo contínuo nos processos de hidrociclonagem a partir dos equipamentos filtrantes, cujos benefícios técnicos e científicos alcançados são inquestionáveis. Ademais, acredita-se que há ainda possibilidades de se potencializar cada vez mais este equipamento separador, mediante a execução da presente proposta, ou seja, proceder a hidrociclonagem num equipamento de geometria otimizada (HF11) e totalmente filtrante (cilindro e cone permeáveis), cuja denominação pretendida será HCoF, visando comparar o seu desempenho com as demais configurações.

## 1.1 - Objetivos

Tendo em vista tudo o que fora mencionado, o objetivo geral deste trabalho foi dar continuidade aos promissores estudos com Hidrociclones Filtrantes realizados na FEQUI/UFU, a partir dos avanços já realizados, através da incorporação simultânea de um cilindro e um cone filtrante, HCoF, a fim de que os benefícios, até então alcançados (redução energética e aumento de eficiência), pudessem ser potencializados ainda mais.

Por sua vez, os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Em se tratando dos Hidrociclones Cilíndrico-Filtrante (HCiF), Cônico-Filtrante (HCoF) e Totalmente Filtrante (HCoF), avaliar a influência que distintas permeabilidades teriam sobre o desempenho desses separadores.
- Avaliar o efeito do diâmetro de *underflow* no desempenho das quatro modalidades de hidrociclones (HCon, HCiF, HCoF e HCoF).
- Comparar o desempenho do hidrociclone com paredes totalmente porosas (HCoF) com aqueles oriundos de situações em que apenas se empregava o cone (HCoF) ou o cilindro permeável (HCiF) ou todas as paredes maciças (HCon).

---

## Capítulo 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 - Funcionamento de um Hidrociclone

Hidrociclones são equipamentos que se utilizam de um campo centrífugo para promover a separação sólido-líquido ou líquido-líquido. O princípio de separação desse equipamento é a sedimentação centrífuga, isto é, as partículas suspensas são submetidas à aceleração centrífuga que as separa do fluido. O líquido, contendo a suspensão de partículas, é injetado tangencialmente através da entrada situada no topo da parte cilíndrica do hidrociclone, como resultado da entrada tangencial, um intenso movimento rotacional é gerado dentro do equipamento. O movimento rotacional do fluido, ao longo de sua trajetória, gera acelerações centrífugas diretamente atuantes nas partículas, forçando-as a se moverem em direção à parede do equipamento (SVAROVSKY, 2000).

Devido à diminuição progressiva da seção transversal da parte cônica, quanto mais fluido adentra nessa seção, maiores são as velocidades do fluido. Considerando que apenas parte da suspensão inicialmente alimentada no hidrociclone seja coletada no orifício de *underflow*, devido a sua dimensão relativamente pequena, a parcela que não é descarregada migra para o centro do eixo do equipamento, formando um vórtice interno direcionado para cima e com movimento rotacional inverso àquele criado pelo primeiro vórtice, direcionado para o tubo de *overflow* (VIEIRA, 2006).

O escoamento da suspensão em hidrociclones é complexo e a distribuição das velocidades pode ser decomposta em três componentes: axial, radial e tangencial. A componente tangencial da velocidade mostra-se muito importante, uma vez que é a responsável pela geração das forças centrífugas e de cisalhamento que atuam no equipamento. Esta componente não permite que haja o acúmulo de sólidos (torta) na parede do hidrociclone, já as componentes axial e radial (dependendo da posição no interior do

equipamento) são diretamente responsáveis pela coleta de partícula. A transferência de quantidade de movimento de uma componente para outra é constante, especialmente próximo ao orifício de *underflow*, onde o fluido cede energia do movimento rotacional para as componentes radial e axial da velocidade (SCHAPPEL; CHASE, 1998).

A coleta de partículas em um hidrociclone tem como forças atuantes a força centrífuga (criada pelo movimento rotacional), a força de empuxo (devido à diferença de densidade do fluido e da partícula) e a força de arraste (inerente a qualquer escoamento que envolve mais de uma fase). O balanço dessas forças determina a velocidade terminal da partícula, que depende da sua forma e de seu tamanho, bem como das propriedades do fluido. Desta forma, uma partícula é dita coletada se consegue atingir a parede do equipamento. As partículas maiores experimentam uma maior força centrífuga, sendo direcionadas à parede e coletadas no *underflow*. As partículas menores não terão tempo suficiente para alcançá-la e serão arrastadas para o vórtice interno, sendo descarregadas no *overflow* (SCHAPPEL; CHASE, 1998).

O escoamento nos hidrociclones pode apresentar algumas particularidades além do escoamento básico descrito anteriormente. Entre estes fenômenos pode ser incluído o curto-circuito, que ocorre junto ao topo da seção cilíndrica devido aos gradientes de pressão e às bordas de escoamento causadas pela diferença de tamanho entre o *vortex finder* e o vórtice interno (SOUZA *et al.*, 2000). Outra particularidade seria a ocorrência de uma coluna de ar interna chamada de *air core*, que se forma devido a uma região de pressão negativa no interior do hidrociclone, que pode ser destruída pela adição de contrapressão ou pela faixa operacional que o hidrociclone atua (VIEIRA, 2006).

## 2.2 - Famílias de Hidrociclones

Os hidrociclones podem ser agrupados em famílias, que são caracterizadas pelas distintas proporções entre as principais dimensões geométricas destes equipamentos em relação ao diâmetro do corpo cilíndrico ( $D_c$ ). A Figura 2.1 apresenta as principais dimensões de projeto para um Hidrociclone Convencional.

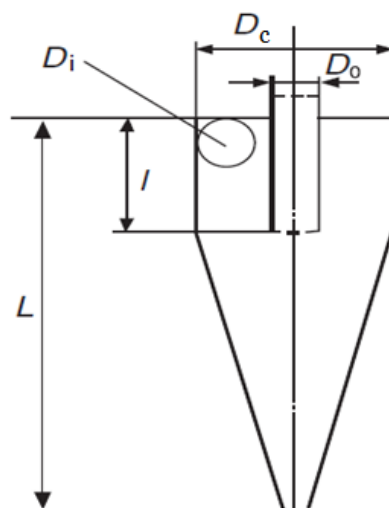


Figura 2.1 - Principais dimensões de um hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).

Dentre as famílias clássicas de hidrociclones podem ser citadas Bradley, Rietema, Krebs, CBV/Demco, Hi-Klone, Mosley, RW, Warman. A Tabela 2.1 apresenta as principais relações geométricas referentes a essas famílias.

Tabela 2.1 – Relações geométricas para algumas famílias de hidrociclones conhecidas (SVAROVSKY, 1984).

Família de Hidrociclone	Proporções Geométricas				
	$D_i/D_c$	$D_o/D_c$	$D_U/D_c$	$L/D_c$	$\theta$
Rietema	0,28	0,34	0,4	5	20°
Bradley	0,133	0,2	0,33	6,85	9°
Mozley	0,154	0,214	0,57	7,43	6°
Mozley	0,16	0,25	0,57	7,71	6°
Mozley	0,197	0,32	0,57	7,71	6°
Warman	0,29	0,2	0,31	4	15°
RW 2515	0,2	0,32	0,8	6,24	15°
Hi-Klone	0,175	0,25	0,92	5,6	10°
Hi-Klone	0,15	0,2	0,8	5,4	10°
Demco	0,217	0,5	1	4,7	25°
Demco	0,244	0,313	0,833	3,9	20°

O emprego de uma determinada família de hidrociclones em um processo depende da necessidade de equipamentos com um alto poder classificador (baseado no tamanho das partículas coletadas) ou com grande poder concentrador (baseado na concentração da suspensão de fundo).

## 2.3 - Teorias de Separação

Os modelos de separação em hidrociclones buscam, com base em considerações teóricas, descrever a forma como uma determinada partícula é classificada. As teorias disponíveis podem ser classificadas em quatro grupos básicos, de acordo com as hipóteses adotadas: Teoria da Órbita de Equilíbrio, Teoria do Tempo de Residência, Teoria Populacional e Teoria do Escoamento Bifásico em Regime Turbulento (SVAROVSKY, 1984).

### 2.3.1 - Teoria da Órbita de Equilíbrio

A teoria da Órbita de Equilíbrio é baseada no conceito de raio de equilíbrio, originalmente proposto por Criner (1950) e Driessen (1951). Este conceito pressupõe que as partículas de um dado tamanho atingirão uma posição de equilíbrio dentro da órbita radial no hidrociclone, em que as velocidades terminais de sedimentação no campo centrífugo sejam iguais à velocidade radial do líquido no sentido do eixo do equipamento.

De acordo com esta teoria, as partículas maiores irão atingir uma posição na órbita radial perto da parede, em que a velocidade axial do fluido tem sentido descendente. Portanto, estas partículas deixarão o hidrociclone através do orifício do *underflow*. Por sua vez, as partículas menores estarão localizadas na órbita radial perto do centro, na região onde a velocidade axial do fluido é ascendente. Estas partículas serão descarregadas na corrente de *overflow*. O Diâmetro de Corte é definido como a dimensão da partícula cuja órbita de equilíbrio é coincidente com o local onde a velocidade vertical do fluido é zero. Essa partícula terá chance igual para deixar o hidrociclone através do *underflow* ou do *overflow* (COELHO; MEDRONHO, 2001).

Segundo Vieira (2006), a teoria da Órbita de Equilíbrio fornece bons resultados quando o hidrociclone é operado utilizando suspensões diluídas. Porém, à medida que a concentração de sólidos é elevada, esta teoria começa a se desviar, devido ao fato de não considerar o tempo de residência das partículas, os efeitos de turbulência do escoamento e a interação partícula-partícula.

### **2.3.2 - Teoria do Tempo de Residência**

A teoria do Tempo de Residência pressupõe condições de não equilíbrio e considera a possibilidade de uma partícula atingir a parede do hidrociclone no tempo de residência disponível. Foi sugerida inicialmente por Rietema (1961), que considerou as seguintes hipóteses: distribuição homogênea das partículas no duto de alimentação, validade do regime de Stokes para a velocidade terminal e negligência dos efeitos de turbulência e concentração no processo de separação.

Esta teoria fundamenta-se na hipótese de que uma determinada partícula será coletada se for capaz de deslocar-se radialmente da entrada até a parede do hidrociclone num tempo inferior ou igual àquele em que permanece no interior do hidrociclone (ARRUDA, 2003).

O Diâmetro de Corte seria o tamanho da partícula que ao entrar precisamente no centro do duto de alimentação, atingiria a parede no exato tempo de residência do equipamento (SVAROVSKY, 2000).

### **2.3.3 - Teoria Populacional**

A teoria Populacional foi inicialmente proposta por Fahlstrom (1960), que sugeriu que o Diâmetro de Corte das partículas é uma função do diâmetro do orifício de *underflow* e da distribuição granulométrica da alimentação. O autor afirmou que devido ao efeito populacional na saída do *underflow* afetar a correlação de forças, seria possível estimar o Diâmetro de Corte a partir da recuperação de massa no *underflow*.



A teoria é plausível, porém, as informações obtidas através desta não produziram resultados quantitativos, sendo então, utilizada para explicar diversas observações qualitativas da operação com hidrociclones (SVAROVSKY, 1984).

#### **2.3.4 - Teoria do Escoamento Bifásico em Regime Turbulento**

Os modelos citados anteriormente não incluem o efeito da turbulência no processo de separação em suas hipóteses básicas. Este efeito modifica o perfil de velocidades, o que altera o desempenho do hidrociclone enquanto separador (BICALHO, 2011).

O efeito da turbulência na separação em hidrociclones tem sido objeto de estudo desde o trabalho de Driessen (1951). Bloor e Ingham (1975) propuseram um modelo para escoamento monofásico, baseado na teoria de mistura de Prandtl, obtendo assim, perfis de velocidade considerando a variação da turbulência em relação a distância radial.

Um modelo de separação para um escoamento bifásico turbulento para suspensões com baixas concentrações foi proposto por Schubert e Neesse (1980). De acordo com os autores, o transporte das partículas ocorreria pela sobreposição do fluxo de sedimentação ao fluxo turbulento.

A teoria turbilhonar não constitui um modelo propriamente dito e deve ser usada em conjunção com outro modelo (SVAROVSKY, 1984).

#### **2.4 - Abordagem por Meio de Número Adimensional**

Teoricamente, o escoamento em hidrociclones pode ser descrito pelas equações da Continuidade e do Movimento. Porém, a resolução exata dessas equações é bastante complexa. Diante da dificuldade relatada anteriormente, a abordagem por meio de grupos adimensionais vem sendo utilizada em grande parte dos trabalhos encontrados na literatura, envolvendo projeto e desempenho de hidrociclones.

Segundo Svarovsky (1984), as variáveis importantes para o processo de hidrociclonagem, em que o fluido utilizado é newtoniano são:  $d_{50}$ ,  $D_c$ ,  $\rho$ ,  $\rho_s$ ,  $\mu$ ,  $C_V$ ,  $u_c$ ,  $-\Delta P$  e  $R_L$ . Após aplicar o teorema  $\pi$  de Buckingham, obtém-se os grupos adimensionais relevantes ao fenômeno. O número de Stokes ( $Stk_{50}$ ) está relacionado ao poder de classificação, o

número de Euler ( $Eu$ ) se refere ao custo energético e, por fim, o número de Reynolds ( $Re$ ) está ligado ao tipo de escoamento. As Equações (2.1), (2.2) e (2.3) representam, respectivamente, os grupos adimensionais citados anteriormente:

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho)u_c (d_{50})^2}{18\mu D_c} \quad (2.1)$$

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho u_c^2} \quad (2.2)$$

$$Re = \frac{\rho D_c u_c}{\mu} \quad (2.3)$$

Segundo Silva e Medronho (1988), esses grupos adimensionais são normalmente correlacionados entre si, juntamente com a concentração volumétrica da alimentação ( $C_V$ ) e a Razão de Líquido ( $R_L$ ), de acordo com a influência que desempenham no processo de separação, de maneira a se obter a Equação (2.4).

$$Stk_{50}Eu = f(Re, R_L, C_V) \quad (2.4)$$

Para descrever o comportamento do hidrociclone e encontrar uma correlação descrita pela Equação (2.4) são necessários estudos experimentais. Foram propostas na literatura, correlações utilizando a abordagem por meio dos grupos adimensionais (SVAROVSKY, 1984; SILVA; MEDRONHO, 1988).

## 2.5 - Fluidodinâmica Computacional

O estudo do escoamento dos fluidos é de suma importância, pois está relacionado a diversos fenômenos naturais e problemas encontrados habitualmente na engenharia. Segundo Fortuna (2000), a análise da mecânica dos fluidos aconteceu experimentalmente muito antes do que matematicamente. No século XIX, as descrições matemáticas do comportamento dos fluidos ganharam visibilidade na forma das equações de Navier-Stokes, podendo ser escritas de várias maneiras, a depender das propriedades do fluido e do escoamento. As equações de Navier-Stokes pertencem a classe de equações diferenciais parciais não-lineares, tendo solução analítica somente para alguns casos. Devido aos avanços obtidos em relação ao computador digital, foram encontradas soluções numéricas para as equações de Navier-Stokes, através de técnicas computacionais. Para muitos casos na engenharia a análise de

problemas via métodos computacionais é a forma mais prática, se não a única, de se obter informações sobre escoamento de fluidos.

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta que se baseia na capacidade de processamento computacional e é utilizada para analisar o comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos associados, tais como reações químicas. Trata-se de uma técnica bastante eficaz, que abrange várias áreas de aplicação industrial e acadêmica (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

O uso das técnicas de CFD para prever escoamentos internos e externos aumentou significativamente a partir da década de 90. Este fato decorre dos avanços contínuos na capacidade de processamento dos novos computadores juntamente com a melhoria na capacidade de armazenamento. Além disso, foram desenvolvidos algoritmos mais robustos para a solução das equações algébricas lineares e modelos mais elaborados para representar a fase dispersa (ALMEIDA, 2008).

Ao longo dos últimos anos, as vantagens decorrentes da utilização do CFD na indústria e na academia se tornaram evidentes. As aplicações da simulação computacional de processos envolvendo fluidos e transferência de calor são muitas e o uso da técnica de CFD permite que se obtenha a solução de problemas operacionais sem que haja a parada na indústria, bem como a diminuição no número de experimentos realizados em laboratório e unidades piloto, reduzindo os gastos para a unidade de processo e facilitando as pesquisas de âmbito acadêmico.

## **2.6 - Hidrociclones Não Convencionais**

Os hidrociclones têm sido amplamente utilizados na classificação das partículas em escoamentos sólido-líquido devido a sua estrutura simples, ausência de partes móveis e baixo custo. Atualmente, diversos estudos vêm sendo realizados a fim de melhorar o desempenho dos hidrociclones. Para tanto, novas tecnologias foram propostas, como modificações no funcionamento do Hidrociclone Convencional. Nesta seção apresentar-se-ão algumas modificações propostas na literatura.

### 2.6.1 - Hidrociclones Com Mais de Uma Alimentação

Estes hidrociclones se diferem do convencional pelo fato de apresentar mais de um duto de alimentação. Existem trabalhos na literatura a respeito desse tipo de hidrociclone, podendo citar aqueles sob a autoria de Hwang *et al.* (2013) e Nenu e Yoshida (2009).

O primeiro trabalho (HWANG *et al.*, 2013) estudou quatro tipos de entradas de alimentação através de fluidodinâmica computacional, conforme a Figura 2.2. O tipo O tinha uma única entrada de largura 2 mm, os tipo A e B possuem duas entradas com 1 e 2 mm de largura, respectivamente, e o tipo C com quatro entradas de 1 mm de largura. Todas as entradas possuíam 6 mm de altura.

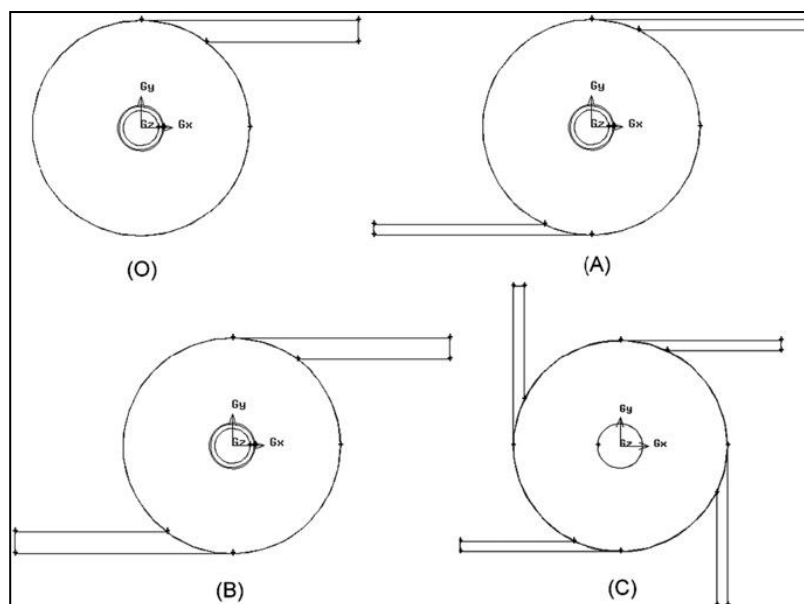


Figura 2.2 – Diferentes modelos de entrada, (O) original, (A) dupla entrada com metade da largura original, (B) dupla entrada com a mesma largura original, (C) quádrupla entrada com metade da largura original (HWANG *et al.*, 2013).

Os resultados das simulações realizadas por Hwang *et al.* (2013) mostraram que o hidrociclone do tipo A apresentou a maior velocidade enquanto o do tipo B apresentou a menor velocidade (Figura 2.3). Isto revela que o efeito centrífugo é maior no hidrociclone do tipo A. Portanto, o aumento da quantidade de entradas e a redução da largura de entrada eram meios eficazes para melhorar a eficiência da separação de partículas.

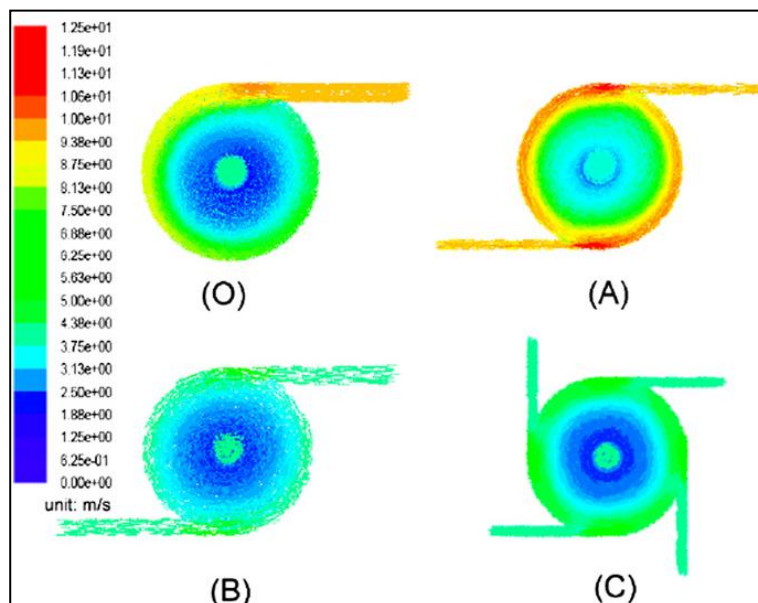


Figura 2.3 – Comparação das distribuições de velocidade entre os diferentes modelos de entrada (HWANG *et al.*, 2013).

Estudos experimentais com hidrociclone de dupla entrada foram realizados por Nenu e Yoshida (2009) utilizando a sílica como partícula. Os autores verificaram que esses hidrociclones apresentam menor Diâmetro de Corte e melhor desempenho de classificação quando comparados aos de entrada única.

### 2.6.2 - Hidrociclones com Modificações na Entrada

Hwang *et al.* (2012) estudaram o desempenho de hidrociclones através da inserção de um cone no topo da parte cilíndrica. A eficácia da instalação do cone no interior do hidrociclone foi estudada tanto usando CFD quanto métodos experimentais.

Um segundo trabalho do mesmo grupo de pesquisadores propôs a extensão do duto de alimentação utilizando um canal guia (HWANG *et al.*, 2013). Estas modificações podem ser visualizadas na Figura 2.4.

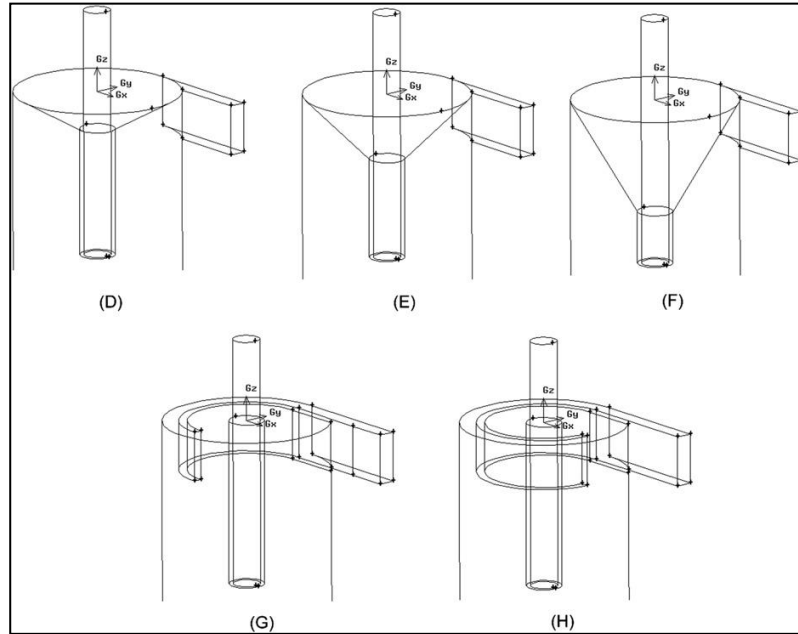


Figura 2.4 – Diferentes modificações nos hidrociclones, (D) 30° - cone, (E) 45° - cone, (F) 60° - cone, (G) 180° - canal guia, (H) 270° - canal guia (HWANG *et al.*, 2013).

Hwang *et al.* (2013) realizaram o estudo utilizando o *software* FLUENT® e os resultados obtidos através das simulações se encontram na Figura 2.5.

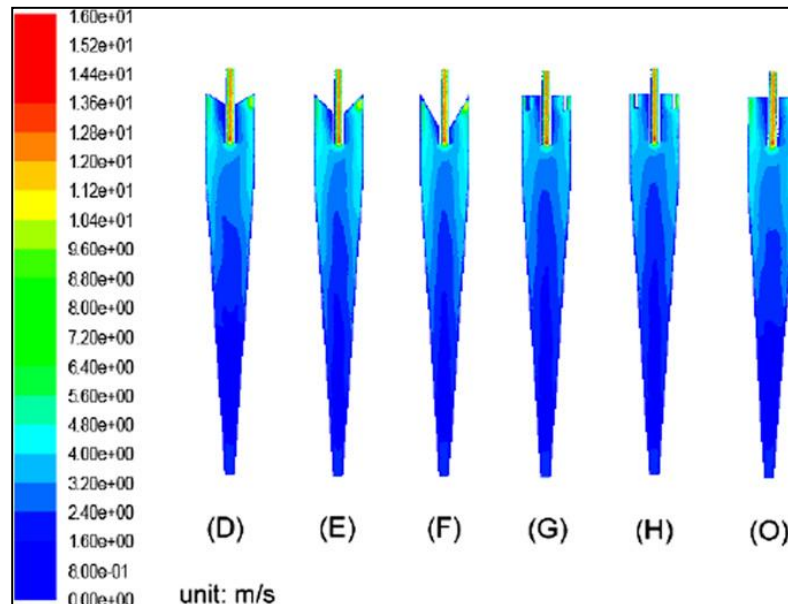


Figura 2.5 - Comparação das distribuições de velocidade entre os diferentes modelos de hidrociclone (HWANG *et al.*, 2013).

A distribuição de velocidades dos hidrociclones com um cone no topo, tipos D, E e F, é similar à do hidrociclone original. No entanto, a inserção do cone na parte superior pode diminuir a área de baixa velocidade em torno da superfície externa *vortex finder* para reduzir a circulação de partículas finas. Assim sendo, a eficiência de separação pode ser significativamente melhorada (HWANG *et al.*, 2013).

Hwang *et al.* (2013) verificaram que as distribuições de velocidades nos tipos G e H foram semelhantes às do tipo O, sendo que nenhum efeito significativo do canal guia na distribuição de velocidade pôde ser observado. A instalação de um canal guia a partir da entrada aumentou a eficiência da separação de partículas mais finas, porém diminuiu o rendimento de separação para partículas maiores do que 3 mm. Portanto, a classificação das partículas não é eficaz através da instalação de um canal guia.

### 2.6.3 - Hidrociclones de Três Produtos

Os hidrociclones de três produtos se diferem do convencional por apresentarem três correntes de saída, podendo ser duas correntes de *overflow* e uma de *underflow*, ou o inverso, duas correntes de *underflow* e uma de *overflow*.

Esse equipamento foi projetado com o intuito de minimizar a presença de finos na corrente de *underflow*, reduzindo dessa maneira, a moagem em excesso do material e custos decorrentes desse processo (OBENG; MORRELL, 2003; MAINZA *et al.*, 2004).

Mainza *et al.* (2004) utilizaram a platina como partícula em seus estudos experimentais com o hidrociclone de três produtos. A Figura 2.6 apresenta este hidrociclone, que possui um *vortex finder* inserido de forma concêntrica ao existente no Hidrociclone Convencional.

Simulações CFD foram realizadas por Mainza *et al.* (2006) para o estudo do hidrociclone de três produtos comparado com o Hidrociclone Convencional. Os autores notaram que houve a formação de *air core* no *vortex finder* interior, da mesma forma que no Hidrociclone Convencional, enquanto que na região anular entre os *vortex finder* interno e externo não foi observado a presença de *air core*.

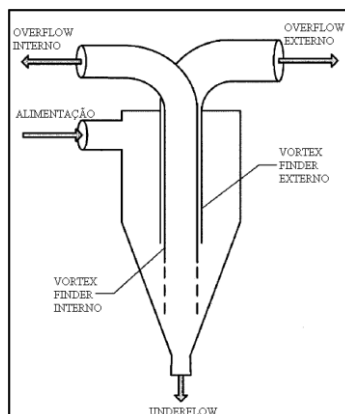


Figura 2.6 – Hidrociclone de três produtos (MAINZA *et al.*, 2004).

Obeng e Morrell (2003) estudaram um hidrociclone de três produtos semelhante ao da Figura 2.6, utilizando uma mistura de magnetita e sílica. Os autores relataram que esse equipamento fornecia uma corrente do *overflow* interno mais adequada para operações de flotação por *flash* do que o Hidrociclone Convencional. Ao mesmo tempo em que a corrente do *overflow* externo possuía as mesmas características necessárias para o processo subsequente de flotação.

Ahmed *et al.* (2009) desenvolveram e testaram um hidrociclone de três produtos com uma corrente de *overflow* e duas correntes de *underflow*, sendo uma corrente de partículas medianas e a outra de partículas grossas. A corrente de *underflow* de partículas medianas situava-se no meio da parte cônica paralelamente a alimentação do hidrociclone (Figura 2.7).

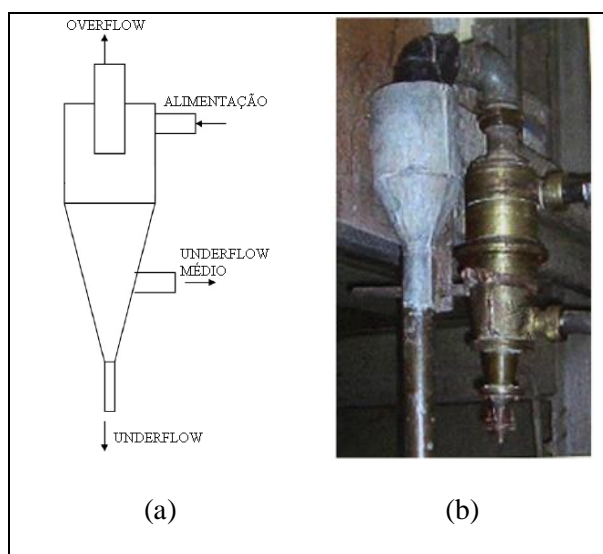


Figura 2.7 – Representações esquemática (a) e real (b) do hidrociclone de três produtos (AHMED *et al.*, 2009).



Os estudos realizados mostraram que o hidrociclone de três produtos produziu três correntes diferentes de acordo com o percentual de sólidos e distribuição granulométrica das partículas. Além disso, conforme a modificação nos diâmetros do *overflow*, do *underflow* médio e do *underflow*, o hidrociclone poderia ser usado como clarificador ou concentrador (AHMED *et al.*, 2009).

#### 2.6.4 - Mini-Hidrociclones com Diferentes Arranjos na Alimentação

Yang *et al.* (2013) estudaram mini-hidrociclones utilizando fluidodinâmica computacional para melhorar a eficiência de separação de partículas finas. Os autores propuseram diferentes arranjos de partículas na entrada do hidrociclone. Foram estudados um mini-hidrociclone com arranjo comum (CM-hidrociclone), um mini-hidrociclone com rotação positiva (PRM-hidrociclone), com um arranjo de partículas em que o diâmetro destas aumentava do centro em direção à parede da alimentação e um mini-hidrociclone com rotação inversa (RRM-hidrociclone) com um arranjo de partículas contrário ao anterior, como apresentados na Figura 2.8.

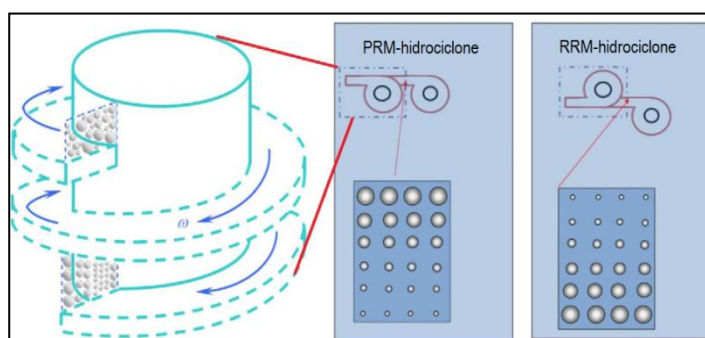


Figura 2.8 – Diagrama esquemático dos arranjos de partículas (YANG *et al.*, 2013).

A Figura 2.9 apresenta as malhas que foram utilizadas para o estudo dos mini-hidrociclones. Yang *et al.* (2013) observaram que a posição das partículas na entrada do hidrociclone influenciou sua trajetória, as partículas mais próximas à parede externa tendem a ser coletadas na corrente de *underflow* e, quanto maior o tamanho da partícula, menor a

influência da posição de entrada e maior a possibilidade de deixar o hidrociclone pelo *underflow*.

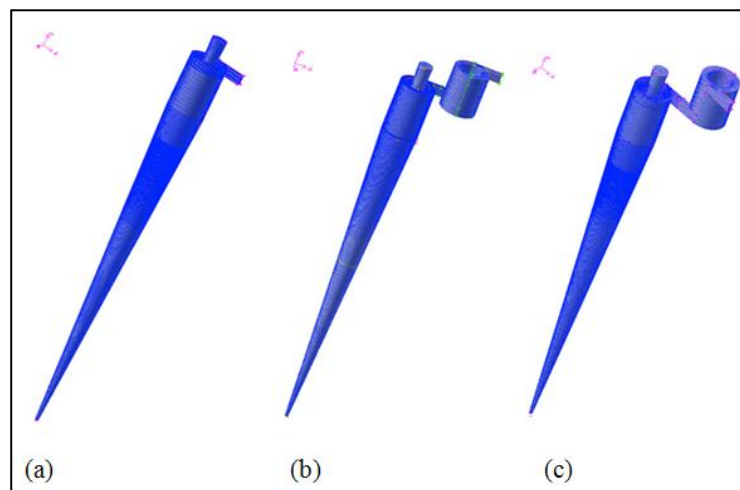


Figura 2.9 – a) Malha para o CM-hidrociclone; b) Malha para o PRM-hidrociclone; c) Malha para o RRM-hidrociclone (YANG *et al.*, 2013).

De acordo com Yang *et al.* (2013) o arranjo na entrada do hidrociclone foi significativo na eficiência de separação das partículas. O RRM-hidrociclone apresentou uma eficiência de 83%, um valor muito maior do que os apresentados pelos CM-hidrociclone (60%) e PRM-hidrociclone (50%). Além disso, o PRM-hidrociclone eliminou o fluxo de curto-circuito.

### 2.6.5 - Hidrociclone com Entrada Tangencial de Água

Uma das maneiras de reduzir a presença de finos na corrente de *underflow* é utilizar uma entrada tangencial de água logo acima do orifício de *underflow*. Esse fluxo de água tem o objetivo de arrastar consigo as partículas finas para o orifício de *overflow*, enquanto que as partículas que não foram arrastadas são coletadas no *underflow*. Esse equipamento foi utilizado com sucesso na indústria de papel, na deslamagem de produtos minerais e para a classificação de areia (FARGHALY *et al.*, 2010).

Trabalhos reportados na literatura mostraram que o hidrociclone com injeção tangencial de água melhora a eficiência de separação das partículas. Bhaskar *et al.* (2005) e Farghaly *et al.* (2010) estudaram o efeito das variáveis de projeto e operacionais de um

hidrociclone com injeção tangencial de água. Dueck *et al.* (2010) propuseram um modelo matemático que prevê a performance deste tipo de hidrociclone, esse modelo revela os efeitos da taxa de injeção, a velocidade de injeção, e a localização da injeção na parte cônica.

### 2.6.6 - Hidrociclone Elétrico

O hidrociclone elétrico foi desenvolvido a fim de melhorar a eficiência de separação das partículas. Através da aplicação de uma diferença de potencial, o Diâmetro de Corte do equipamento pode ser reduzido (YOSHIDA *et al.*, 2006). Outro trabalho do mesmo grupo de estudo avaliou o efeito do pH da suspensão, o diâmetro da barra metálica central e a presença ou ausência da corrente de *underflow* no Diâmetro de Corte das partículas de um hidrociclone elétrico (PRATARN *et al.*, 2008).

Nenu *et al.* (2010) desenvolveram um trabalho voltado ao estudo desse equipamento utilizando sílica como material particulado. Uma haste central foi inserida no interior da parte cônica do hidrociclone para que fosse possível a aplicação da diferença de potencial. A Figura 2.10 apresenta um esboço desse modelo de hidrociclone.

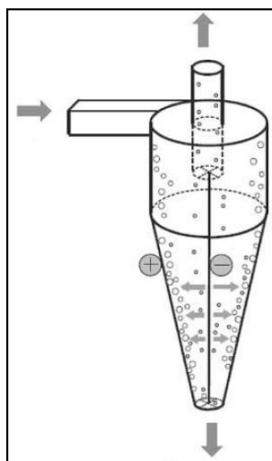


Figura 2.10 – Mecanismo de coleta de partículas em hidrociclone elétrico (NENU *et al.*, 2010).

Neste estudo, foram avaliados o efeito da vazão de entrada, o potencial eletrostático aplicado e o pH no desempenho de separação de um hidrociclone elétrico. Os autores concluíram que a eficiência de separação do hidrociclone elétrico é elevada devido a um

decréscimo da vazão de entrada, a um aumento do potencial eletrostático aplicado e a um aumento dos valores do pH da suspensão.

### 2.6.7 - Hidrociclones com Alterações no *Vortex Finder*

Por meio de técnicas de CFD e simulações tridimensionais Wang e Yu (2008) avaliaram o efeito da espessura da parede do *vortex finder* no desempenho do hidrociclones. Posteriormente, em seus estudos experimentais, Silva (2012) verificou a influência que essa modificação exercia sobre o hidrociclone HC11. Para tanto, Silva (2012) testou três dimensões para a espessura da parede: 0,22; 1,05 e 2,65 mm, as quais podem ser vistas na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Dutos de *overflow* com as diferentes espessuras de parede do *vortex finder* ( $\kappa$ ) avaliadas (SILVA, 2012).

Segundo Wang e Yu (2008) o aumento da espessura da parede do *vortex finder* provocou uma diminuição na eficiência de separação para partículas maiores, porém essa variável manteve-se inalterada para as partículas menores. Por sua vez, Silva (2012) observou que com o incremento na espessura da parede do *vortex finder* a perda de carga, e conseqüentemente, o Número de Euler não foram muito influenciados por esta variável. A Razão de Líquido do equipamento atingiu um valor máximo e então diminuiu. O hidrociclone com espessura intermediária (1,05 mm) apresentou um desempenho superior, com maior Eficiência Total de Separação e menor Diâmetro de Corte Reduzido.

Aplicando técnicas de CFD, Wang e Yu (2008) propuseram outra modificação na geometria do hidrociclone, a inserção de um *vortex finder* do tipo coifa. De acordo com os autores, estudos computacionais da geometria convencional demonstraram que o fluxo de curto-circuito existe ao longo da parte externa do *vortex finder*, resultando em uma diminuição da eficiência de separação. A inserção do *vortex finder* tipo coifa melhorou consideravelmente o desempenho do hidrociclone em estudo, reduzindo a queda de pressão e aumentando a eficiência de coleta.

Dessa forma, baseado no trabalho de Wang e Yu (2008), Silva (2012) avaliou experimentalmente três modelos de *vortex finder* tipo coifa, como mostra a Figura 2.12.

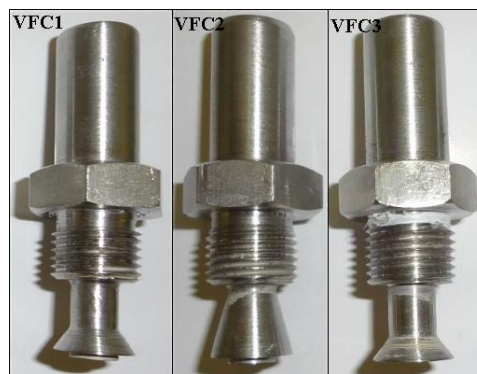


Figura 2.12 - *Vortex finder* tipo coifa (SILVA, 2012).

Silva (2012) verificou que a utilização da coifa modifica o escoamento no interior do hidrociclone. A presença desse dispositivo produz correntes de *underflow* de maior vazão e menor concentração, levando a Eficiências Totais de Separação em torno de três pontos percentuais de diferença menor em relação a um hidrociclone de mesma geometria, porém sem a coifa.

## 2.7 - Hidrociclone Filtrante

Com o objetivo de melhorar o desempenho dos hidrociclones, reduzindo os custos operacionais e elevando o potencial de separação, pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia propuseram a construção de um novo equipamento, o Hidrociclone Filtrante. Este equipamento diferencia-se do convencional por apresentar uma parede cônica feita de material poroso, tornando-a permeável.

A Figura 2.13 apresenta um esquema correlacionando o Hidrociclone Convencional e o filtrante. O processo de separação do Hidrociclone Filtrante é semelhante ao do equipamento convencional, sendo que no novo equipamento há o surgimento de uma corrente adicional de fluido ( $Q_F$ ), advinda da coleta de filtrado produzido na região cônica do separador, além das vazões volumétricas de alimentação ( $Q$ ), *overflow* ( $Q_O$ ) e *underflow* ( $Q_U$ ).

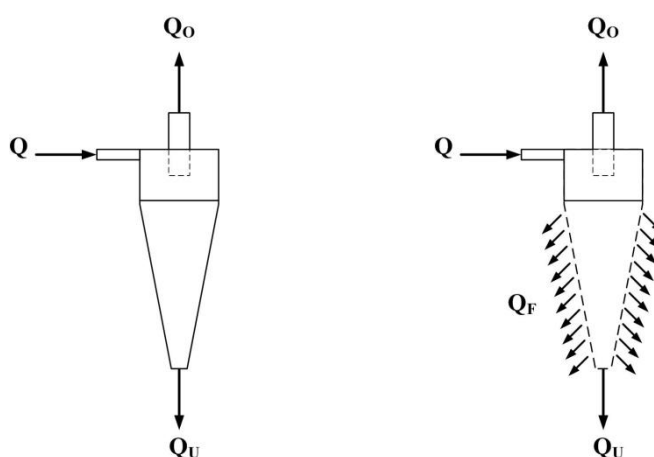


Figura 2.13 – Esquema de um Hidrociclone Convencional e de um Hidrociclone Filtrante.

O Hidrociclone Filtrante foi objeto de patente do Departamento de Engenharia Química da UFU em 1991. Este equipamento foi inspirado em um sedimentador com fundo filtrante desenvolvido por Damasceno e Massarani (1986). Estudos realizados por Henrique *et al.* (1987) verificaram que o sedimentador com fundo filtrante apresentava uma redução de 50 % da área requerida para a sedimentação em relação ao convencional.

O primeiro trabalho realizado com hidrociclones filtrantes foi conduzido por Lanna *et al.* (1992). A fim de estudar o desempenho, a Eficiência Total de Separação e o Diâmetro de Corte em relação ao equipamento convencional, foi construído um Hidrociclone Filtrante segundo a geometria Bradley, com uma seção cilíndrica de 30 mm de diâmetro e foram utilizados três diâmetros de *underflow* iguais a 3, 4 e 5 mm. O equipamento foi operado em uma queda de pressão variando entre 0,55 e 2,25 kgf/cm<sup>2</sup>. O material particulado utilizado durante os experimentos foram o carbonato de cálcio e a sulfato de bário (barita). A região cônica do Hidrociclone Filtrante foi construída de um tecido de nylon.

Os autores observaram que o Hidrociclone Filtrante apresentou acréscimos na vazão volumétrica de alimentação bem como na concentração de sólidos na corrente de *underflow* em relação ao convencional. Foi verificado também, um decréscimo nos custos energéticos

devido à queda no Número de Euler. Em contrapartida, houve uma diminuição na Eficiência Total e um aumento no Diâmetro de Corte Reduzido.

Por intermédio da sistemática de Massarani (1989) para Hidrociclones Convencionais, as principais informações experimentais obtidas por Lanna *et al.* (1992) são apresentadas nas Equações (2.5), (2.6) e (2.7):

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,039 \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + 1,73R_L} \exp(4,5C_V) \quad (2.5)$$

$$R_L = 1,88 \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^{0,67} \quad (2.6)$$

$$Eu = 5313 \quad (2.7)$$

Os Hidrociclones Filtrantes da família Bradley continuaram sendo estudados por Vieira e Barrozo (1997), nas mesmas condições operacionais e geométricas de Lanna *et al.* (1992). Porém o meio filtrante utilizado na seção cônica foi modificado, passando a ser constituído de um tecido de polipropileno. O material particulado utilizado foi a barita.

Vieira e Barrozo (1997) observaram que o hidrociclone com meio filtrante de polipropileno apresentou resultados semelhantes àquele com meio filtrante de nylon se comparados ao convencional, diferindo apenas na ordem de grandeza. Assim como no trabalho anterior, foi utilizada a sistemática de Massarani (1989) para propor as equações de projeto para o Hidrociclone Filtrante de polipropileno (Equações 2.8, 2.9 e 2.10):

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,047 \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + 1,73R_L} \exp(4,5C_V) \quad (2.8)$$

$$R_L = 0,80 \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^{0,49} \quad (2.9)$$

$$Eu = 4265 \quad (2.10)$$

A resistência do meio filtrante não é levada em consideração na sistemática de Massarani (1989), portanto, as conclusões obtidas nos trabalhos de Lanna *et al.* (1992) e Vieira e Barrozo (1997) tornam-se específicas para o meio filtrante utilizado e não são válidas para a predição do desempenho de outros hidrociclones Bradley com cones filtrantes de material diferente.

Diante disso, Souza (1999) propôs uma metodologia que incluía o efeito do meio filtrante no processo de separação para hidrociclones da família Bradley. Neste trabalho, foram avaliados Hidrociclones Filtrantes nas mesmas condições geométricas e operacionais dos trabalhos anteriores, porém com cones confeccionados de partículas de bronze sinterizado. O material particulado utilizado nos experimentos foi o pirocloro, minério com aproximadamente 63,2% de  $Nb_2O_5$ .

Souza (1999) propôs uma formulação para as equações de projeto do Hidrociclone Filtrante acrescentando as variáveis relacionadas à filtração, resistência do meio filtrante ( $R_m$ ) e resistividade da torta ( $\alpha$ ), às variáveis clássicas já utilizadas. Porém a resistividade da torta mostrou-se irrelevante ao processo, já que não havia a formação de torta no interior do hidrociclone devido às altas forças cisalhantes presentes na parede do equipamento.

Após grande esforço experimental, Souza (1999) obteve os dados necessários para obter as equações que previssessem a performance dos hidrociclones filtrantes segundo a geometria Bradley. O autor constatou que nas mesmas condições operacionais de um Hidrociclone Convencional, o Hidrociclone Filtrante da família Bradley apresentou acréscimos na vazão volumétrica de alimentação. Esse acréscimo na capacidade de processamento era proporcional ao inverso da resistência do meio filtrante, como mostram as Equações (2.11) e (2.12):

$$Q = Q_{conv} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{(-\Delta P)}{\mu}} f(R_m) \quad (2.11)$$

Em que:

$$f(R_m) = \frac{2\pi\varepsilon(L-L_1)}{R_m \ln\left(1 + \frac{4\varepsilon}{D_c + D_{inf}}\right)} \quad (2.12)$$

Foi observado por Souza (1999) que houve um decréscimo no Número de Euler e que esta grandeza para os Hidrociclones Filtrantes é uma função da resistência do meio filtrante, da Razão de Líquido e das características geométricas do equipamento, como apresentado na Equação (2.13):

$$Eu = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{Eu_{conv}}} + (29,6 \pm 2,3) R_L \sqrt{\frac{8\rho}{\mu\pi^2 D_c^4}} f(R_m)\right)^2} \quad (2.13)$$



Souza (1999) observou que à medida que a resistência do meio filtrante aumentava a Razão de Líquido também recebia acréscimos. Este fato está relacionado à existência do efeito de migração de corrente nos Hidrociclones Filtrantes, pois acredita-se que a corrente de filtrado pode interferir nos perfis dos vórtices interno e externo gerados pela turbulência através da modificação nas relações entre os volumes das correntes de *overflow* e *underflow* que compõem esses vórtices. Assim, para um meio filtrante de baixa resistência, esse efeito seria mais intenso direcionando um maior volume da suspensão para a corrente de *overflow*. Conseqüentemente, haveria uma diminuição no valor da Razão de Líquido, pois um volume de suspensão menor deixaria o hidrociclone pelo orifício de *underflow*. Os Hidrociclones Filtrantes da família Bradley têm sua Razão de Líquido estimada pela Equação (2.14).

$$R_L = \frac{1}{1,69 - 8,66 \cdot 10^{-6} (R_m D_c)^{0,5} \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^{\exp(-0,69 + 1,06 \cdot 10^{-21} (R_m D_c)^2)}} \quad (2.14)$$

Os Diâmetros de Corte envolvendo Hidrociclones Filtrantes da geometria Bradley foram maiores que aqueles obtidos na operação com Hidrociclones Convencionais (SOUZA, 1999), diminuindo, dessa forma, a eficiência de coleta. O autor sugeriu que esse acréscimo do Diâmetro de Corte ocorria devido à migração de corrente do vórtice externo para o vórtice interno, haveria um arraste mais intenso das partículas no sentido da corrente de *overflow*. Esse efeito de “mistura” seria mais intenso em meios mais permeáveis, segundo o autor. A Equação (2.15) permite prever os Diâmetros de Corte reduzidos para Hidrociclones Filtrantes de geometria Bradley.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,0640 \pm 0,0042) \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} (1 - R_L)^2 \quad (2.15)$$

Posteriormente, Vieira (2001) conduziu estudos referentes à família Rietema a fim de verificar a influência do meio filtrante em hidrociclones desta geometria. Neste estudo foram avaliados três cones filtrantes, construídos de bronze sinterizado e possuindo diferentes resistências a filtração, nas mesmas condições operacionais que os hidrociclones Bradley estudados por Lanna *et al.* (1992) e Souza (1999). O material particulado utilizado durante os experimentos foi o pirocloro.

Vieira (2001) verificou que as Razões de Líquido para os Hidrociclones Filtrantes sofreram um aumento em relação às do Hidrociclone Convencional da família Rietema, gerando correntes de *underflow* mais diluídas. A Razão de Líquido para os Hidrociclones

Filtrantes Rietema foi correlacionada em função dos grupos adimensionais  $D_U/D_c$  e  $R_m D_c$ , segundo a Equação (2.16):

$$R_L = \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^{1,67 \pm 0,07} (R_m D_c)^{0,092 \pm 0,006} \quad (2.16)$$

Foi observado que, nas mesmas condições de queda de pressão, houve uma diminuição nas vazões volumétricas dos equipamentos filtrantes. Assim, os Hidrociclones Filtrantes Rietema apresentaram acréscimos para o Número de Euler em relação ao convencional de mesma geometria (VIEIRA, 2001). O Número de Euler dos Hidrociclones Filtrantes pode ser descrito pela Equação (2.17):

$$Eu = Re^{(0,63 \pm 0,02)} \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^{(-0,73 \pm 0,08)} \quad (2.17)$$

Vieira (2001) verificou que, nas mesmas condições de vazão volumétrica de um Hidrociclone Convencional, os Hidrociclones Filtrantes Rietema apresentaram valores menores para o Diâmetro de Corte Reduzido e, por consequência, um aumento na Eficiência Total. Isto pode ser explicado pelo aumento na Razão de Líquido deste equipamento. A Equação (2.18) pode prever o Diâmetro de Corte Reduzido para hidrociclones dessa família:

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = (0,036 \pm 0,001) \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + (0,51 \pm 0,12) R_L} \exp(4,5 C_v) \quad (2.18)$$

Diante dos resultados obtidos, e comparando com o trabalho de Souza (1999), Vieira (2001) concluiu que a geometria do tronco de cone filtrante era importante no processo de separação sólido-líquido. O Hidrociclone Filtrante pode apresentar um determinado desempenho por manter uma menor ou maior distância entre os vórtices interno e externo, a depender do ângulo de abertura do tronco de cone.

Segundo Vieira (2001), nos Hidrociclones Filtrantes Bradley, havia uma interferência maior do vórtice interno sobre o vórtice externo, promovendo o arraste de líquido e de partículas desta região para a corrente de *overflow*, devido a uma menor abertura para o tronco de cone (9°). Por conseguinte, haveria um decréscimo na Razão de Líquido, causando uma diminuição na Eficiência Total e um aumento no Número de Euler. Já nos Hidrociclones Filtrantes Rietema, havia uma maior distância entre os vórtices forçado e livre, pelo fato do ângulo do tronco de cone ser maior do que nos hidrociclones Bradley (20°). Dessa forma, o líquido e as partículas presentes no vórtice externo estão menos suscetíveis a

ser arrastados pelo vórtice interno e estão mais aptos a manterem-se nesta região, até que alcancem a corrente de *underflow*.

Os Hidrociclones Filtrantes da família Krebs foram estudados por Arruda *et al.* (2002), cujo ângulo de abertura do tronco de cone era  $\theta = 12,7^\circ$ , valor intermediário aos hidrociclones de Bradley ( $\theta = 20^\circ$ ) e Rietema ( $\theta = 9^\circ$ ). Nesse estudo foi observado que o meio filtrante não acarretava modificações significativas nas principais variáveis relacionadas ao desempenho do hidrociclone Krebs. Em comparação com as demais famílias estudadas, os Hidrociclones Filtrantes Krebs tiveram Número de Euler próximo àqueles encontrados para os equipamentos filtrantes de geometria Rietema.

Os Hidrociclones Filtrantes Krebs apresentaram o menor Diâmetro de Corte Reduzido dentre as famílias já estudadas (Bradley e Rietema), devido as maiores Razões de Líquido e vazões volumétricas de alimentação (ARRUDA *et al.*, 2002). Seguindo a sistemática de Massarani (1989), os autores propuseram um conjunto de equações de projeto para os Hidrociclones Filtrantes de geometria Krebs (Equações 2.19, 2.20 e 2.21):

$$Eu = Re^{0,6064} \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^{-0,9748} \quad (2.19)$$

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

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = 0,0295 \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + 1,307 R_L} \exp(4,5 C_V) \quad (2.21)$$

Arruda (2003) estudou Hidrociclones Filtrantes da família Demco, que são equipamentos que possuem a seção cônica idêntica a da geometria de Rietema. O autor percebeu que a inserção do meio filtrante na região cônica não acarretou grandes modificações na performance do Hidrociclone Filtrante em relação ao Hidrociclone Convencional de mesma família, assim como ocorreu com a família Krebs e ao contrário do encontrado para as geometrias Bradley e Rietema.

Segundo Arruda (2003) as vazões volumétricas da alimentação não sofreram variação significativa em relação ao Hidrociclone Convencional de geometria Demco. Neste estudo, foi observado que os hidrociclones da geometria Demco, apresentaram os menores valores para a Razão de Líquido dentre as demais geometrias já estudadas (Bradley, Rietema e Krebs). Além disso, a Razão de Líquido do Hidrociclone Filtrante Demco registrou

acréscimos significativos em relação ao convencional, proporcionando corrente de *underflow* mais diluída.

Os Hidrociclones Filtrantes da família Demco forneceram os menores números de Euler dentre todas as famílias estudadas. E em relação ao convencional, o equipamento filtrante não registrou mudança expressiva no valor do Número de Euler. O Hidrociclone Filtrante Demco, revelou-se um excelente concentrador (ARRUDA, 2003).

Baseado nos resultados experimentais disponíveis para todas as famílias de hidrociclones já estudadas (Bradley, Rietema, Krebs e Demco), Arruda (2003) propôs correlações de projeto de hidrociclones de acordo com a metodologia de Coelho e Medronho (2001) representadas pelas Equações (2.22) a (2.26):

$$Q = 0,036D_c^{0,0072} D_i^{0,476} (D_o^2 - D_u^2)^{0,574} (L-l)^{-0,176} \mu^{0,0144} \rho^{-0,014} \Delta P^{0,418} \exp(-1,9 \cdot 10^{-5} C_v) \quad (2.22)$$

$$R_L = 0,0477 \left( \frac{D_c}{D_o} \right)^{0,919} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{0,988} Eu^{-0,27} (R_m D_c)^{0,209} \quad (2.23)$$

$$Eu = 2408 D_c^{-1,017} \left( \frac{D_c}{D_i} \right)^{0,179} \left( \frac{D_c}{L-l} \right)^{-1,317} Re^{-0,626} \exp(0,72 C_v) \quad (2.24)$$

$$d'_{50} = \frac{5,072 D_c^{1,351}}{D_c^{0,263} (L-l)^{1,251}} \left[ \frac{\mu \rho Q}{(\rho_s - \rho)} \right]^{0,139} \left[ \ln \left( \frac{1}{R_L} \right) \right]^{0,373} \exp(8,438 C_v) \quad (2.25)$$

$$Stk_{50} Eu = 0,0055 \left( \frac{D_c}{D_o} \right)^{0,0075} \left( \frac{D_c}{L-l} \right)^{-1,921} \left[ \ln \left( \frac{1}{R_L} \right) \right]^{1,417} \exp(-2,264 C_v) \quad (2.26)$$

Outro importante trabalho desenvolvido a respeito de Hidrociclones Filtrantes foi a tese de doutorado de Vieira (2006). O autor teve como principal objetivo encontrar as dimensões geométricas e condições operacionais ótimas, nas quais os Hidrociclones Filtrantes apresentassem uma máxima eficiência de classificação (diminuição do Diâmetro de Corte) associada a um custo energético mínimo (baixos números de Euler). Para tanto, realizou um estudo no qual as relações geométricas empregadas alcançassem toda faixa de famílias de hidrociclones utilizadas comercialmente.

As variáveis geométricas escolhidas para o estudo de Vieira (2006) foram o diâmetro da alimentação ( $D_i$ ), o diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ), o comprimento total do hidrociclone ( $L$ ) e o ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ), sendo as três primeiras postas em termo de uma relação geométrica com o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone ( $D_c$ ). O diâmetro da parte

cilíndrica, o comprimento do *vortex finder* e o diâmetro de *underflow* foram mantidos fixos em 30, 12 e 5 mm, respectivamente. Um planeamento composto central com quatro réplicas no ponto central foi proposto para a análise das variáveis geométricas em questão. As relações geométricas dos 25 Hidrociclones Filtrantes e dos 25 Hidrociclones Convencionais estudados por Vieira (2006) encontram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Matriz de planeamento para a confecção dos hidrociclones (VIEIRA, 2006).

Configuração	$D_i/D_c$ [-]	$D_o/D_c$ [-]	$L/D_c$ [-]	$\theta$ [°]
1	0,16	0,22	4,7	11,2
2	0,16	0,22	4,7	17,8
3	0,16	0,22	6,9	11,2
4	0,16	0,22	6,9	17,8
5	0,16	0,32	4,7	11,2
6	0,16	0,32	4,7	17,8
7	0,16	0,32	6,9	11,2
8	0,16	0,32	6,9	17,8
9	0,26	0,22	4,7	11,2
10	0,26	0,22	4,7	17,8
11	0,26	0,22	6,9	11,2
12	0,26	0,22	6,9	17,8
13	0,26	0,32	4,7	11,2
14	0,26	0,32	4,7	17,8
15	0,26	0,32	6,9	11,2
16	0,26	0,32	6,9	17,8
17	0,13	0,27	5,8	14,5
18	0,29	0,27	5,8	14,5
19	0,21	0,19	5,8	14,5
20	0,21	0,35	5,8	14,5
21	0,21	0,27	3,9	14,5
22	0,21	0,27	7,6	14,5
23	0,21	0,27	5,8	9,0
24	0,21	0,27	5,8	20,0
25	0,21	0,27	5,8	14,5

Além das técnicas experimentais, o autor lançou mão da simulação por fluidodinâmica computacional bidimensional para possibilitar a melhor compreensão dos perfis de escoamento no interior do equipamento. A fim de validar a metodologia da simulação numérica, Vieira (2006) realizou simulações nas mesmas condições do trabalho de Dabir (1983), pois este contava com medidas experimentais confiáveis de perfis de velocidade do fluido no interior de um hidrociclone obtidos através da técnica LDA (Laser Doppler Anemometry). A Figura 2.14 mostra os dados experimentais de velocidade tangencial em diferentes números de Reynolds e posições axiais (Dabir, 1983) e os dados simulados por Vieira (2006).

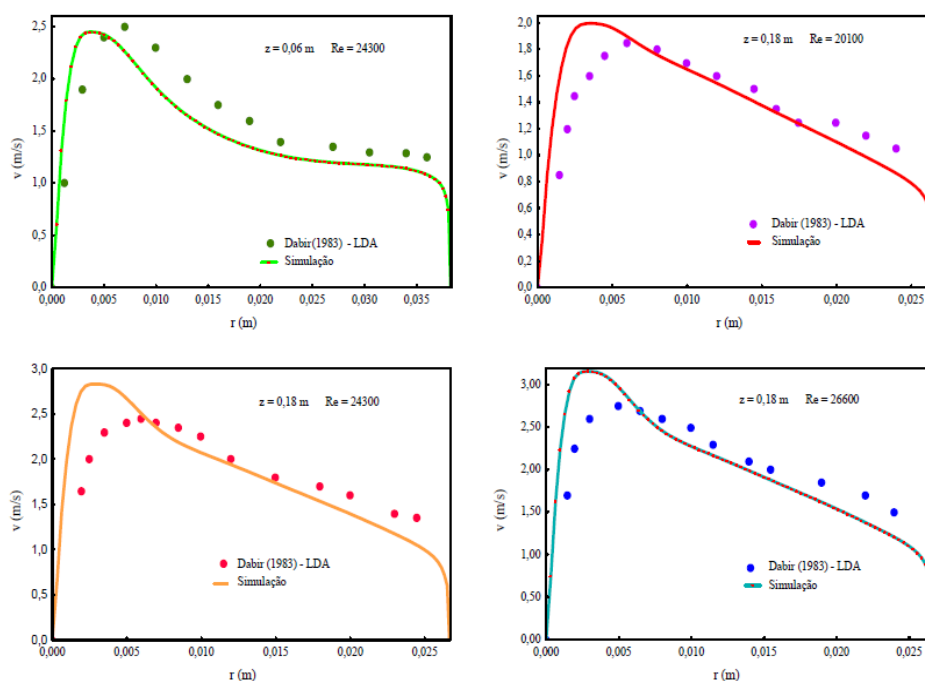


Figura 2.14 – Perfis de velocidade tangencial segundo Dabir (1983) e simulações via CFD realizadas por Vieira (2006).

Observando a Figura 2.14, percebe-se que os dados simulados por Vieira (2006) apresentam boa concordância com os dados experimentais de Dabir (1983), podendo assim, validar a metodologia de simulação. Após a validação, Vieira (2006) pôde analisar a influência do diâmetro de alimentação, do diâmetro de *overflow*, do comprimento do hidrociclone e da abertura do ângulo do tronco de cone para os hidrociclones de acordo com o planejamento da Tabela 2.2. Destaca-se que ao analisar uma determinada variável, as demais dimensões geométricas foram mantidas constantes.

Diante disso, foi verificado que um incremento no diâmetro de alimentação ( $D_i$ ) de um Hidrociclone Filtrante proporcionou um acréscimo na capacidade volumétrica de alimentação do equipamento, e, portanto, uma menor energia foi necessária para o bombeamento da suspensão. Já um incremento no diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ) no Hidrociclone Filtrante gerou um acréscimo na capacidade volumétrica de alimentação e diminuiu a Eficiência Total. Um aumento no comprimento total ( $L$ ) do Hidrociclone Filtrante influenciou apenas a capacidade de processamento do equipamento, já que numa mesma queda de pressão o Hidrociclone Filtrante foi capaz de processar volumes mais expressivos de suspensões, requerendo assim, menos energia de bombeamento. Por fim, uma diminuição no ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ) dos Hidrociclones Filtrantes favoreceu a Eficiência Total em virtude das maiores Razões de Líquido e menores velocidades radiais (VIEIRA, 2006).

Vieira (2006) utilizou a técnica de análise de superfície de respostas para avaliar a influência das variáveis geométricas no desempenho de Hidrociclones Filtrantes. A partir dos dados experimentais, foi realizada uma regressão múltipla dos valores e superfícies de resposta para o Número de Euler, a Razão de Líquido, a Eficiência Total e o Diâmetro de Corte foram estimadas, conforme as Equações (2.27), (2.28), (2.29) e (2.30). As variáveis  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$  representam os fatores  $D_i/D_c$ ,  $D_o/D_c$ ,  $L/D_c$  e  $\theta$ , respectivamente, e a variável  $X_5$  está relacionada à queda de pressão.

$$Eu = 1607 - 1176X_1 - 283X_2 - 183X_3 + 85X_5 + 604X_1^2 + 112X_2^2 \quad (2.27)$$

$$R_L = 21,14 - 7,21X_2 + 1,47X_3 - 4,26X_4 + 1,96X_3X_4 + 3,36X_2^2 \quad (2.28)$$

$$\eta = 65,18 - 4,94X_2 - 5,23X_4 + 2,05X_5 + 1,28X_2^2 \quad (2.29)$$

$$d_{50} = 5,17 + 1,61X_2 + 1,12X_4 - 0,41X_5 + 0,33X_2X_4 - 0,49X_2^2 \quad (2.30)$$

Em seu trabalho, Vieira (2006) propôs intervalos para as relações geométricas nos quais os Hidrociclones Filtrantes conseguissem conciliar baixos Números de Euler com as mais altas Eficiências Totais. Para tanto o hidrociclone deveria ter as relações geométricas nas seguintes condições:  $0,21 \leq D_i/D_c \leq 0,29$ ;  $D_o/D_c = 0,22$ ;  $4,7 \leq L/D_c \leq 7,6$  e  $11,2^\circ \leq \theta \leq 14,5^\circ$ . Assim, dentre os Hidrociclones Filtrantes estudados por Vieira (2006), o hidrociclone HF11 foi aquele que apresentou o melhor desempenho, cujas dimensões otimizadas para  $D_i/D_c$ ,  $D_o/D_c$ ,  $L/D_c$  e  $\theta$  foram respectivamente 0,26; 0,22; 6,9 e  $11,2^\circ$ . A Figura 2.15 mostra os resultados obtidos de Número de Euler ( $Eu$ ) e Eficiência Total ( $\eta$ ) para as 25 configurações de hidrociclones.

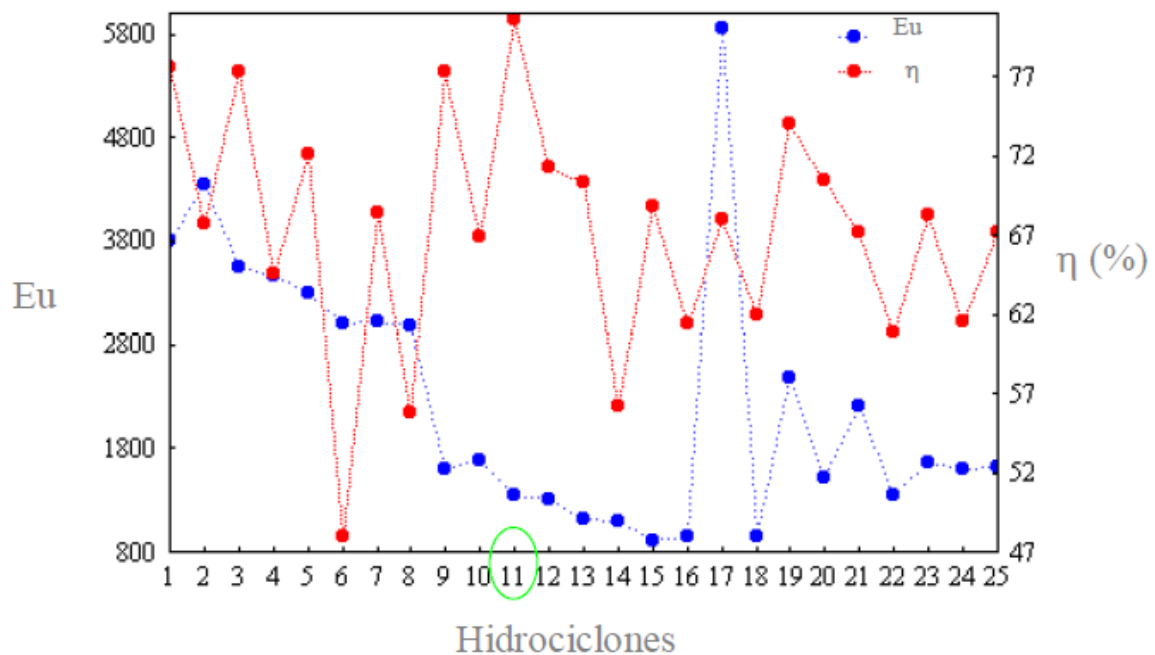


Figura 2.15 – Comparação entre os números de Euler e as Eficiências Totais para os Hidrociclones Filtrantes na queda de pressão de  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$  (VIEIRA, 2006).

Almeida (2008), a fim de dar continuidade ao trabalho de Vieira (2006), estudou a influência do diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e do comprimento do *vortex finder* ( $l$ ) na performance do Hidrociclone Filtrante HF11 pré-definido por Vieira (2006). Neste trabalho foram utilizados três níveis distintos para cada uma das variáveis estudadas. As dimensões utilizadas para o diâmetro de *underflow* foram 3, 4 e 5 mm. Já para o comprimento do *vortex finder* foram utilizadas as dimensões de 12, 21 e 30 mm. O material particulado escolhido para o estudo foi a rocha fosfática. Na execução dos experimentos, cada nível das variáveis supracitadas foi combinado entre si sob a forma de um planejamento de experimentos. Para melhor entendimento do escoamento interno dos equipamentos Almeida (2008) realizou também estudos de CFD.

Os resultados experimentais e via CFD obtidos por Almeida (2008) mostraram que a filtração foi um fenômeno benéfico para a separação, independentemente das combinações dos diâmetros de *underflow* e de comprimento do *vortex finder*. O Número de Euler da configuração filtrante sempre se apresentava inferior ao observado para a configuração convencional e os Diâmetros de Corte obtidos para o Hidrociclone Filtrante foram menores do que para o Convencional, refletindo em maiores eficiências de separação.



Almeida (2008) observou que o Número de Euler sofria uma elevação à medida que o comprimento do *vortex finder* aumentava. Já os Diâmetros de Corte atingiram valores mínimos, isto é, eficiência de coleta máxima, quando níveis intermediários de *vortex finder* foram utilizados. O autor verificou também, que a Razão de Líquido não era influenciada pelo comprimento do *vortex finder*, pois as quantidades de fluido descarregados na corrente de *underflow* eram quase que idênticas para qualquer nível desta variável.

Em se tratando da variável diâmetro de *underflow*, Almeida (2008) verificou que maiores diâmetros de *underflow* são mais interessantes, pois fornecem menor Número de Euler, implicando em um menor gasto energético. Por sua vez, a Razão de Líquido aumentava na medida em que se incrementava o diâmetro de *underflow*. A variável diâmetro de *underflow* influenciou diretamente no poder de classificação das partículas, pois quanto maior o valor da Razão de Líquido, maior também será o arraste de partículas para a corrente de *underflow* e, conseqüentemente, menores serão os Diâmetros de Corte.

O estudo de Almeida (2008) observou que o nível ideal das variáveis estudadas depende da aplicação de cada equipamento (classificador ou concentrador). Desta forma, se o equipamento for utilizado como classificador o diâmetro de *underflow* de 5 mm e o comprimento do *vortex finder* de 21 mm seriam ideais. Já se o hidrociclone for usado como concentrador recomenda-se o diâmetro de *underflow* de 3 mm e comprimento do *vortex finder* de 12 mm.

Dando seqüência aos estudos que visavam melhorar o desempenho do hidrociclone de geometria otimizada HC11, Façanha (2012) investigou a mudança da parede filtrante da seção cônica para a seção cilíndrica, dando origem ao Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante (HCiF). Para que fosse possível avaliar como a permeabilidade dos cilindros porosos influenciava o desempenho do Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante, o autor utilizou três matrizes cilíndricas porosas com diferentes permeabilidades ( $k_1 = 1,71 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ;  $k_2 = 2,95 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ;  $k_3 = 3,6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ). O material particulado utilizado nesse estudo foi a rocha fosfática.

Em se tratando do efeito do posicionamento do meio filtrante em seções distintas do hidrociclone, Façanha (2012) observou que tanto o Cilíndrico-Filtrante quanto o Cônico-Filtrante (HCoF) apresentaram decréscimos no Número de Euler em relação ao Hidrociclone Convencional (HCon). O Número de Euler para o equipamento HCiF foi cerca de 7 % menor do que para o HCoF. As Razões de Líquido dos equipamentos HCiF e HCoF sofreram decréscimos em relação ao HCon. Essa diminuição está associada a presença das matrizes porosas e ao aumento da capacidade de alimentação dos Hidrociclones Filtrantes que

modificaram a relação entre as componentes da velocidade do fluido de maneira a diminuir a porcentagem de líquido que passou a ser descarregada na corrente de *underflow*. Já em relação à Eficiência Total Reduzida houve um aumento para o hidrociclone HCoF e uma redução para o HCiF em relação ao HCon.

Façanha (2012) concluiu que, nas condições operacionais utilizadas, a escolha da posição da matriz porosa depende do interesse do usuário e do tipo de material particulado. O hidrociclone HCoF é mais indicado quando se faz uso de partículas mais finas, pois melhora a eficiência de separação com redução simultânea dos custos energéticos. Por sua vez, para materiais particulados mais “grossos”, o hidrociclone HCiF é mais vantajoso, pois é capaz de processar um volume maior de suspensão ao mesmo tempo em que mantém o desempenho de separação.

O desempenho do hidrociclone HCiF foi alterado significativamente de acordo com a permeabilidade empregada na região cilíndrica filtrante (FAÇANHA, 2012). A partir dos dados experimentais o autor observou que o Número de Euler, a Razão de Líquido, a Eficiência Total Reduzida e o Diâmetro de Corte Reduzido não decaíram ou aumentaram de forma indefinida com o acréscimo da permeabilidade do cilindro, houve um valor intermediário de permeabilidade que resultou nos maiores ou menores valores das respostas de interesse. O hidrociclone HCiF-k<sub>2</sub> (permeabilidade intermediária) foi o que apresentou os menores valores para o Número de Euler e para a Razão de Líquido. Já para a Eficiência Total Reduzida, foi observado que seções cilíndricas com permeabilidades mais altas prejudicariam a separação, assim, o hidrociclone HCiF-k<sub>1</sub> foi o equipamento que forneceu uma perda menos acentuada de material particulado.

Façanha (2012) verificou que, se a suspensão for composta de material particulado mais fino, dentre os Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes, a melhor opção seria o HCiF-k<sub>1</sub>, pois ele manteria bons valores para a Eficiência Total Reduzida associado a uma diminuição no Número de Euler. Entretanto, se o material for constituído de partículas mais “grossas”, o hidrociclone HCiF-k<sub>2</sub> seria o mais indicado, devido à grande redução apresentada para o Número de Euler.

Nesse contexto, acredita-se que há ainda possibilidades de se potencializar cada vez mais este equipamento separador. Logo, o objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho de um Hidrociclone Totalmente Filtrante (cilindro e cone permeáveis).

---

## Capítulo 3

# MATERIAL E MÉTODOS

---

Neste capítulo são apresentadas as informações relevantes sobre a metodologia de preparação da amostra a ser utilizada, a unidade experimental e os hidrociclones, bem como o procedimento experimental e a determinação das grandezas associadas à hidrociclonagem.

### 3.1 - Material Particulado

O fosfato, juntamente com o enxofre e o potássio, são matérias-primas de grande importância, pois fazem parte da composição de fertilizantes químicos, insumos fundamentais da agricultura. As principais reservas de rocha fosfática brasileiras estão localizadas nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, próximas aos principais mercados consumidores. Existem várias unidades produtoras de fertilizantes nas proximidades da cidade de Uberlândia. Em virtude disso, a rocha fosfática foi o material particulado escolhido para ser estudado nesse trabalho. O material particulado foi obtido junto à COPEBRÁS (Catalão – GO).

A preparação do material particulado constituiu-se na seleção de uma quantidade de rocha fosfática que foi inicialmente quarteada, a fim de que amostras representativas fossem coletadas para a realização de análises de densidade e granulometria.

A densidade real da rocha fosfática foi determinada pela técnica de picnometria com deslocamento de gás Hélio, realizada no equipamento AccuPyc 1330 da Micromeritics e foi equivalente a  $3,2447 \pm 0,0005 \text{ g/cm}^3$ .

A distribuição granulométrica típica da rocha fosfática que foi utilizada nesse estudo está apresentada na Figura 3.1 e foi obtida através do analisador de partículas por difração a *laser* da Malvern modelo Mastersizer Microplus. A dimensão característica fornecida pelo equipamento foi o diâmetro volumétrico das partículas.

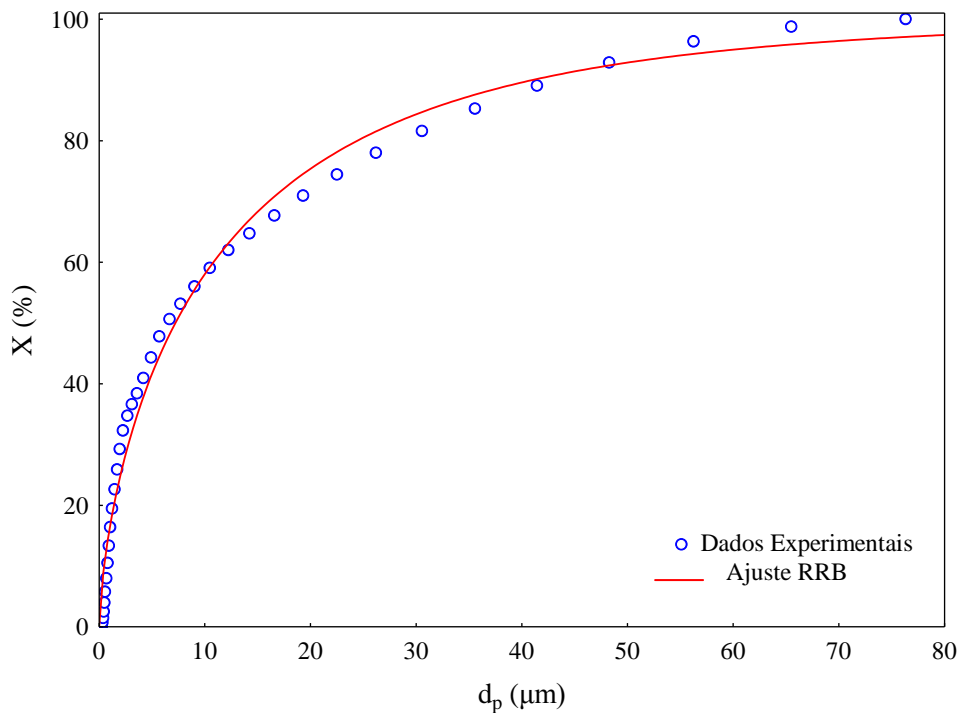


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica típica da rocha fosfática.

O modelo bi-paramétrico Rosin-Rammler-Bennet (RRB), representado pela Equação (3.1), foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, com um coeficiente de correlação linear (R) igual a 0,9927, cujos parâmetros  $d_{63,2}$  e  $n$  foram 12,15  $\mu\text{m}$  e 0,73, respectivamente.

$$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{d_{63,2}} \right)^n \right] \quad (3.1)$$

### 3.2 - Descrição da Unidade Experimental

Para a realização deste trabalho foi construída uma unidade experimental no Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (LASER/FEQUI/UFU). A unidade era constituída de um reservatório para armazenamento da suspensão (1), um agitador mecânico (2), uma bomba centrífuga (3), um medidor de vazão do tipo Coriolis (4), um manômetro digital (5) e um hidrociclone (6), como mostra a Figura 3.2.



Figura 3.2 – Unidade experimental.

A suspensão era bombeada através da tubulação que, em seu trajeto, era dividida em duas partes. Na parte superior, tinha-se a linha de alimentação do hidrociclone (A) e na parte inferior o duto de *bypass* (B), que ajuda no controle de vazão. O ajuste da vazão em cada uma das linhas era realizado manualmente, através de válvulas globo (a) e gaveta (b).

### 3.2.1 - Reservatório para Armazenamento da Suspensão

O tanque utilizado para armazenar a suspensão durante os experimentos era constituído de polietileno e tinha um volume de 250 L. Para prover uma boa homogeneização da mistura sólido-fluido e evitar a formação de vórtices no tanque de alimentação foram instalados um par de chicanas próximo às paredes e um agitador (1,5 cv) que operava a 1600 rpm.

### 3.2.2 - Bomba Centrífuga

A bomba utilizada na montagem da unidade experimental foi uma bomba centrífuga da Weir Minerals resistente à abrasão, desgaste e corrosão, própria para o bombeamento de polpas abrasivas. Com uma potência de 5 cv, fornecia energia suficiente para o bombeamento da suspensão do tanque para o hidrociclone.

### 3.2.3 - Medidor de Vazão

O sensor de medição de vazão (Metroval – modelo RHM08-3FS1PN) utilizado foi do tipo Coriolis e possuía um totalizador para a leitura das vazões (Figura 3.3). Esse medidor foi instalado na linha principal da unidade, para que pudesse ser determinada a vazão mássica na linha de alimentação do hidrociclone. A faixa de operação do equipamento era de 300 a 1800 kg/h.



Figura 3.3 – Medidor de vazão tipo Coriolis instalado na unidade de hidrociclonação – (I) sensor e (II) totalizador.

A fim de conferir a calibração do medidor de vazão realizada pela fábrica, foram feitas aferições com medidas gravimétricas confirmando os valores fornecidos pelo totalizador.

### 3.2.4 - Manômetro Digital

Imediatamente antes da entrada da alimentação no hidrociclone, foi acoplado um manômetro tipo Bourdon digital indicador de pressão, para a faixa de operação de 0 a 7 bar. O valor aferido no manômetro correspondia à queda de pressão no interior do equipamento, pois as correntes de *overflow* e *underflow* eram descarregadas à pressão atmosférica.

### 3.2.5 - Hidrociclones

No Capítulo 1 desta dissertação, foi relatado que o objetivo deste estudo era avaliar o desempenho de um hidrociclone com seções cilíndricas e cônicas filtrantes simultâneas, construído segundo a geometria otimizada por Vieira (2006). As principais relações geométricas utilizadas para os hidrociclones convencional (HC11) e filtrante (HF11), otimizados pelo referido autor, são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Relações geométricas dos Hidrociclones Convencionais e Filtrantes otimizadas por Vieira (2006) e utilizadas neste trabalho.

$D_i/D_c$	0,26
$D_o/D_c$	0,22
$L/D_c$	6,90
$\theta$	11,2°

Todos os equipamentos estudados durante o desenvolvimento deste trabalho possuíam o diâmetro da seção cilíndrica, o diâmetro de alimentação, o diâmetro de *overflow* e o comprimento do duto do *vortex finder* constantes e iguais a 30; 7,8; 6,6 e 12 mm, respectivamente. Foram utilizados três níveis distintos para o diâmetro do orifício de *underflow*, cujas dimensões estudadas foram: 3, 4 e 5 mm. Informações referentes ao ângulo do tronco de cone e comprimentos da região cônica e cilíndrica podem ser visualizadas na Figura 3.4.

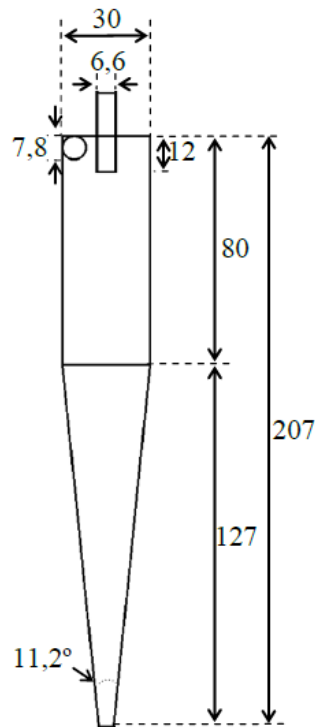


Figura 3.4 – Dimensões características do hidrociclone HC11 em milímetros.

As paredes maciças dos hidrociclones foram confeccionadas em latão e os cilindros e cones filtrantes foram manufaturados pela Indústria e Comércio de Filtros e Materiais Sinterizados Ltda. (Metalsinter). Neste trabalho, foi avaliado como a permeabilidade dos cilindros e cones porosos influenciava o desempenho do Hidrociclone Totalmente Filtrante em relação aos Hidrociclones Convencional, Cônico-Filtrante e Cilíndrico-Filtrante. Para tanto, foram utilizadas três matrizes porosas para as seções cilíndrica e cônica confeccionadas com partículas de bronze sinterizado de 50, 25 e 5  $\mu\text{m}$ . Para cada uma das granulometrias originou-se uma determinada permeabilidade, sendo que para os cilindros foram utilizados índices numéricos ( $k_1 < k_2 < k_3$ ) e para os cones foram utilizados índices literais ( $k_a < k_b < k_c$ ).

Para diferenciar os diversos hidrociclones, será adotada a seguinte nomenclatura: HCon para o **Hidrociclone Convencional**; HCiF- $k_1$ , HCiF- $k_2$  e HCiF- $k_3$  para os **Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes**; HCoF- $k_a$ , HCoF- $k_b$  e HCoF- $k_c$  para os **Hidrociclones Cônico-Filtrantes**; e HCiCoF- $k_{1a}$ , HCiCoF- $k_{2b}$  e HCiCoF- $k_{3c}$  para os **Hidrociclones Cilíndrico-Cônico-Filtrante** (doravante denominado no texto de Hidrociclones Totalmente Filtrantes). Os quatro modelos de hidrociclones estudados estão apresentados na Figura 3.5.



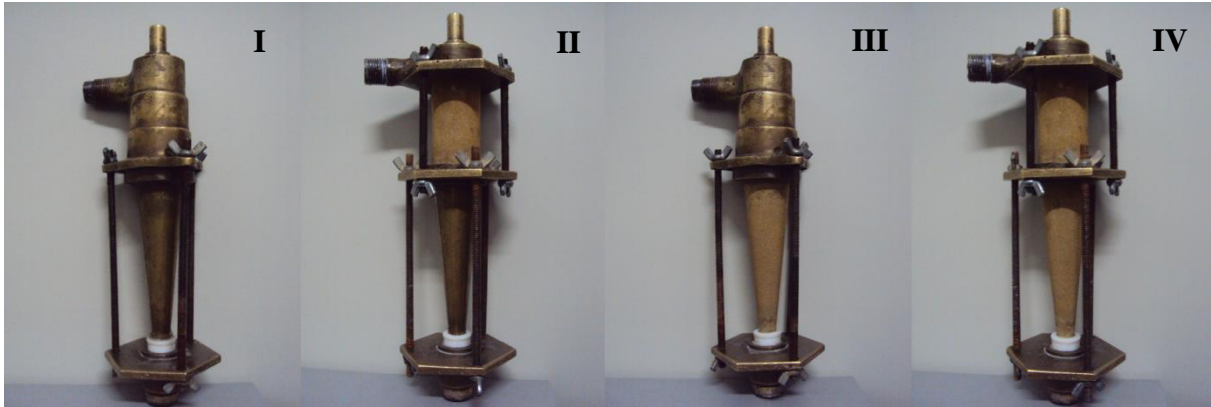


Figura 3.5 – (I) HCon, (II) HClF, (III) HCoF e (IV) HClCoF.

As matrizes porosas utilizadas no presente trabalho eram limpas e, portanto, foi necessário o procedimento de colmatção antes de utilizá-las nos experimentos. Após este procedimento, foram realizados testes de filtração conforme Rocha e Vieira (2012) para a determinação das permeabilidades das paredes filtrantes. As porosidades das matrizes porosas foram obtidas segundo a metodologia de Darby (2001). Os valores obtidos para tais propriedades estão especificados na Tabela 3.2. Maiores detalhes para os cálculos das propriedades podem ser encontrados no Apêndice A.

Tabela 3.2 – Propriedades das matrizes porosas cilíndricas e cônicas.

Equipamento	Permeabilidade (m <sup>2</sup> )	Porosidade (%)
HClF-k <sub>1</sub>	1,91.10 <sup>-16</sup>	5,91
HClF-k <sub>2</sub>	2,94.10 <sup>-16</sup>	6,78
HClF-k <sub>3</sub>	8,85.10 <sup>-16</sup>	9,59
HCoF-k <sub>a</sub>	1,95.10 <sup>-16</sup>	5,95
HCoF-k <sub>b</sub>	4,55.10 <sup>-16</sup>	7,79
HCoF-k <sub>c</sub>	8,77.10 <sup>-16</sup>	9,56

Observa-se que os valores encontrados para as permeabilidades dos meios porosos k<sub>1</sub> e k<sub>a</sub>, k<sub>2</sub> e k<sub>b</sub> e, k<sub>3</sub> e k<sub>c</sub> não foram iguais apesar de cada par ter sido construído com a mesma granulometria de bronze sinterizado. Isso está relacionado possivelmente ao tempo de cura do processo de sinterização. Cabe ainda ressaltar que as paredes porosas possuem geometrias diferentes (uma é cilíndrica e a outra cônica) e ao final do processo de colmatção essas paredes filtrantes podem também adquirir permeabilidades diferentes.

Assim como nos trabalhos anteriores realizados nesta instituição, a presente dissertação manteve a montagem modular do equipamento (VIEIRA, 2006; ALMEIDA, 2008, FAÇANHA, 2012; SILVA, 2012). As seções cilíndricas e cônicas eram acopladas por meio de travas mecânicas. Já os dutos de alimentação, *overflow* e *underflow* eram acoplados através de sistemas de roscas.

Vale ressaltar que, embora dados experimentais para os hidrociclones convencional (HCon), cônico filtrante (HCoF) e cilíndrico filtrante (HCiF) já tenham sido obtidos por Vieira (2006), Almeida (2008) e Façanha (2012), respectivamente, foi necessária para efeito de comparação entre as configurações estudadas, a realização dos experimentos utilizando esses equipamentos novamente, pois apesar do meio poroso ser de fabricação da mesma empresa, não era garantido que sua permeabilidade fosse a mesma. Outro fator foi que o material particulado utilizado no presente trabalho não possuía a mesma distribuição granulométrica dos trabalhos anteriores.

### 3.3 - Procedimento Experimental

Uma vez definida a configuração de hidrociclone a ser utilizado, o mesmo era montado e acoplado à unidade. Para a coleta dos dados experimentais os testes foram realizados em quatro níveis de queda de pressão: 0,9; 1,2; 1,5 e 1,8 kgf/cm<sup>2</sup>, doravante denominados de  $-\Delta P_1$ ,  $-\Delta P_2$ ,  $-\Delta P_3$  e  $-\Delta P_4$ , respectivamente.

A suspensão utilizada durante os ensaios experimentais foi preparada de modo que sua concentração volumétrica de material particulado fosse 1%. Assim, foram adicionados no tanque aproximadamente 7,5 kg de rocha fosfática para obter-se 230 L da suspensão.

Em seguida a homogeneização da suspensão era feita pela ação do agitador mecânico que permanecia em funcionamento durante todo o ensaio. Para que a operação da unidade fosse realizada de forma segura, todas as válvulas presentes nas tubulações eram verificadas e posicionadas de forma adequada. Após essas etapas, a bomba centrífuga era acionada para o início da operação. Por intermédio de válvulas globo e gaveta, a quantidade de suspensão enviada para a linha do hidrociclone era regulada até que o manômetro digital instalado à montante do hidrociclone indicasse a pressão de operação desejada.

Uma vez que o sistema estivesse em condições estáveis de queda de pressão iniciavam-se as medidas experimentais. A temperatura da suspensão no tanque era registrada

para posterior determinação da viscosidade e da densidade do fluido. Em seguida, a vazão mássica da alimentação do hidrociclone era lida no *display* do sensor de vazão e devidamente registrada. As vazões mássicas das correntes de *underflow*, *overflow* e filtrado foram determinadas através de técnicas gravimétricas (coleta e pesagem de amostras) em balança semi-analítica com precisão de  $\pm 0,01$  g.

Para a determinação das concentrações mássicas das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow*, amostras de cada uma dessas correntes eram coletadas em triplicata. Em seguida as amostras eram pesadas e levadas à estufa à  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 h, tendo suas massas aferidas novamente para os cálculos das concentrações.

Para as correntes de alimentação e *underflow* eram retiradas alíquotas para a medida da distribuição granulométrica. As análises das amostras coletadas eram realizadas no equipamento Mastersizer Microplus da Malvern, que se baseia na técnica de difração de raios *laser* para análise do diâmetro das partículas. Inicialmente, o sistema óptico do equipamento foi calibrado, através da medida do “branco” (água destilada e dispersante) que foi utilizado como referencial para as demais medidas. O dispersante utilizado foi hexametáfosfato de sódio (Calgon) na concentração de 1 g/L. Em seguida, a amostra a ser analisada era transferida para o béquer contendo o “branco” e submetida ao banho ultrassônico por aproximadamente 30 s para romper possíveis aglomerados de partículas existentes na amostra.

Na sequência dos procedimentos descritos anteriormente, iniciaram-se as análises mediante ao uso do *software* de aquisição e tratamento de dados do Malvern Mastersizer Microplus. Os dados obtidos através desse *software* eram enviados a uma planilha eletrônica na forma de diâmetros de partículas e frações cumulativas. Por fim, os parâmetros do modelo RRB eram estimados através de uma regressão não linear utilizando o *software* Statistica®.

A fim de verificar a reprodutibilidade das variáveis resposta, foram realizadas réplicas de alguns ensaios nas condições experimentais estudadas. Os desvios foram calculados através da relação entre o desvio padrão de cada grandeza e a média da mesma, cujos valores estão contemplados na Tabela 3.3.

Nota-se que, mesmo tomando todos os cuidados necessários, o desvio da medida é relativamente significativo para os parâmetros de distribuição granulométrica, Eficiências (Totais e Reduzidas) e Diâmetro de Corte (inclusive o reduzido).

Tabela 3.3 – Valores dos desvios experimentais das grandezas analisadas neste trabalho.

Variáveis	Desvio
$d_{63,2A}$	6,20%
$n_A$	1,88%
$d_{63,2U}$	3,62%
$n_U$	3,01%
$Cv_A$	1,74%
$Cv_U$	1,33%
$Q$	0,62%
$Q_U$	0,78%
$R_L$	0,25%
$Eu$	1,35%
$Re$	6,51%
$\eta$	1,87%
$\eta'$	3,44%
$d_{50}$	7,89%
$d'_{50}$	5,57%

### 3.4 - Cálculo das variáveis associadas à separação em hidrociclones

As medidas experimentais obtidas segundo os procedimentos descritos anteriormente para queda de pressão, vazões mássicas, concentrações mássicas e distribuição granulométrica eram manipuladas com intuito de verificar as repostas das variáveis que estão associadas aos hidrociclones. As variáveis calculadas eram concentrações volumétricas ( $C_V$ ), vazões volumétricas ( $Q$ ), Número de Euler ( $Eu$ ), Razão de Líquido ( $R_L$ ), Eficiência Total ( $\eta$ ), Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ ), Eficiência Granulométrica ( $G$ ), Eficiência Granulométrica Reduzida ( $G'$ ), Diâmetro de Corte ( $d_{50}$ ) e Diâmetro de Corte Reduzido ( $d'_{50}$ ).

As concentrações volumétricas eram calculadas a partir das concentrações mássicas e das densidades do fluido e do material particulado (obtida por picnometria). As Equações (3.2) e (3.3) apresentam o cálculo das concentrações volumétricas das correntes de alimentação e *underflow*, respectivamente:

$$C_{VA} = \frac{1}{\left[ \frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_{WA}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3.2)$$

$$C_{vu} = \frac{1}{\left[ \frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_{wu}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3.3)$$

Tendo as vazões mássicas das correntes de *overflow* e *underflow* obtidas experimentalmente e suas respectivas densidades, as vazões volumétricas de cada corrente eram calculadas conforme as Equações (3.4), (3.5) e (3.6).

$$Q = \frac{W}{\rho} \quad (3.4)$$

$$Q_u = \frac{W_u}{\rho_u} \quad (3.5)$$

$$Q_o = \frac{W_o}{\rho_o} \quad (3.6)$$

Por sua vez,  $\rho_u$  e  $\rho_o$  são, respectivamente, as densidades das correntes de *underflow* e *overflow*, cujo cálculo é realizado pelas Equações (3.7) e (3.8).

$$\rho_u = \frac{\rho}{1 - C_{wu} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (3.7)$$

$$\rho_o = \frac{\rho}{1 - C_{wo} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (3.8)$$

Depois de obtida a vazão de alimentação calculava-se a velocidade do fluido na seção cilíndrica e, conseqüentemente, avaliava-se o Número de Euler que está relacionado ao gasto energético do equipamento. A velocidade do fluido na seção cilíndrica e o Número de Euler são estimados pelas Equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (3.9)$$

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (3.10)$$

A Razão de Líquido ( $R_L$ ) representa a fração de líquido que, inicialmente alimentada no hidrociclone é descarregada na corrente de *underflow*, estando diretamente relacionada

com o poder de classificação do equipamento. Essa Razão de Líquido pode ser predita pela Equação (3.11).

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{VU})}{Q(1 - C_{VA})} \quad (3.11)$$

A Eficiência Total ( $\eta$ ) leva em conta todas as partículas descarregadas no orifício de *underflow* e era calculada conforme a Equação (3.12). Representa o percentual de massa de sólidos coletado na corrente de *underflow* frente à quantidade inicialmente introduzida na alimentação do hidrociclone, independentemente se a separação se deu por mero arraste ou centrifugação propriamente dita.

$$\eta = \frac{C_{WU} W_u}{C_{WA} W} \quad (3.12)$$

A Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ ) representa somente as partículas coletadas no *underflow* devido à ação do campo centrífugo. Logo, o efeito da Razão de Líquido (“Efeito T”) deve ser descontado conforme mostra a Equação (3.13).

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (3.13)$$

A Eficiência Granulométrica ( $G$ ) está relacionada ao poder de separação do hidrociclone em relação a determinado tamanho da partícula e pode ser calculada a partir do conhecimento das distribuições granulométricas da alimentação e *underflow* conforme está mencionado na Equação (3.14).

$$G = \eta \frac{X_u}{X} \quad (3.14)$$

Analogamente à Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ ), a Eficiência Granulométrica Reduzida ( $G'$ ) também contabiliza apenas as partículas coletadas devido à ação do campo centrífugo nos termos da Equação (3.15).

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (3.15)$$

O Diâmetro de Corte ( $d_{50}$ ) e o Diâmetro de Corte Reduzido ( $d'_{50}$ ) representam o diâmetro de uma partícula que será separada com Eficiência Granulométrica ( $G$ ) e Eficiência Granulométrica Reduzida ( $G'$ ) de 50%, respectivamente. Esses parâmetros determinam o poder de separação do hidrociclone. Com as distribuições granulométricas do *underflow* e da

alimentação representadas pelo modelo RRB, os Diâmetros de Corte foram obtidos a partir da resolução numérica da Equação (3.16) na grandeza  $d_p$ .

$$\eta \left\{ \frac{\left( \frac{d_p}{d_{63,2U}} \right)^{n_U} n_U \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{d_{63,2U}} \right)^{n_U} \right]}{\left( \frac{d_p}{d_{63,2A}} \right)^{n_A} n_A \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{d_{63,2A}} \right)^{n_A} \right]} \right\} - R_L - 0,5 = 0 \quad (3.16)$$

---

## Capítulo 4

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos para os Hidrociclones Convencional (HCon), Cilíndrico-Filtrante (HCiF), Cônico-Filtrante (HCoF) e Totalmente Filtrante (HCiCoF). Em seguida faz-se uma análise comparativa entre os modelos de hidrociclones estudados. Maiores detalhes a respeito das informações experimentais podem ser encontrados no Apêndice B. Ainda, em se tratando dos resultados obtidos durante os ensaios, no Apêndice C encontram-se as equações de projeto e as curvas de Eficiência Total que caracterizam cada equipamento utilizado. Vale ressaltar que todos os hidrociclones estudados foram construídos segundo a geometria otimizada proposta por Vieira (2006).

### **4.1 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Convencional Frente a Modificações no Diâmetro de *Underflow***

A vazão de alimentação de um hidrociclone é uma variável importante a ser analisada, pois reflete diretamente sobre a capacidade de processamento do equipamento. É desejável que, em uma mesma queda de pressão, a vazão de alimentação seja a maior possível, assim, será processada uma maior quantidade de suspensão com menor gasto energético.

A Figura 4.1 apresenta os valores de vazão de alimentação ( $Q$ ) obtidos para as condições experimentais estudadas, em que foram analisadas variações no diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e na queda de pressão ( $-\Delta P$ ).

A vazão de alimentação do Hidrociclone Convencional foi majorada com o incremento na queda de pressão, pois mais energia era fornecida ao escoamento da suspensão. Observou-se também, que um incremento no diâmetro de *underflow* provocou um aumento na vazão de alimentação. Isso pode ser explicado devido ao fato do diâmetro de *underflow* ser



uma variável operacional e quanto maior o  $D_U$ , menor é a perda de carga. Logo, maiores diâmetros de *underflow* oferecem menos resistência ao escoamento. Um primeiro incremento no  $D_U$  de 3 para 4 mm aumentou a capacidade de processamento do Hidrociclone Convencional em 3%, e um segundo incremento, de 4 para 5 mm, em 7%.

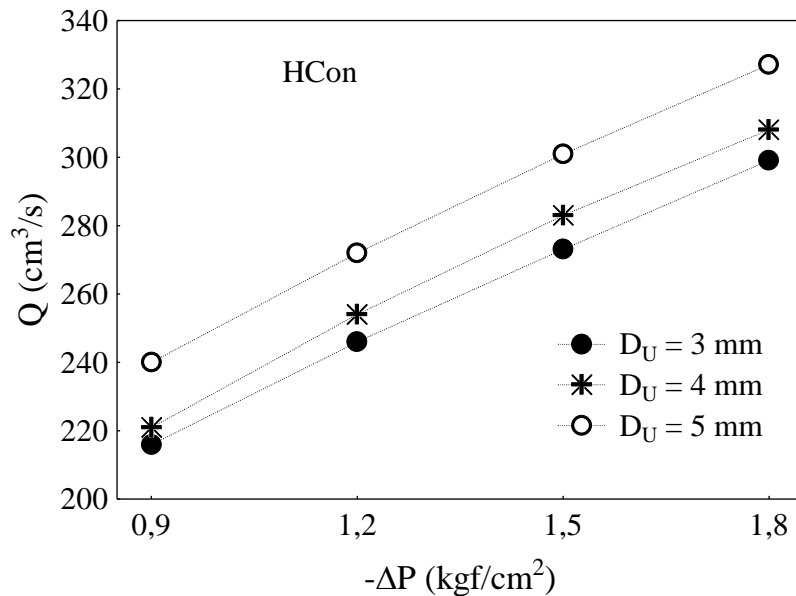


Figura 4.1 – Valores de vazão de alimentação ( $Q$ ) para o Hidrociclone Convencional em função de  $D_U$  e  $-\Delta P$ .

É sabido que o Número de Euler está ligado à relação entre a queda de pressão e a vazão de alimentação do hidrociclone, logo, é de se esperar que um aumento no diâmetro de *underflow* tenha ocasionado um decréscimo nesse número adimensional. Percebeu-se pela Figura 4.2, que quanto menor for o diâmetro de *underflow*, maior o Número Euler, pois uma maior resistência será imposta ao escoamento da suspensão no interior do hidrociclone. Como esta variável está relacionada ao consumo energético, pode-se dizer que maiores diâmetros de *underflow* resultam em menores demandas energéticas, isto é, maiores capacidades volumétricas de alimentação numa mesma queda de pressão. Sendo que um primeiro aumento no diâmetro de *underflow*, de 3 para 4 mm, forneceu um  $Eu$  14% menor, e um segundo incremento no  $D_U$ , de 4 para 5 mm, provocou uma queda no Número de Euler de cerca de 13%, em média.

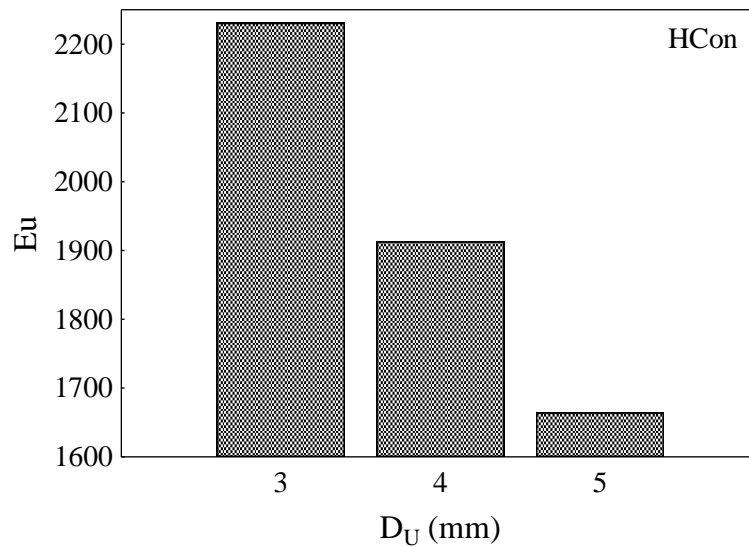


Figura 4.2 – Números de Euler ( $Eu$ ) em função do diâmetro de *underflow* para o Hidrociclone Convencional em função do  $D_U$ .

Em seguida, será apresentada a análise feita para a influência do diâmetro de *underflow* na quantidade de líquido que foi descarregada na corrente de concentrado para o Hidrociclone Convencional (Figura 4.3). Para a concepção dessa figura, foi calculada uma média para a Razão de Líquido em cada  $D_U$ , haja vista que a Razão de Líquido não sofreu variações significativas com a queda de pressão, de acordo com o que já fora relatado por Massarani (1989).

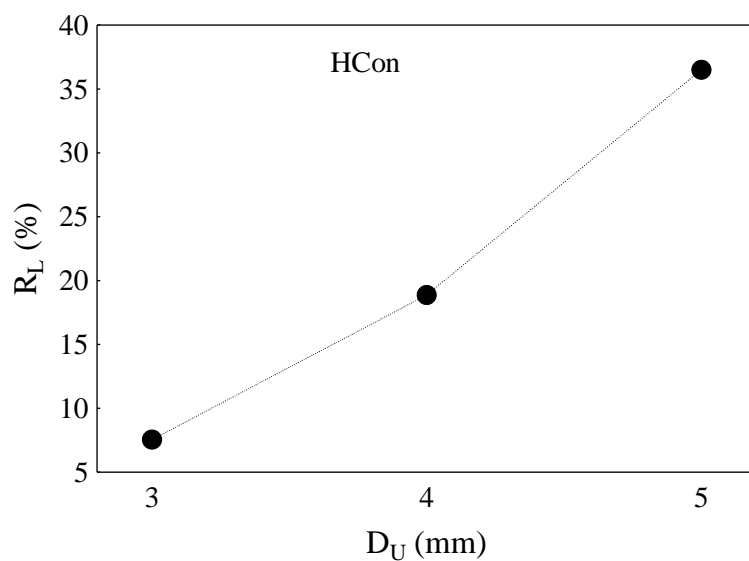


Figura 4.3 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) em função do diâmetro de *underflow* para o Hidrociclone Convencional.

Os resultados experimentais mostraram que valores menores para o  $D_U$  levam a valores menores para a Razão de Líquido, fazendo com que uma menor quantidade de líquido fosse descarregada na corrente de *underflow*, produzindo uma corrente mais concentrada, que pode ser interessante em uma operação de espessamento. Esse fato está relacionado à perda de carga apresentada pelos hidrociclones de acordo com os orifícios de *underflow* instalados.

A Razão de Líquido exerce influência direta sobre o poder de classificação do separador. Assim, quanto maior for esta grandeza, mais significativo é o arraste de partículas para a corrente de *underflow* e menores são os Diâmetros de Corte, aumentando a eficiência.

Comprovando o que foi dito anteriormente, têm-se os dados experimentais de Eficiência Total ( $\eta$ ) para o Hidrociclone Convencional apresentados na Figura 4.4. Tal figura mostra que incrementos na queda de pressão não modificaram significativamente a Eficiência Total. Porém, o mesmo não pôde ser dito em relação ao diâmetro de *underflow* que influenciou essa eficiência razoavelmente. Sabe-se que a Eficiência Total está intrínseca e diretamente ligada à capacidade de descarga de líquido através do orifício de *underflow*. Portanto, os incrementos nos diâmetros de *underflow* proporcionam maiores Razões de Líquido e, conseqüentemente, incrementos também na Eficiência Total.

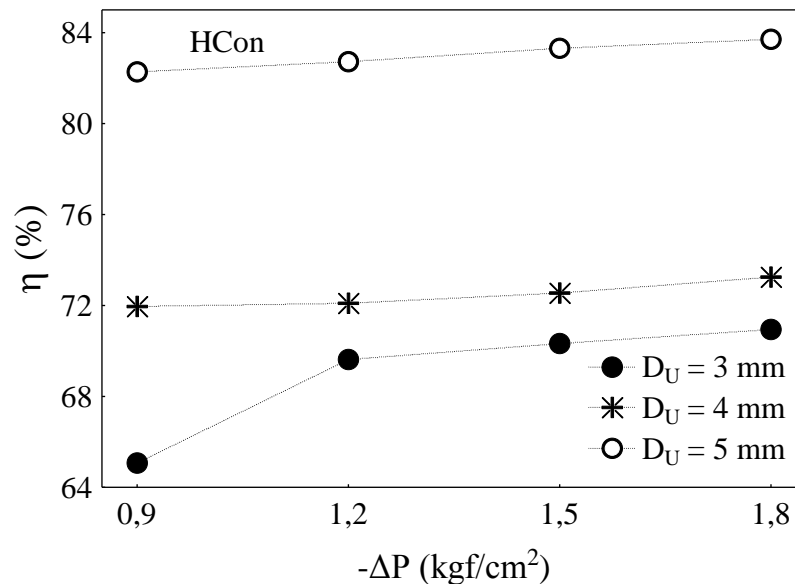


Figura 4.4 – Eficiência Total ( $\eta$ ) em função do diâmetro de *underflow* o Hidrociclone Convencional.

Em média, a Eficiência Total do hidrociclone com  $D_U$  de 4 mm foi 5% maior do que a eficiência com  $D_U$  de 3 mm. No mesmo sentido, a Eficiência Total do hidrociclone com  $D_U$  de 5 mm foi 14% maior do que a eficiência com  $D_U$  de 4 mm. Dessa forma, constata-se que o uso de valores de diâmetros de *underflow* maiores pode ser vantajoso, pois fornece equipamentos com maior poder de classificação.

Diante disso, quando se almeja um Hidrociclone Convencional com alta capacidade de processamento, baixo custo energético e com altas eficiências de separação, as configurações mais indicadas seriam aquelas fazem uso dos maiores  $D_U$ . E quando se deseja utilizar o hidrociclone como espessador é interessante usar menores valores de diâmetros de orifício de *underflow*.

#### **4.2 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante Frente a Modificações no Diâmetro de *Underflow* e na Permeabilidade do Meio Poroso**

Primeiramente, serão apresentados os valores para a vazão de filtrado do Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante com diâmetro de *underflow* de 5 mm, para as três permeabilidades de cilindro estudadas ( $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ). Cabe ressaltar que a mesma tendência aqui apresentada também foi verificada para o Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante nos diâmetros de *underflow* de 3 e 4 mm.

A Figura 4.5 mostra que com o aumento da queda de pressão houve um aumento na vazão de filtrado. Observa-se também que um incremento na permeabilidade majorou a vazão de filtrado durante o funcionamento do hidrociclone HCiF, pois facilitou o escoamento do fluido através do meio poroso.

Dentre todos os casos de cilindros porosos estudados, a vazão de filtrado chegou a representar no máximo 0,15 % da vazão de alimentação do HCiF. Sabe-se que, apesar das vazões de filtrado serem ínfimas em relação à vazão volumétrica inicialmente alimentada nos hidrociclones, essa vazão foi capaz de provocar mudanças no desempenho desses equipamentos quando comparados ao Hidrociclone Convencional, cuja discussão será oportunamente apresentada na seção 4.5.

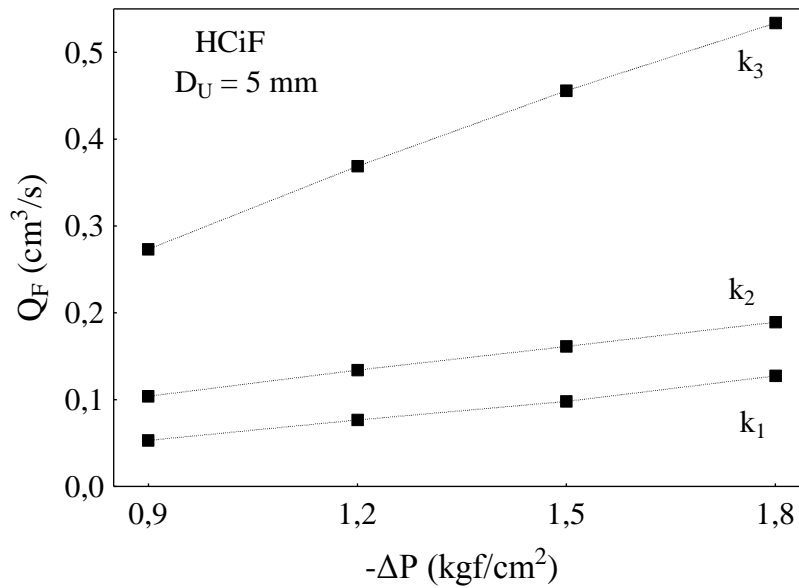


Figura 4.5 – Vazões de filtrado em função das permeabilidades para o hidrociclone HCiF.

A Figura 4.6 mostra os valores de vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclones do tipo HCiF. Ao observar as partes componentes desta figura já foi possível visualizar o efeito do meio poroso na seção cilíndrica do separador.

Analogamente ao que foi observado para o Hidrociclone Convencional a vazão de alimentação diminuiu com o decréscimo do diâmetro de *underflow*. Assim os hidrociclones HCiF com maiores diâmetros de *underflow* apresentaram a maior capacidade de processamento quando comparado aos demais, independente da permeabilidade utilizada. Um incremento no  $D_U$ , de 3 para 4 mm, aumentou a vazão de alimentação dos hidrociclones HCiF cerca de 3% em média. Já um aumento no  $D_U$ , de 4 para 5 mm, provocou acréscimos de 6%, em média, na resposta em questão.

Verificou-se que quanto maior a permeabilidade do cilindro, menor foi a vazão de alimentação. Imagina-se que essa diminuição ocorreu porque a corrente de filtrado deve ter alterado a relação entre as componentes da velocidade do fluido no interior do hidrociclone. Acredita-se que em face de maiores taxas de filtração ( $k_3$ ), a componente radial do fluido em direção ao cilindro poroso certamente foi aumentada às custas de energia retirada das demais componentes. Neste aspecto, geralmente é a velocidade tangencial do fluido que cede tal energia, diminuindo o movimento espiralado no interior do hidrociclone, conforme estudos em CFD apresentados por Vieira (2006). Como este movimento espiralado está diretamente relacionado com a capacidade de alimentação do equipamento, eis o motivo pelo qual a vazão

de alimentação do hidrociclone HCiF mais permeável foi a menor dentre as observadas. Verificou-se que, independente do diâmetro de *underflow* utilizado, um primeiro incremento na permeabilidade (de  $k_1$  para  $k_2$ ) provocou uma queda de 8%, em média, na vazão de alimentação, já um segundo incremento (de  $k_2$  para  $k_3$ ) levou a decréscimos de 5%, em média, na mesma resposta.

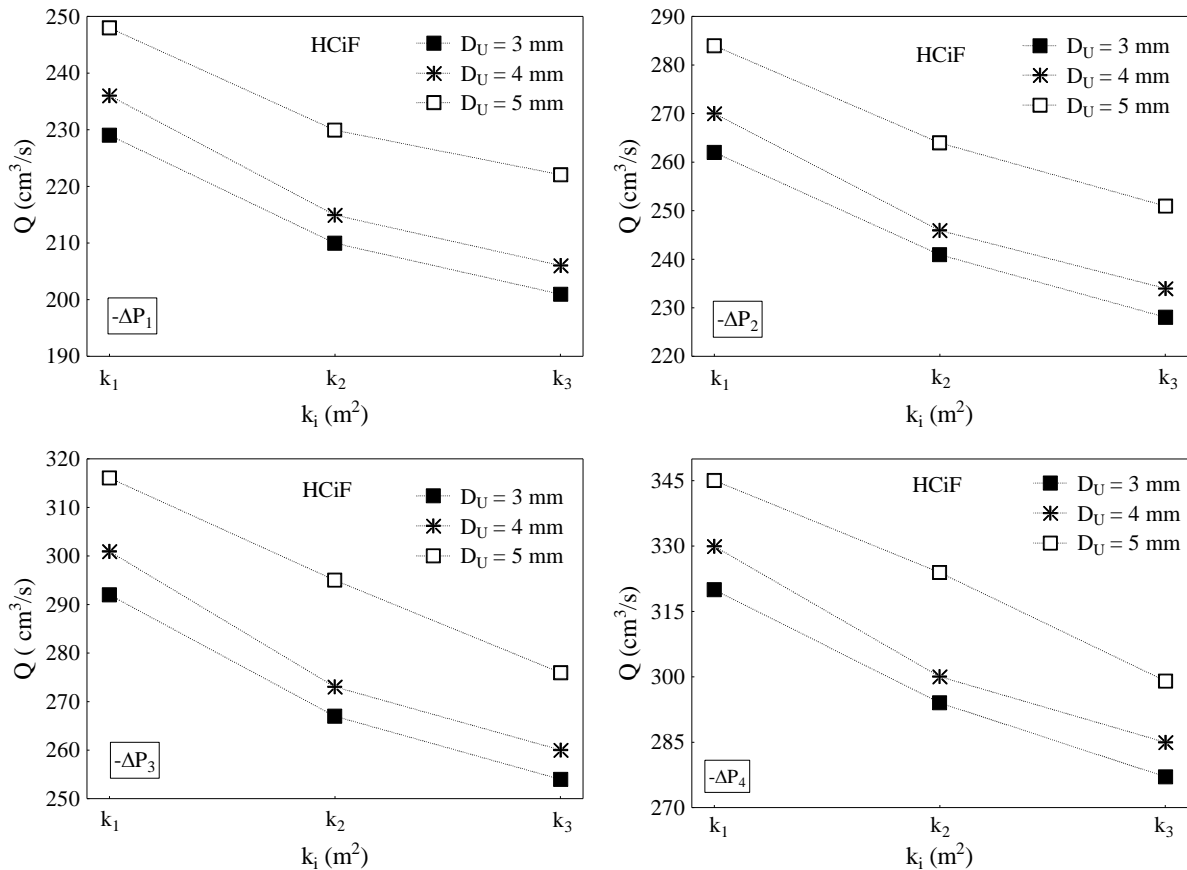


Figura 4.6 – Vazões de alimentação obtidas experimentalmente para os hidrociclones do tipo HCiF em função do diâmetro de *underflow*, queda de pressão e permeabilidade.

A Figura 4.7 mostra os resultados experimentais obtidos para o Número de Euler em função do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade para os hidrociclones HCiF. Similarmente ao Hidrociclone Convencional, o incremento no diâmetro de *underflow* provocou decréscimos no Número de Euler, pois maior foi a vazão de alimentação do hidrociclone, fazendo com que maiores  $D_U$  sejam preferidos. Sendo que, um aumento no diâmetro de *underflow*, de 3 para 4 mm, ocasionou uma queda de cerca de 5% no Número de Euler e um segundo incremento no  $D_U$ , de 4 para 5 mm, diminuiu o  $Eu$  12%, em média.

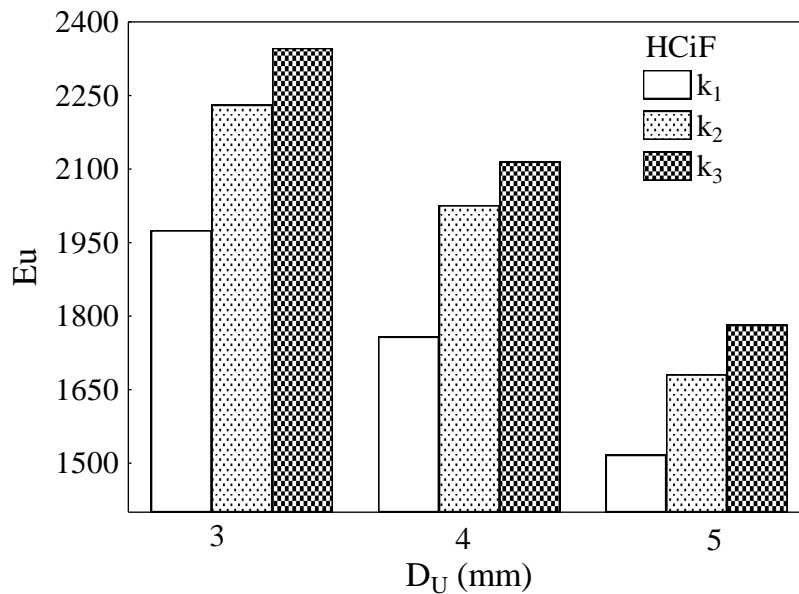


Figura 4.7 – Número de Euler em função do diâmetro de *underflow* e permeabilidade para Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes.

Como era de se esperar, o Número de Euler aumentou com o incremento da permeabilidade. Um primeiro aumento da permeabilidade (de  $k_1$  para  $k_2$ ) provocou um acréscimo no Número de Euler de 18 % em média; já no segundo incremento (de  $k_2$  para  $k_3$ ) o aumento foi de 11 %.

Analisando somente pela óptica do consumo energético, pode-se afirmar que o hidrociclone HCiF com maior diâmetro de *underflow* e menor permeabilidade seria o mais viável, haja vista que esta condição operacional proporcionaria o menor Número de Euler dentre os separadores da categoria Cilíndrico-Filtrante.

Em sequência, estão apresentados na Figura 4.8 os dados experimentais para as Razões de Líquido dos hidrociclones HCiF em função do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade. Do mesmo modo que para o Hidrociclone Convencional, para os Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes a Razão de Líquido permaneceu praticamente constante com a variação da queda de pressão.

Observou-se que, assim como no Hidrociclone Convencional, os Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes apresentaram acréscimos na Razão de Líquido com o aumento do diâmetro do orifício de *underflow*, haja vista que tal condição operacional proporcionou, conforme o caso, maior ou menor restrição ao escoamento.

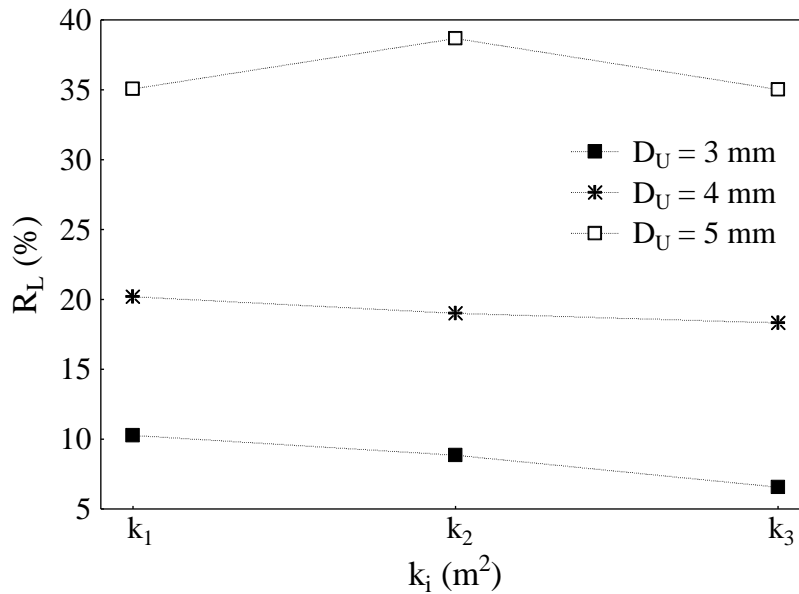


Figura 4.8 – Razão de Líquido em função do diâmetro de *underflow* e permeabilidade para Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes.

Em se tratando da influência da permeabilidade, percebeu-se que um incremento na mesma provocou pequenos decréscimos na Razão de Líquido, independente do diâmetro de *underflow* empregado. Tem-se então que um aumento na permeabilidade, de  $k_1$  para  $k_2$ , diminuiu a Razão de Líquido cerca de 10%, em média, sendo que outro aumento na permeabilidade, de  $k_2$  para  $k_3$ , levou a decréscimos de 13%, em média, na resposta em questão. Acredita-se que a corrente adicional de filtrado causou uma interferência na relação entre os volumes dos vórtices externo e interno, ocasionando uma modificação na fração de líquido que foi enviada para as correntes de *underflow* e *overflow*.

A Figura 4.9 mostra a influência da queda de pressão e do diâmetro de *underflow* na Eficiência Total dos separadores Cilíndrico-Filtrantes. Verificou-se que a variação na queda de pressão pouco modificou a Eficiência Total. Percebeu-se também que maior foi o valor da Eficiência Total conforme se aumentava o diâmetro de *underflow*. Como foi mencionado na seção anterior, essa maior eficiência está relacionada ao fato de que, quanto maior o diâmetro de *underflow*, maior é a Razão de Líquido, logo maior é a capacidade de coleta de partículas do hidrociclone. A Eficiência Total do hidrociclone aumentou em média 8 % quando se passou do  $D_U$  de 3 mm para o  $D_U$  de 4 mm e 15 % quando se trocou o  $D_U$  de 4 mm pelo de 5 mm.



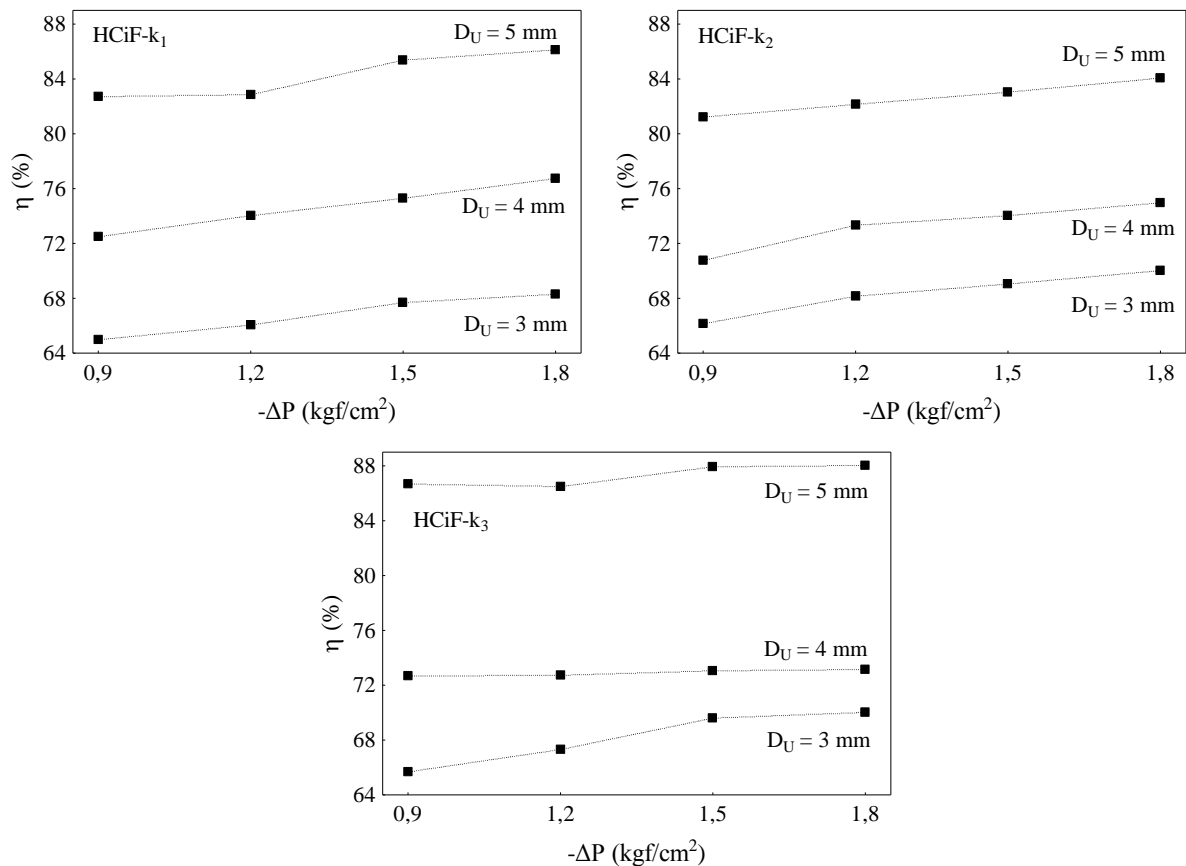


Figura 4.9 – Eficiência Total para Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes em função do diâmetro de *underflow* e queda de pressão.

A permeabilidade do meio filtrante não provocou modificações significativas na Eficiência Total dos Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes. Para tal constatação, a Figura 4.10 apresenta os valores de Eficiência Total para os hidrociclones HCiF com o diâmetro de *underflow* de 4 mm, bem como a média dessas eficiências e o desvio relacionado a essa média. Analisando este caso, percebeu-se que as variações nos valores das Eficiências Totais estiveram dentro da incerteza da medida (aproximadamente 2%), o que mostra que o incremento da permeabilidade não trouxe modificações significativas para esta resposta. O mesmo comportamento foi também verificado para os outros diâmetros de *underflow* analisados (3 e 5 mm).

É interessante observar que, mesmo a Razão de Líquido tendo sido diminuída (aspecto negativo para a separação) com o incremento de permeabilidade, tal fenômeno foi praticamente irrelevante sobre a Eficiência Total, que se mostrou indiferente à taxa de filtração empregada. Tal indiferença provavelmente deve ter ocorrido porque, simultaneamente à diminuição da Razão de Líquido, certamente houve também um aumento na velocidade radial do fluido em direção a parede porosa (aspecto positivo para a separação).

Desta forma, os efeitos das velocidades axial e radial foram combinados ao longo da separação, de modo que um compensou o outro, mantendo, portanto, a Eficiência Total praticamente no mesmo patamar.

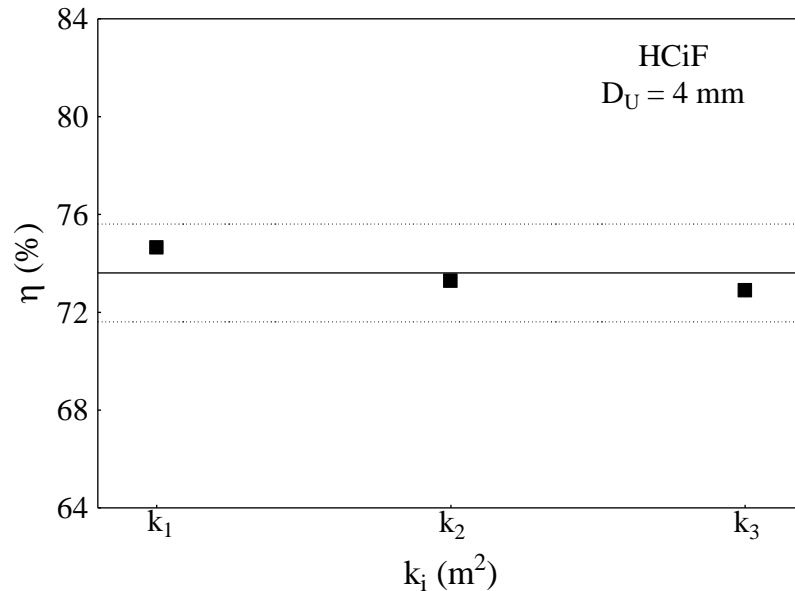


Figura 4.10 – Eficiência Total média do hidrociclone HCiF em função da permeabilidade no diâmetro de *underflow* de 4 mm.

#### 4.3 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Cônico-Filtrante Frente a Modificações no Diâmetro de *Underflow* e na Permeabilidade do Meio Poroso

Analogamente à seção anterior, serão apresentados os resultados experimentais obtidos para vazão de filtrado, vazão de alimentação, Número de Euler, Razão de Líquido e Eficiência Total do Hidrociclone Cônico-Filtrante.

A Figura 4.11 mostra os valores para a vazão de filtrado do Hidrociclone Cônico-Filtrante no diâmetro de *underflow* igual a 5 mm, para as três permeabilidades de cone estudadas ( $k_a$ ,  $k_b$  e  $k_c$ ). Cumpre esclarecer que o hidrociclone HCoF nos diâmetros de *underflow* de 3 e 4 mm apresentou a mesma tendência exibida quando presente o  $D_U$  de 5 mm.

Como já era esperado, a Figura 4.11 mostra que houve um aumento da vazão de filtrado com o incremento da permeabilidade, bem como ocorreram acréscimos dessa vazão com o aumento da queda de pressão durante a operação dos equipamentos HCoF.

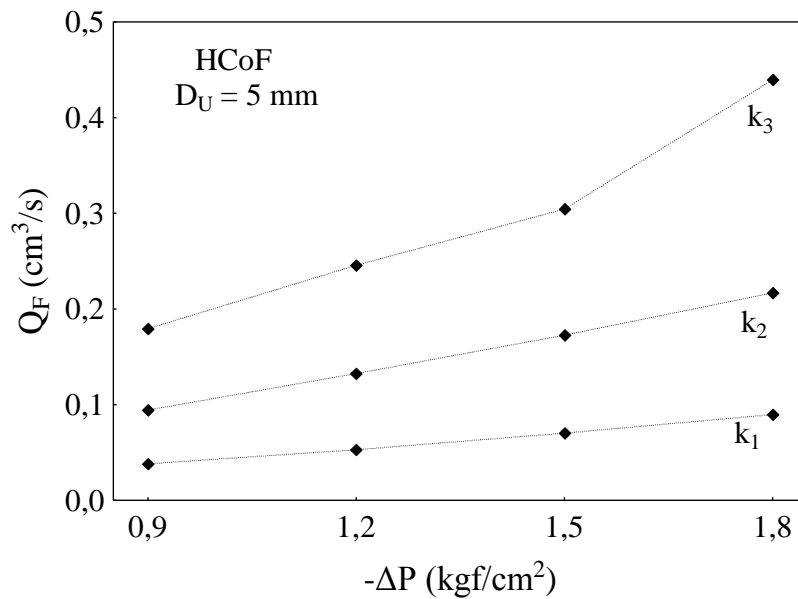


Figura 4.11 - Vazões de filtrado em função das permeabilidades para o hidrociclone HCoF.

As vazões de filtrado, independente da permeabilidade e do diâmetro de *underflow* estudados, foram muito pequenas, consistindo no máximo 0,11 % da vazão de alimentação do HCoF. Porém da mesma forma que para os hidrociclones HCiF, essa corrente de filtrado foi capaz de promover modificações no funcionamento dos Hidrociclones Cônico-Filtrantes.

A Figura 4.12 mostra as vazões volumétricas de alimentação em função da permeabilidade, da queda de pressão e do diâmetro de *underflow* dos Hidrociclones Cônico-Filtrantes. Analisando os resultados experimentais obtidos para a vazão de alimentação dos separadores do tipo HCoF, percebeu-se que um aumento na queda de pressão majorou a vazão independente do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade utilizados. Foi observado também que a resistência ao escoamento foi menor quanto maior fosse o diâmetro de *underflow*, isto é, maiores  $D_U$  fornecem vazões de alimentação mais elevadas, pois menor é perda de carga no equipamento. Incrementos médios de 2% foram observados quando se trocou o  $D_U$  de 3 para 4 mm. Quando foi utilizado o diâmetro de *underflow* de 5 mm verificou-se um aumento médio de 9% em relação ao  $D_U$  de 4 mm.

Em se tratando da permeabilidade do meio filtrante, verificou-se que a vazão de alimentação sofreu decréscimos à medida que se aumentava a permeabilidade, pois assim como para os hidrociclones HCiF, acredita-se que a corrente de filtrado possa ter modificado a relação entre as componentes da velocidade do fluido.

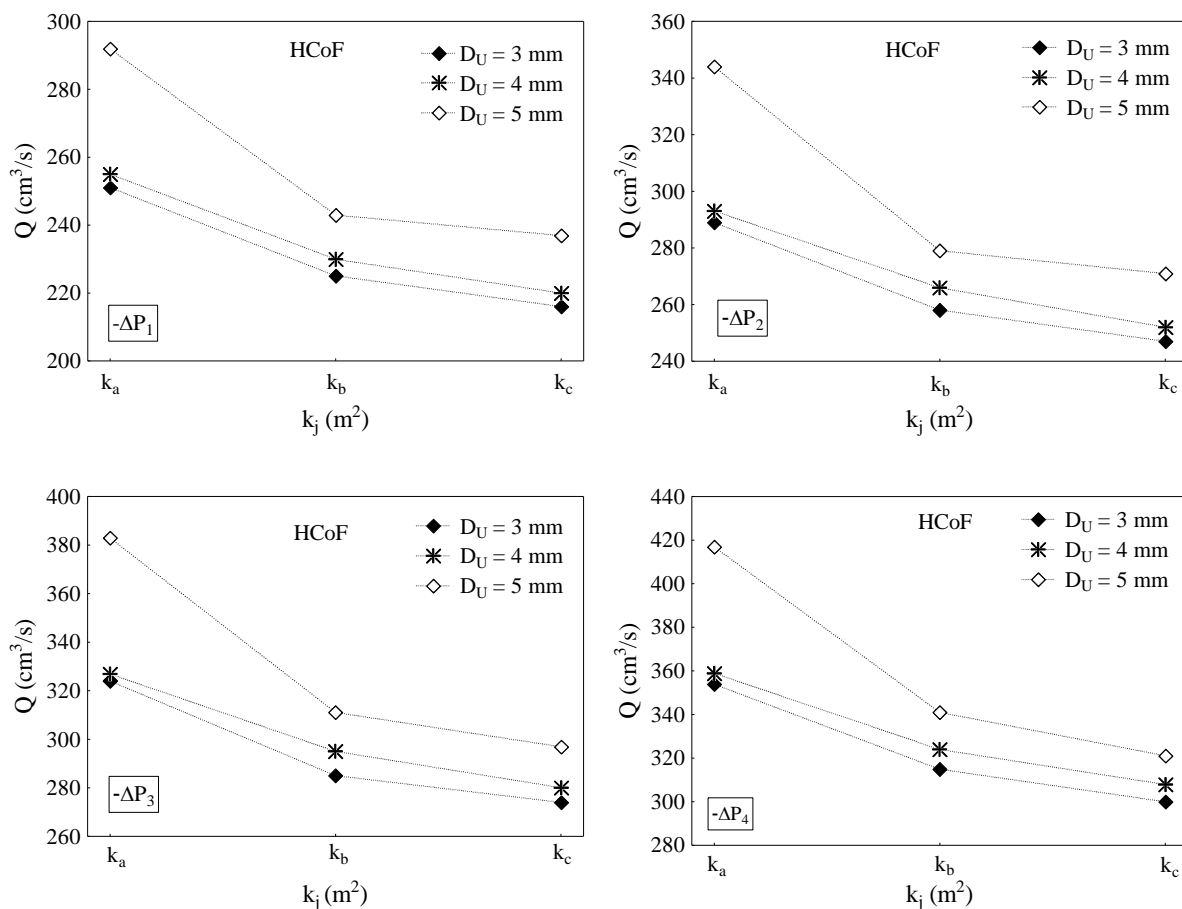


Figura 4.12 – Vazões de alimentação obtidas experimentalmente para os hidrociclones HCoF em função do diâmetro de *underflow*, queda de pressão e permeabilidade.

Acredita-se que em face de maiores taxas de filtração ( $k_c$ ), a componente radial do fluido em direção ao cone poroso certamente foi aumentada às custas de energia retirada das demais componentes. Neste aspecto, geralmente é a velocidade tangencial do fluido que cede tal energia, diminuindo o movimento espiralado no interior do hidrociclone, conforme estudos em CFD apresentados por Vieira (2006). Como este movimento espiralado está diretamente relacionado com a capacidade de alimentação do equipamento, eis o motivo pelo qual a vazão de alimentação do hidrociclone HCoF mais permeável foi a menor dentre as observadas. Assim, foram verificados decréscimos médios de 13% quando se trocou a permeabilidade de  $k_a$  para  $k_b$ , e de 4% quando substituiu-se o meio poroso de  $k_b$  para  $k_c$ .

A Figura 4.13 mostra os resultados obtidos experimentalmente para o Número de Euler em função do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade para os hidrociclones do tipo HCoF.

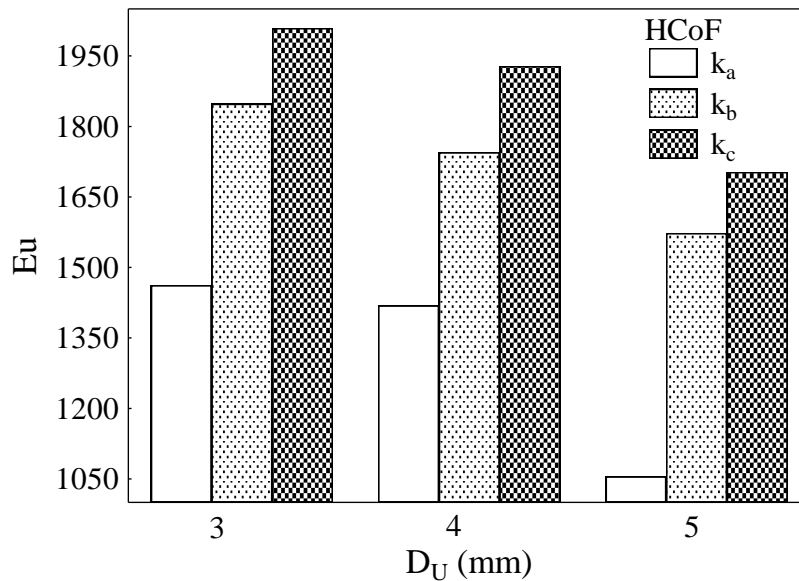


Figura 4.13 - Número de Euler em função do diâmetro de *underflow* e permeabilidade para Hidrociclones Cônico-Filtrantes.

Notou-se através da análise da Figura 4.13 que o Número de Euler foi maior quando menores diâmetros de *underflow* foram utilizados, pois menor  $D_U$  implica em uma menor vazão de alimentação devido às restrições impostas ao sistema. Sendo que houve um decréscimo médio no Número de Euler de 4% quando se substituiu o  $D_U$  de 3 pelo de 4 mm. E um aumento no diâmetro de *underflow*, de 4 para 5 mm, diminuiu o  $Eu$  15%, em média.

Verificou-se também que, independentemente do diâmetro de *underflow* que estava sendo utilizado, o aumento da permeabilidade acarretou em uma elevação do Número de Euler. Quando se substituiu o meio poroso de  $k_a$  para  $k_b$ , o Número de Euler aumentou, em média, 33 %. Um segundo incremento na permeabilidade, de  $k_b$  para  $k_c$ , provocou um acréscimo no gasto energético de 9 %, em média.

Da mesma maneira que foi observado para os hidrociclones HCiF, maiores diâmetros de *underflow* e menores valores de permeabilidade são preferíveis para os hidrociclones HCoF, uma vez que estes proporcionam menor consumo energético.

Dando continuidade ao estudo dos resultados experimentais, a Figura 4.14 apresenta os valores obtidos para as Razões de Líquido dos Hidrociclones Cônico-Filtrantes em função da permeabilidade e do diâmetro de *underflow*. A variação da queda de pressão não está presente na Figura 4.14 porque a Razão de Líquido permaneceu praticamente constante à medida que esta variável foi modificada.

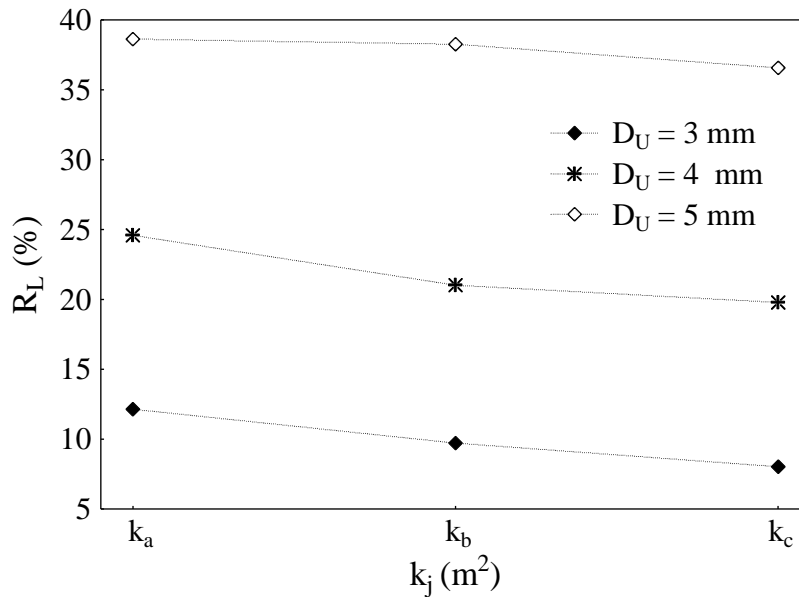


Figura 4.14 – Razão de Líquido em função do diâmetro de *underflow* e permeabilidade para Hidrociclones Cônico-Filtrantes.

Como era de se esperar, o aumento no diâmetro do orifício de *underflow* provocou um acréscimo na Razão de Líquido, independente da permeabilidade utilizada, já que um maior  $D_U$  fornece uma menor perda de carga, promovendo uma maior descarga de líquido por essa fronteira.

Ao analisar a influência do meio filtrante, verificou-se que um aumento na permeabilidade ocasionou uma diminuição na Razão de Líquido como mostra a Figura 4.14. Assim como foi observado para os hidrociclones HCiF, o incremento da permeabilidade provocou uma alteração na relação entre as componentes da velocidade do fluido no interior do hidrociclone, aumentando a velocidade radial que provavelmente retira energia do sistema, especialmente da velocidade axial, de modo a diminuir a quantidade de líquido descarregada no *underflow* (menores Razões de Líquido).

Quando a permeabilidade foi alterada de  $k_a$  para  $k_b$ , a Razão de Líquido teve uma queda de 12 % em média. Um segundo incremento no valor da permeabilidade, de  $k_b$  para  $k_c$ , levou a uma diminuição na Razão de Líquido de 10 % em média.

A influência da queda de pressão, da permeabilidade e do diâmetro de *underflow* sobre a Eficiência Total dos Hidrociclones Cônico-Filtrantes é apresentada na Figura 4.15. Observou-se que o aumento da queda de pressão provocou um pequeno acréscimo na eficiência do separador. Entretanto, à medida que o diâmetro de *underflow* foi aumentado, a

Eficiência Total majorou consideravelmente, o que pode ser explicado pelo aumento da Razão de Líquido. A Eficiência Total do Hidrociclone Cônico-Filtrante aumentou em média 9 % quando se passou do  $D_U$  de 3 para 4 mm e 16 % quando modificou-se o  $D_U$  de 4 para 5 mm.

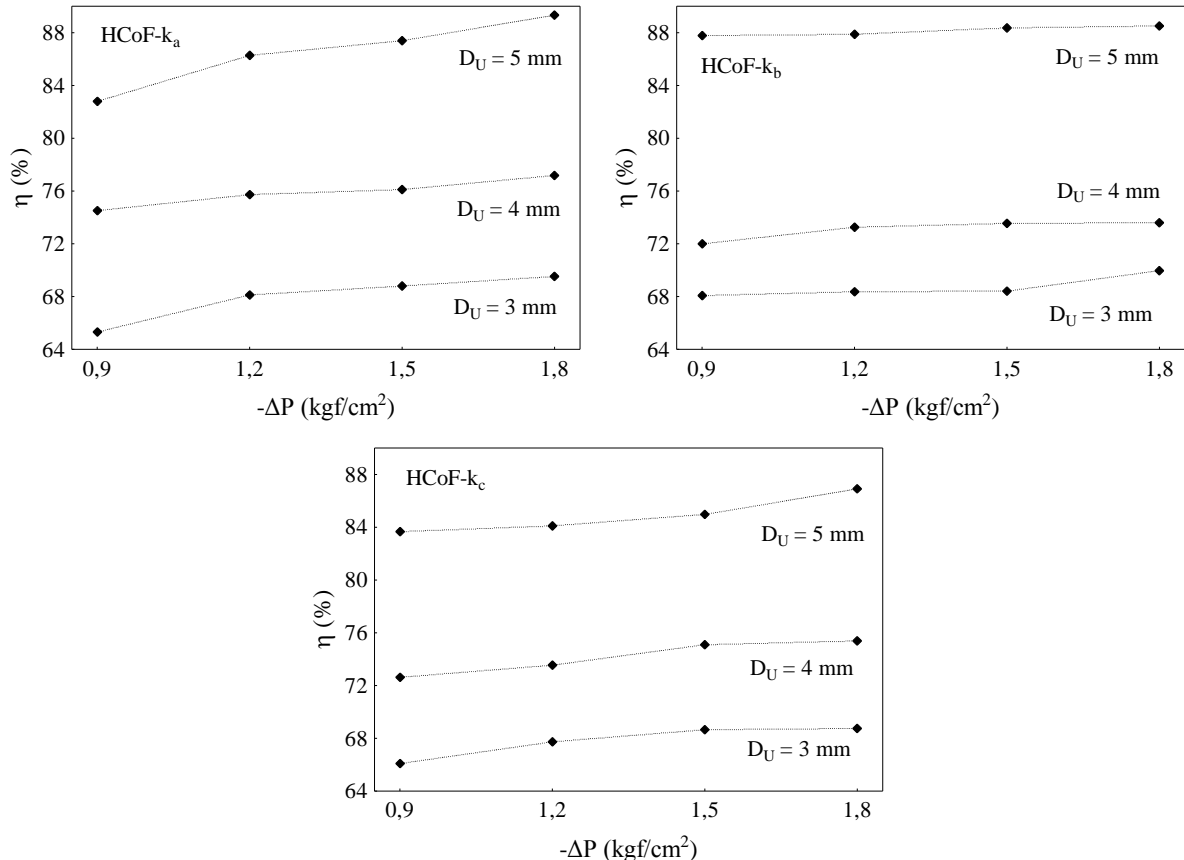


Figura 4.15 – Eficiência Total para Hidrociclones Cônico-Filtrantes em função do diâmetro de *underflow* e queda de pressão.

A Eficiência Total não sofreu grandes alterações devido à modificação da permeabilidade do meio filtrante dos hidrociclones HCoF. Os aumentos na permeabilidade de  $k_a$  para  $k_b$  e  $k_b$  para  $k_c$  resultaram em variações de no máximo 4 % na eficiência.

A Figura 4.16 mostra que, assim como foi observado para o hidrociclone HCiF, os valores de Eficiência Total para o Hidrociclone Cônico-Filtrante não sofreram mudanças significativas com a variação da permeabilidade, haja vista que os mesmos estão dentro da incerteza da medida. O gráfico apresenta os valores de eficiência somente para o  $D_U$  de 4 mm, mas essa mesma tendência anteriormente descrita também foi observada para os diâmetros de *underflow* de 3 e 5 mm.

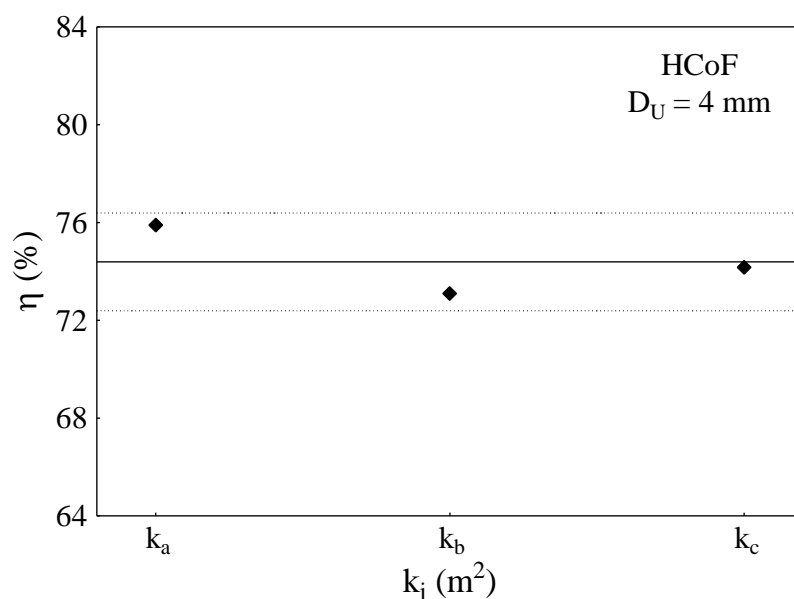


Figura 4.16 – Eficiência Total média do hidrociclone HCoF em função da permeabilidade no diâmetro de *underflow* de 4 mm.

Observou-se que mesmo a Razão de Líquido diminuindo (aspecto negativo para a separação) com o incremento de permeabilidade, esse fenômeno praticamente não teve influência sobre a Eficiência Total que se mostrou indiferente à taxa de filtração empregada. Tal indiferença provavelmente deve ter ocorrido porque, ao mesmo tempo em que se verificou a diminuição da Razão de Líquido, certamente houve também um aumento na velocidade radial do fluido em direção a parede porosa (aspecto positivo para a separação). Portanto, os efeitos das velocidades axial e radial foram combinados ao longo da separação, de modo que um compensou o outro, mantendo, portanto, a Eficiência Total praticamente no mesmo patamar.

De acordo com o exposto nesta seção, um Hidrociclone Cônico-Filtrante de maior diâmetro de *underflow* e menor permeabilidade seria o mais indicado para obter-se baixos custos energéticos e os melhores patamares de classificação de partículas.

#### 4.4 - Avaliação do Desempenho do Hidrociclone Totalmente Filtrante Frente a Modificações no Diâmetro de *Underflow* e na Permeabilidade do Meio Poroso

Os meios porosos dos Hidrociclones Cilíndrico-Cônico-Filtrantes (HCiCoF) foram constituídos das combinações das seções cilíndricas e cônicas utilizadas no estudo dos



hidrociclones HClF e HCoF, respectivamente. O cilindro poroso de menor permeabilidade foi utilizado juntamente com o cone poroso de menor permeabilidade (HCiCoF-k<sub>1a</sub>), as paredes filtrantes cilíndricas e cônicas de permeabilidade intermediária também foram usadas em conjunto (HCiCoF-k<sub>2b</sub>) e, por fim, uniram-se os meios porosos de maior permeabilidade para formar o Hidrociclone Totalmente Filtrante mais permeável (HCiCoF-k<sub>3c</sub>).

A vazão de filtrado para cada permeabilidade de Hidrociclone Totalmente Filtrante estudada com diâmetro de *underflow* de 5 mm está apresentada na Figura 4.17. De maneira geral, a mesma tendência foi verificada para os outros dois diâmetros de *underflow* utilizados neste trabalho (3 e 4 mm).

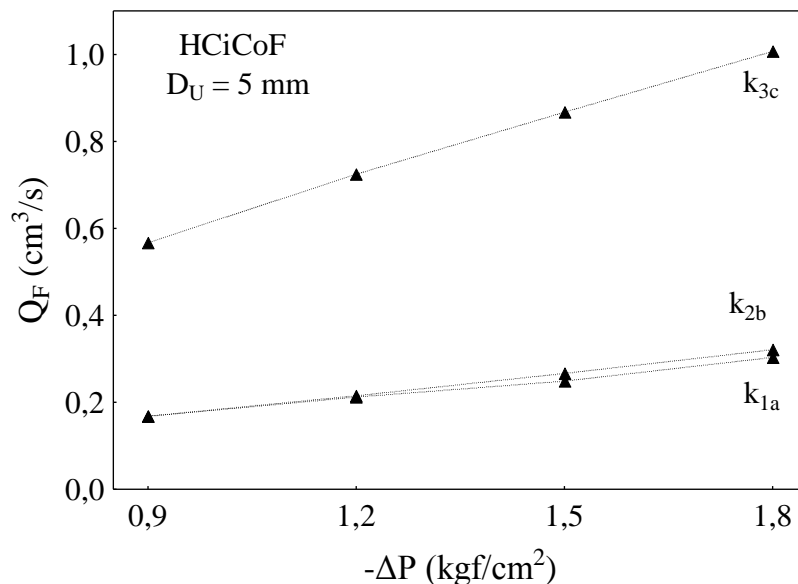


Figura 4.17 – Vazões de filtrado em função das permeabilidades para os hidrociclones HClCoF.

Percebeu-se também, que a queda de pressão teve uma maior influência no HClCoF-k<sub>3c</sub> do que nas outras duas configurações estudadas, sendo que para todos os casos o aumento na queda de pressão fez com que a vazão de filtrado fosse majorada.

A Figura 4.17 mostra que um primeiro incremento na permeabilidade não modificou de forma significativa a vazão de filtrado, pelo contrário, essa vazão permaneceu praticamente constante. Já um segundo incremento na permeabilidade provocou acréscimos na vazão de filtrado.

Assim como nas outras configurações estudadas, a vazão de filtrado foi muito pequena em relação à vazão volumétrica inicialmente alimentada no Hidrociclone Totalmente Filtrante. Dessa forma, para os hidrociclones HClCoF- $k_{1a}$ , HClCoF- $k_{2b}$  e HClCoF- $k_{3c}$ , a vazão de filtrado representou no máximo 0,9%; 0,11% e 0,33% da vazão de alimentação, respectivamente.

A Figura 4.18 apresenta os valores de vazão volumétrica de alimentação obtidos no estudo dos Hidrociclones Totalmente Filtrantes, na qual se pode notar que o aumento na queda de pressão levou a um aumento na vazão de alimentação durante o funcionamento do separador.

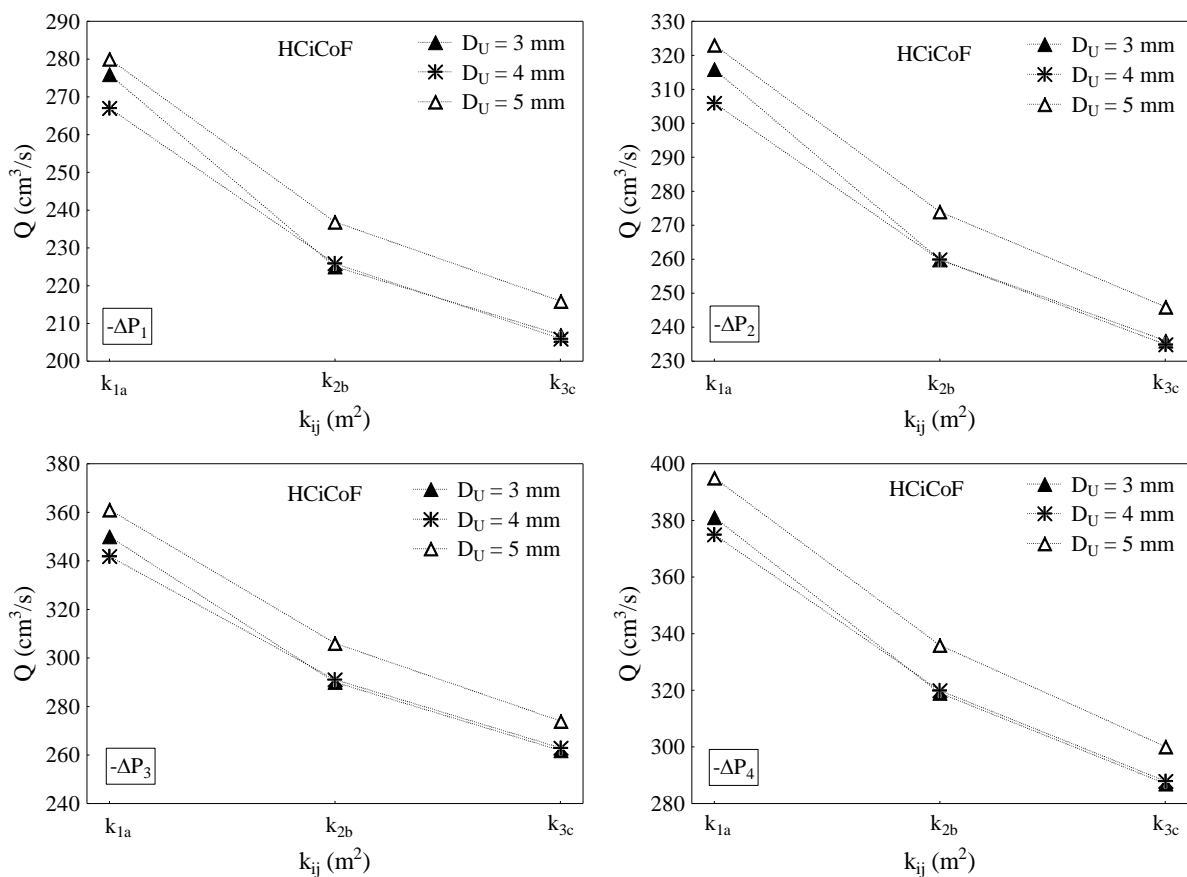


Figura 4.18 – Vazões de alimentação obtidas experimentalmente para os hidrociclones HClCoF em função do diâmetro de *underflow*, queda de pressão e permeabilidade.

Observou-se que a vazão de alimentação dos hidrociclones HClCoF diminuiu com o aumento da permeabilidade. Um primeiro aumento da permeabilidade (de  $k_{1a}$  para  $k_{2b}$ ) resultou em um decréscimo da capacidade de processamento de 15 % em média. Um segundo incremento (de  $k_{2b}$  para  $k_{3c}$ ) diminuiu a vazão de alimentação em 10 % em média. Assim

como para os outros hidrociclones filtrantes estudados (HCiF e HCoF), acredita-se que essa diminuição ocorreu porque a corrente de filtrado deve ter alterado a relação entre as componentes da velocidade (axial, tangencial e radial).

Acredita-se que em face de maiores taxas de filtração ( $k_{3c}$ ), a componente radial do fluido em direção ao cilindro e cone porosos certamente foi aumentada às custas de energia retirada das demais componentes. Neste aspecto, geralmente é a velocidade tangencial do fluido que cede tal energia, diminuindo o movimento espiralado no interior do hidrociclone, conforme estudos em CFD apresentados por Vieira (2006). Como este movimento espiralado está diretamente relacionado com a capacidade de alimentação do equipamento, eis o motivo pelo qual a vazão de alimentação do hidrociclone HCoF mais permeável foi a menor dentre as observadas.

No que tange à influência do diâmetro de *underflow*, foi possível constatar que as maiores vazões volumétricas foram observadas para o  $D_U$  de 5 mm, haja vista impor ao sistema as menores perdas de carga dentre os orifícios estudados. Diferentemente dos hidrociclones HCoF e HCoF, a vazão volumétrica do hidrociclone HCoF praticamente não sofreu mudanças significativas frente à substituição do diâmetro de *underflow* de 4 para 3 mm.

A Figura 4.19 apresenta os resultados experimentais para os Números de Euler dos Hidrociclones Totalmente Filtrantes em função do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade. Como era de se esperar, o mesmo comportamento da vazão volumétrica dos hidrociclones HCoF acabou se refletindo nos respectivos Números de Euler, consignados na Figura 4.19. De acordo com esta figura, salvo na hipótese do  $D_U$  de 5 mm que proporcionou os menores adimensionais dentre os observados, o Número de Euler permaneceu no mesmo patamar frente à utilização dos orifícios de 3 ou 4 mm. Sendo que houve um acréscimo médio no Número de Euler de 2% quando se substituiu o  $D_U$  de 3 pelo de 4 mm. E um aumento no diâmetro de *underflow*, de 4 para 5 mm, diminuiu o  $Eu$  10%, em média.

Através da Figura 4.19, verificou-se que o incremento da permeabilidade levou a um aumento do Número de Euler independentemente do diâmetro de *underflow* utilizado. À medida que se aumentou a permeabilidade (de  $k_{1a}$  para  $k_{2b}$ ) o Número de Euler aumentou, em média, 41 %. Um segundo incremento na permeabilidade (de  $k_{2b}$  para  $k_{3c}$ ) provocou um aumento de 23 %, em média, no Número de Euler.

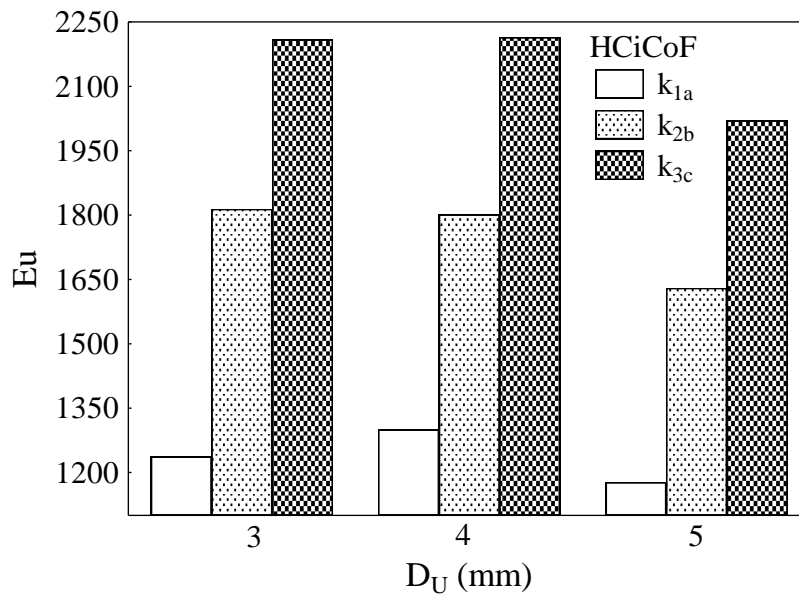


Figura 4.19 - Número de Euler em função do diâmetro de *underflow* e permeabilidade para Hidrociclones Totalmente Filtrantes.

Dando sequência aos estudos experimentais para o Hidrociclone Totalmente Filtrante, a Figura 4.20 mostra a influência do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade na quantidade de líquido que foi descarregada na corrente de *underflow*. Assim como para todos os equipamentos estudados até aqui (HCon, HCoF e HCoF), o efeito da queda de pressão não foi contabilizado na figura, pois a mesma não exerceu influência significativa nesta resposta.

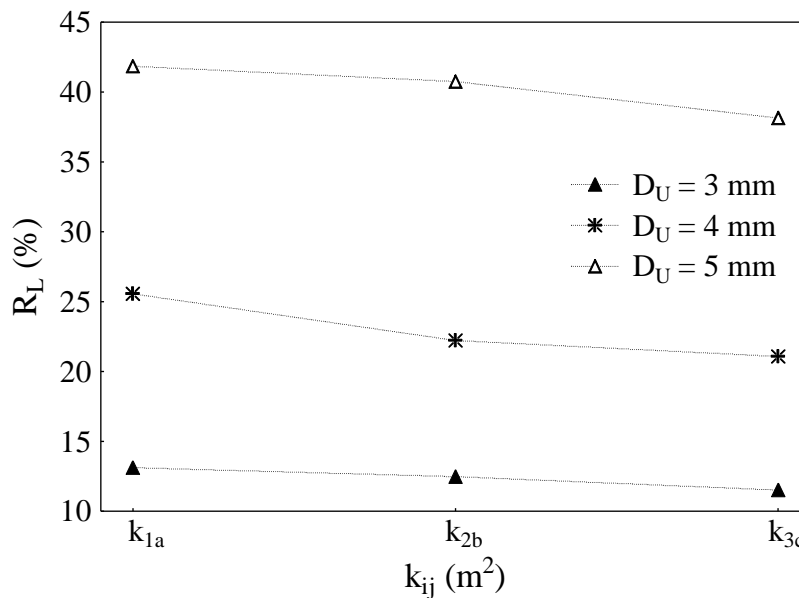


Figura 4.20 – Razão de Líquido em função do diâmetro de *underflow* e permeabilidade para hidrociclones totalmente filtrantes.

Já foi dito anteriormente que o diâmetro de *underflow* é uma variável operacional e está relacionado à perda de carga do equipamento. Quanto menor for o  $D_U$  maior será a perda de carga, maior será a dificuldade encontrada para o escoamento da suspensão, e, portanto, menor será a Razão de Líquido do hidrociclone, nos termos apresentados na Figura 4.20.

Observou-se que o valor da permeabilidade teve influência sobre a Razão de Líquido dos Hidrociclones Totalmente Filtrantes. Foi verificado que o aumento da permeabilidade acarretou uma diminuição nesta resposta. Acredita-se que a retirada de fluido pela parede porosa tenha modificado a relação entre as componentes radial, tangencial e axial da velocidade do fluido. Quanto maior a permeabilidade do meio poroso, maior deve ser a velocidade radial, que deve retirar energia das componentes axial e tangencial, de modo que o reflexo se traduz na diminuição da Razão de Líquido e no decréscimo da vazão volumétrica de alimentação, respectivamente. Decréscimos médios de 7% na Razão de Líquido foram observados tanto quando a permeabilidade foi alterada de  $k_a$  para  $k_b$ , quanto de  $k_b$  para  $k_c$ .

Continuando com os principais resultados experimentais encontrados para os Hidrociclones Totalmente Filtrantes, são apresentados na Figura 4.21 os valores de Eficiência Total em função da queda de pressão, diâmetro de *underflow* e permeabilidade. Percebeu-se que o aumento na queda de pressão provocou um modesto incremento na Eficiência Total dos hidrociclones HCoF.

Conforme o diâmetro de *underflow* teve um incremento, a Eficiência Total aumentou, pois a Razão de Líquido também foi acrescida. Para o  $D_U$  de 3 mm, as eficiências permaneceram entre 64 e 74%, para o  $D_U$  de 4 mm ficaram na faixa de 76 a 79% e, utilizando o  $D_U$  de 5 mm, as Eficiências Totais encontradas permaneceram entre 81 e 88%.

A Eficiência Total não foi influenciada significativamente com a variação da permeabilidade. Isto pode estar relacionado ao fato que a eficiência de separação pode ser influenciada por mais de um fator. Se a permeabilidade aumenta, a velocidade radial aumenta e mais partículas tem uma probabilidade maior de atingir a parede do equipamento e serem coletadas. Porém o incremento da permeabilidade ocasiona um decréscimo no valor da Razão de Líquido, o que desfavorece a classificação de partículas. Logo, têm-se dois efeitos concorrentes de modo que, um compensa a ação do outro. Dessa maneira, assim como foi observado para os outros hidrociclones filtrantes estudados, a Figura 4.22 mostra que o Hidrociclone Totalmente Filtrante não teve o valor de Eficiência Total modificado significativamente com o aumento da permeabilidade, uma vez que os resultados obtidos estão dentro da faixa do erro experimental da medida.

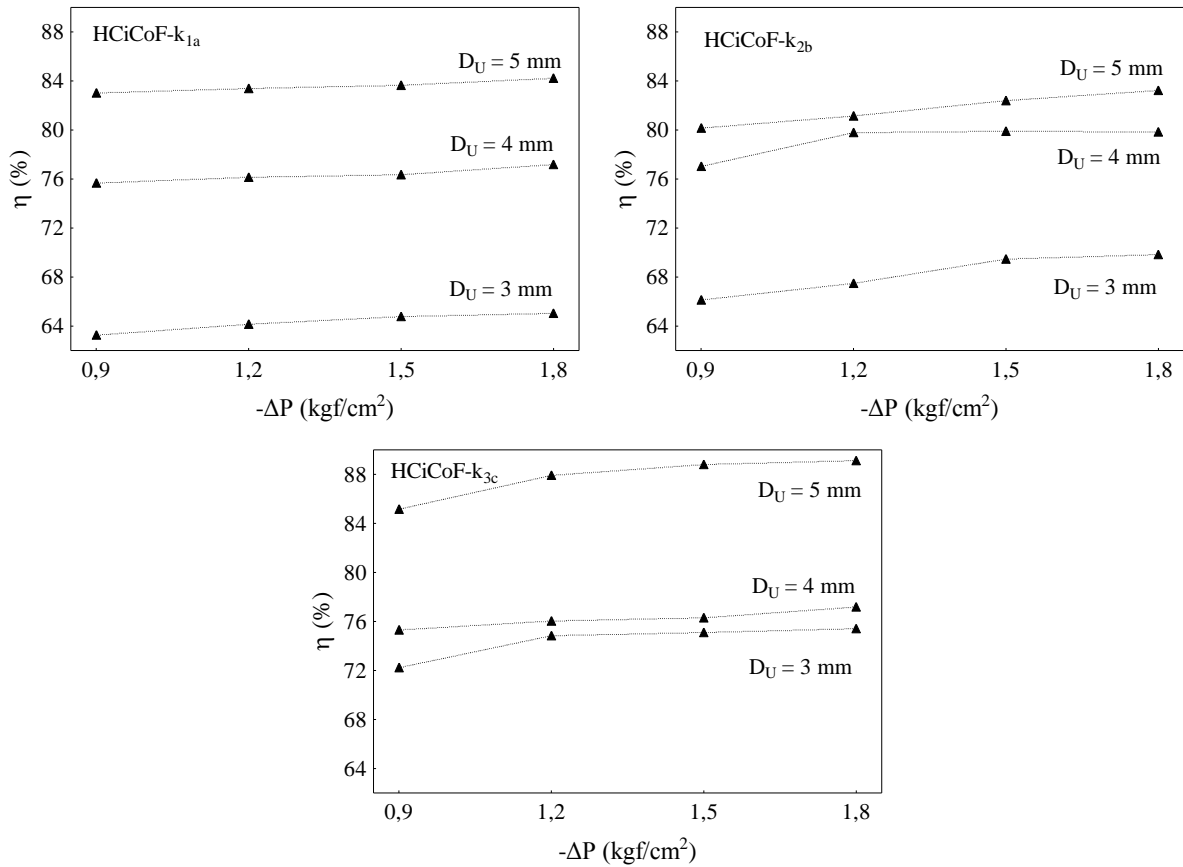


Figura 4.21 – Eficiência Total para Hidrociclones Totalmente Filtrantes em função do diâmetro de *underflow*, queda de pressão e permeabilidade.

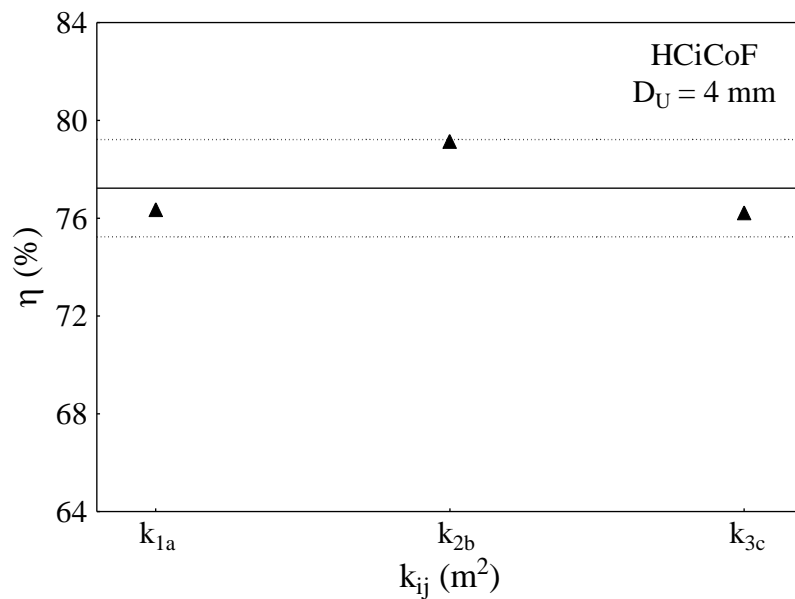


Figura 4.22 – Eficiência Total média do hidrociclone HCiCoF em função da permeabilidade no diâmetro de *underflow* de 4 mm.

Conforme o que foi discutido nessa seção, um Hidrociclone Totalmente Filtrante de menor permeabilidade, operando com um diâmetro de *underflow* maior, seria o mais recomendado para a hidrociclonagem do material utilizado nesse trabalho, uma vez que essa configuração foi a que forneceu a maior capacidade de processamento, com baixo custo energético e com bons valores de eficiência.

#### 4.5 - Comparação do Comportamento do Hidrociclone Convencional com os Hidrociclones Filtrantes

Nesta seção será realizada a comparação e discussão dos principais resultados obtidos experimentalmente para os Hidrociclones Convencional (HCon), Cilíndrico-Filtrante (HCiF), Cônico-Filtrante (HCoF) e Cilíndrico-Cônico-Filtrante (HCiCoF).

A Figura 4.23 apresenta as vazões volumétricas das três modalidades de Hidrociclone Filtrante em relação ao separador convencional em face da queda de pressão e do diâmetro de *underflow*.

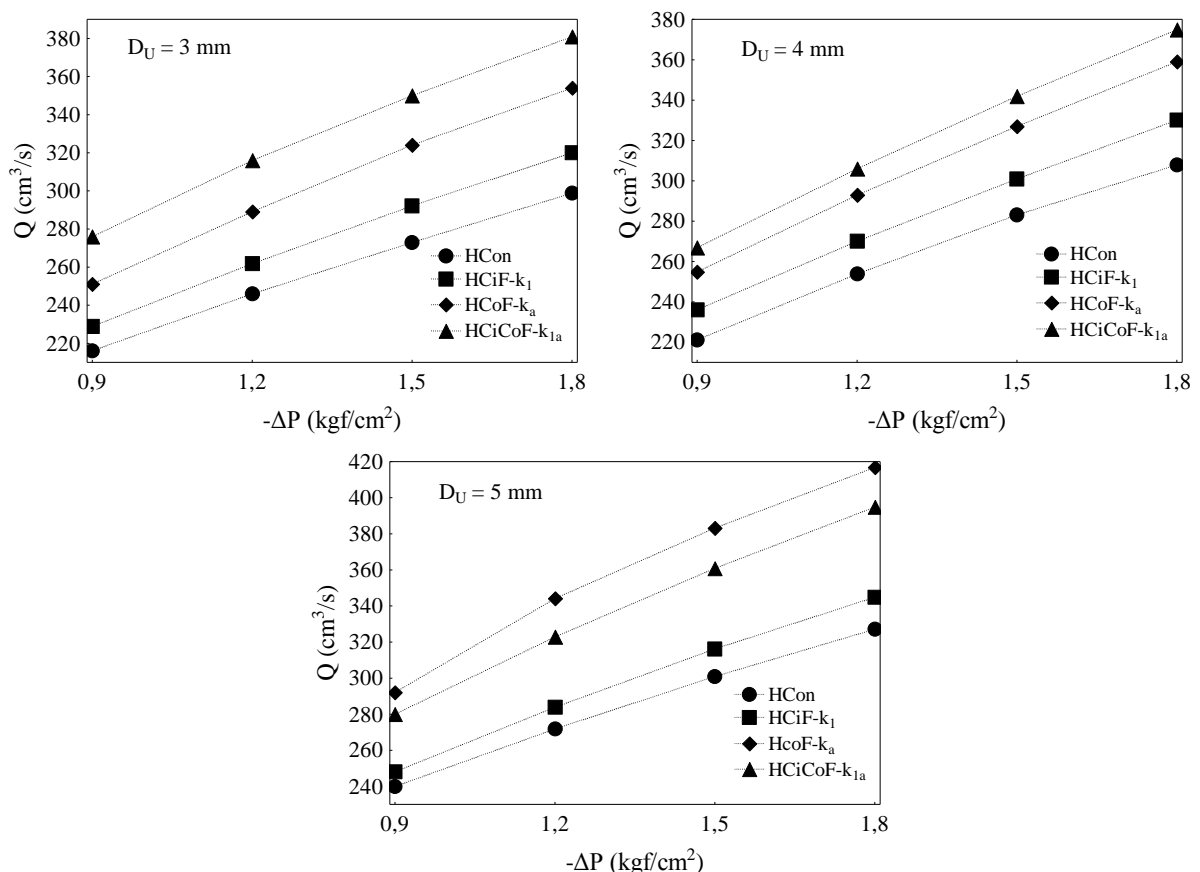


Figura 4.23 – Vazão de alimentação dos hidrociclones HCon, HCiF- $k_1$ , HCoF- $k_a$  e HCiCoF- $k_{1a}$  em função da queda de pressão e diâmetro de *underflow*.

Foi relatado em seções anteriores que a vazão de alimentação é uma resposta de grande importância devido ao fato de estar relacionada à capacidade de processamento. Ao comparar as quatro modalidades de hidrociclones estudadas, verificou-se que na menor permeabilidade ( $k_1$ ,  $k_a$  e  $k_{1a}$ ) utilizada para o HClF, o HCoF e o HClCoF, a vazão de alimentação para os Hidrociclones Filtrantes foi majorada em relação ao Hidrociclone Convencional. Foram observados incrementos médios na vazão de 6, 20 e 23% respectivamente para os hidrociclones HClF, HCoF e HClCoF. Dentre os separadores filtrantes, o hidrociclone HClCoF foi o equipamento que conseguiu tratar a maior quantidade de suspensão aquosa por unidade de tempo.

A Figura 4.24 apresenta a comparação entre os Hidrociclones Convencional e Filtrantes submetidos à permeabilidade intermediária ( $k_2$ ,  $k_b$  e  $k_{2b}$ ). Os resultados obtidos mostram que apenas o Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante (HClF- $k_2$ ) teve vazões de alimentação menores do que as do Hidrociclone Convencional, em aproximadamente 3%. Os demais hidrociclones filtrantes, HCoF- $k_b$  e HClCoF- $k_{2b}$ , tiveram a vazão de alimentação superior ao hidrociclone HCon, com incrementos médios de 4 e 3%, respectivamente.

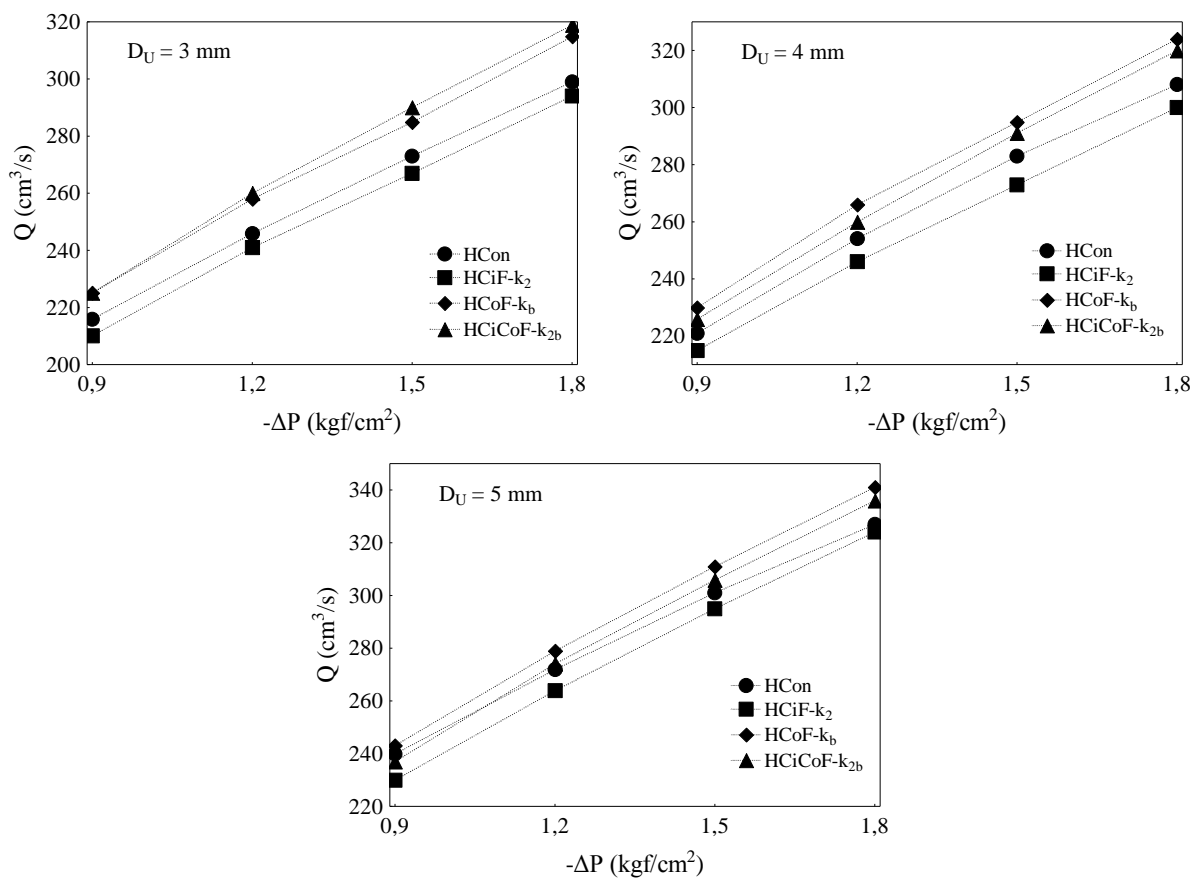


Figura 4.24 – Vazão de alimentação dos hidrociclones HCon, HClF- $k_2$ , HCoF- $k_b$  e HClCoF- $k_{2b}$  em função da queda de pressão e do diâmetro de *underflow*.



A comparação dos Hidrociclones Filtrantes de maior permeabilidade com o Hidrociclone Convencional mostrou que a vazão de alimentação dos hidrociclones HCiF- $k_3$  e HCiCoF- $k_{3c}$  foi minorada em relação ao separador HCon, em 8 e 7%, respectivamente. Já o hidrociclone HCoF- $k_c$  apresentou vazão de alimentação semelhante à do Hidrociclone Convencional, como mostra a Figura 4.25; a diferença entre as vazões volumétricas desses dois separadores foi menor do que 1%. Observou-se que esse comportamento foi mantido para todos os diâmetros de *underflow* utilizados no presente trabalho.

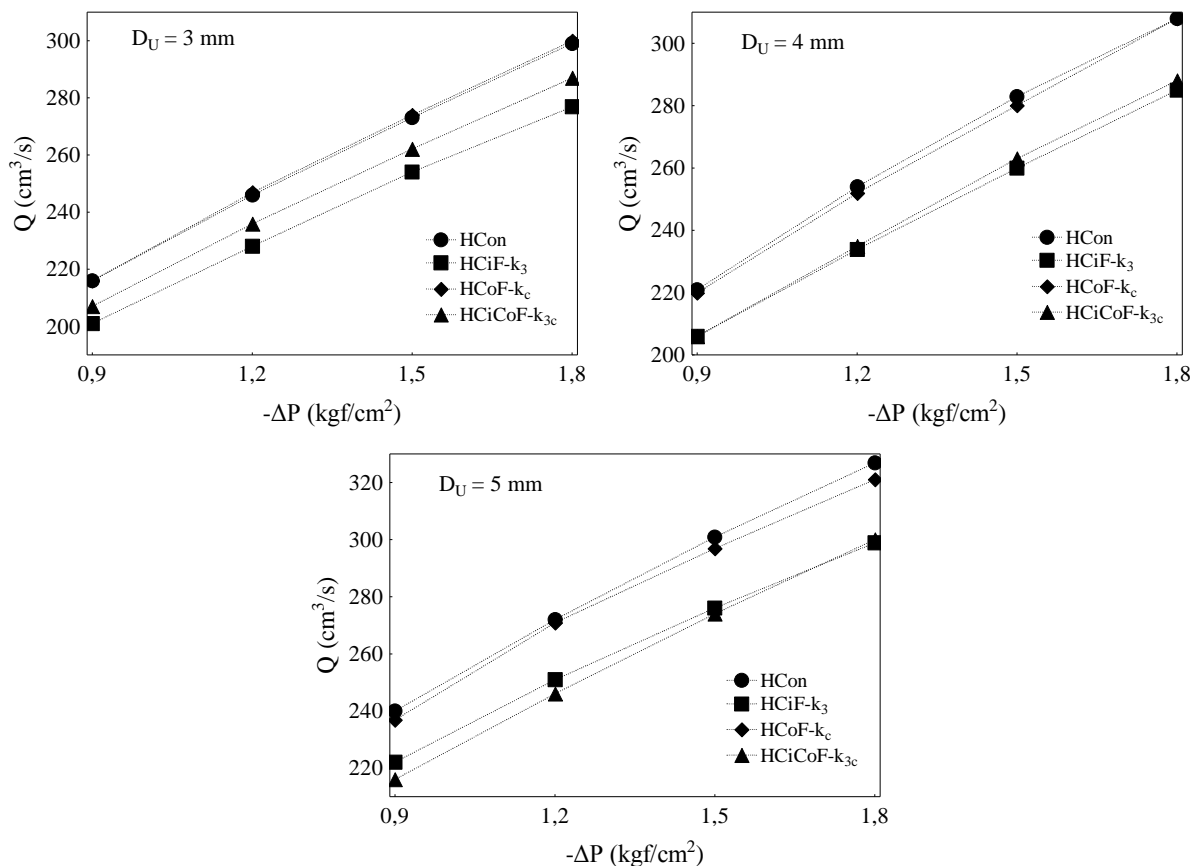


Figura 4.25 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon, HCiF- $k_3$ , HCoF- $k_c$  e HCiCoF- $k_{3c}$  em função da queda de pressão e do diâmetro de *underflow*.

Reorganizando as vazões volumétricas contidas nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, a Figura 4.26 mostra o comportamento desta resposta em função das permeabilidades utilizadas neste trabalho para um diâmetro de *underflow* fixo (5 mm). A mesma tendência e considerações podem ser estendidas aos demais diâmetros de *underflow* (3 e 4 mm). Somente a título de esclarecimento, a “permeabilidade”  $k_0$  que aparece na Figura 4.26 refere-se ao hidrociclone HCon, cujo valor é nulo (impermeável).

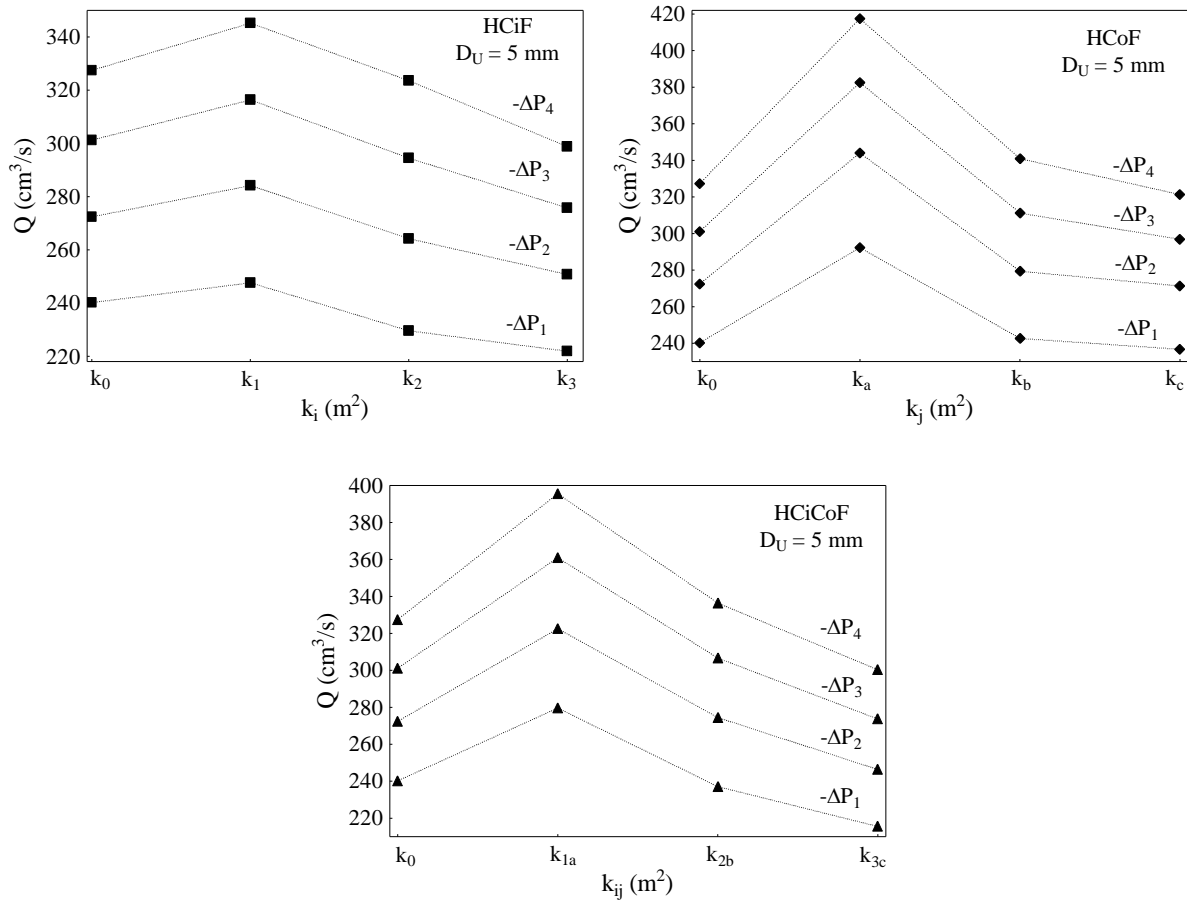


Figura 4.26 – Vazão volumétrica dos Hidrociclones Filtrantes em função da permeabilidade e queda de pressão no  $D_U = 5$  mm.

De acordo com a Figura 4.26, foi possível constatar que a vazão volumétrica de alimentação, independentemente da região na qual ocorreu a filtração durante o processo de hidrociclonagem, passou por um máximo quando as menores permeabilidades foram utilizadas ( $k_1$ ,  $k_a$  e  $k_{1a}$ ). Em face disso, acredita-se que se o principal interesse do usuário estiver relacionado com a capacidade de processamento de suspensão aquosa em hidrociclones filtrantes, deve-se buscar matrizes porosas com permeabilidade iguais ou menores ao patamar retromencionado.

Na sequência, a Figura 4.27 apresenta os desvios médios da vazão de alimentação para cada Hidrociclone Filtrante em relação ao Hidrociclone Convencional. Em suma, analisando apenas a vazão de alimentação verificou-se que os Hidrociclones Filtrantes de menor permeabilidade apresentaram os maiores acréscimos nessa variável em relação ao equipamento convencional. Pode-se dizer que o Hidrociclone Totalmente Filtrante de menor permeabilidade (HCiCoF- $k_{1a}$ ) seria o equipamento mais vantajoso neste quesito, pois

apresentou a maior capacidade de processamento, cerca de 23% maior quando comparado ao hidrociclone HCon.

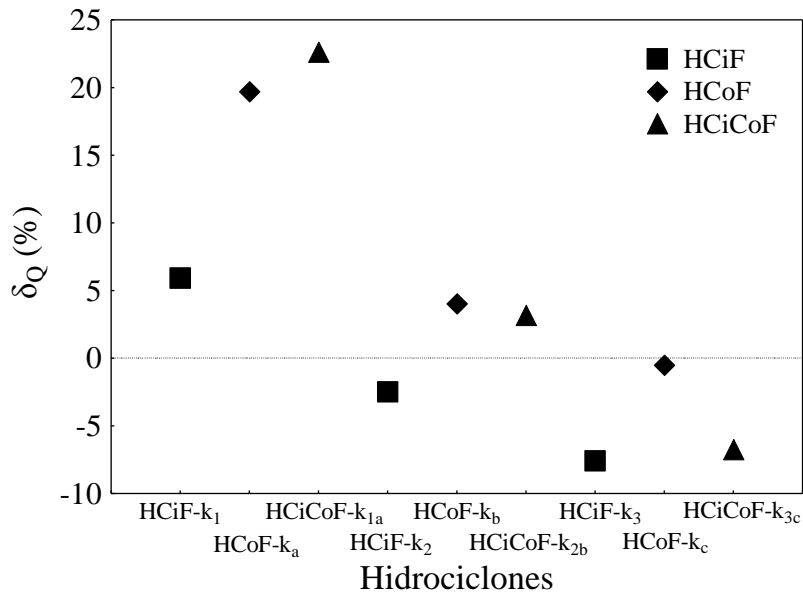


Figura 4.27 – Desvios médios da vazão de alimentação dos Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional.

Como a capacidade de processamento foi maior ou menor para os Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional a depender da permeabilidade, já era de se esperar que tal efeito também se refletiria no Número de Euler. Analisando a Figura 4.28 verificou-se que para as menores permeabilidades estudadas, os consumos energéticos dos hidrociclones HCiF-k<sub>1</sub>, HCoF-k<sub>a</sub> e HCiCoF-k<sub>1a</sub>, foram menores do que para o Hidrociclone Convencional, independente do diâmetro de *underflow* utilizado, com decréscimos médios de 13, 32 e 35%, respectivamente.

Para a permeabilidade intermediária, somente o Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante (HCiF-k<sub>2</sub>) teve o Número de Euler maior do que o Hidrociclone Convencional (2% em média), haja vista que este foi o único equipamento que apresentou vazão de alimentação menor do que o Hidrociclone Convencional nesta permeabilidade.

Ainda observando a Figura 4.28, percebeu-se que, para a maior permeabilidade, os gastos energéticos dos hidrociclones HCiF-k<sub>3</sub>, HCoF-k<sub>c</sub> e HCiCoF-k<sub>3c</sub> foram, em regra, iguais ou superiores em relação ao Hidrociclone Convencional (aproximadamente 8%, em média), o

que reflete o comportamento da vazão de alimentação que havia diminuído nesta condição operacional.

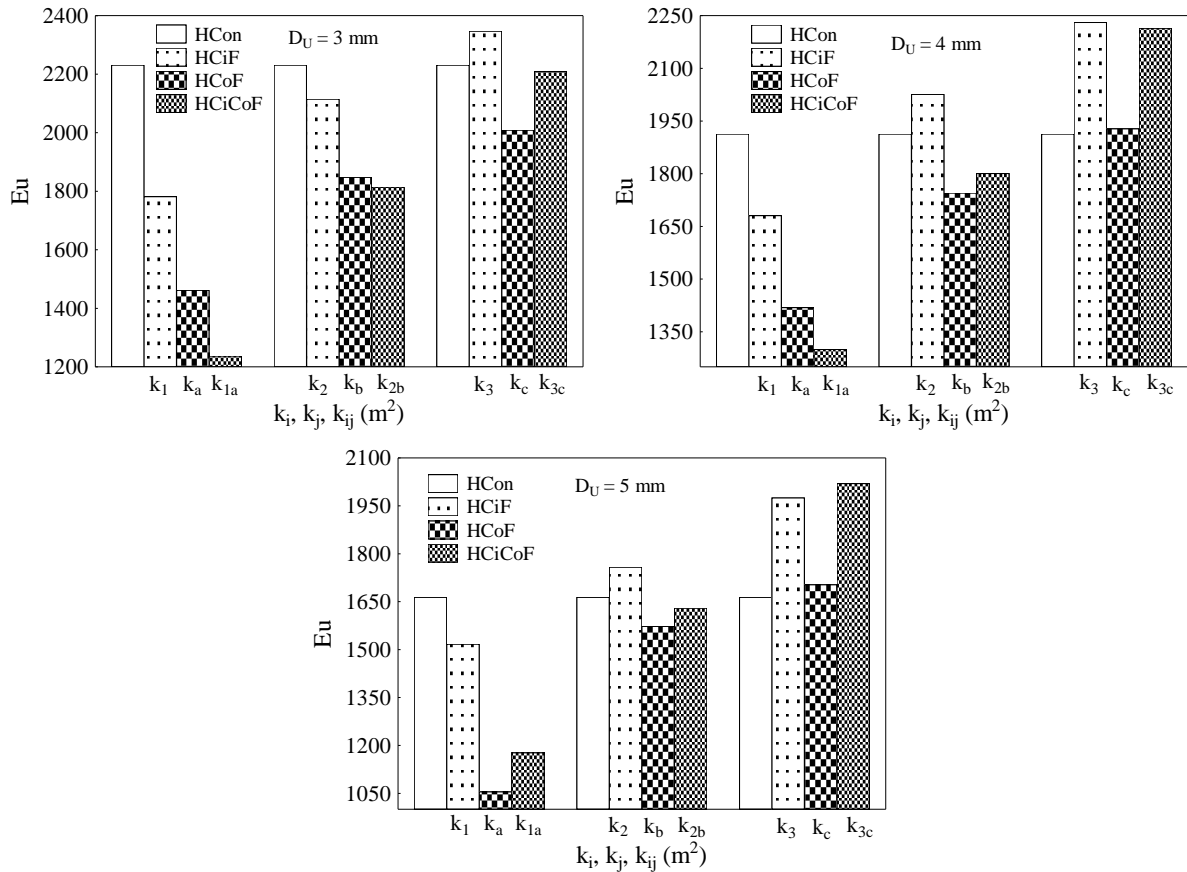


Figura 4.28 – Número de Euler para os hidrociclones HCon, HCiF, HCoF e HCoF em função do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade.

A Figura 4.29 apresenta os desvios médios do Número de Euler para cada Hidrociclone Filtrante em relação ao Hidrociclone Convencional. Pode-se dizer que, de maneira geral, a filtração foi benéfica para a hidrociclonação, pois na maioria das observações efetuadas (67%), o Número de Euler dos Hidrociclones Filtrantes foi menor do que os apresentados pelo Hidrociclone Convencional.

Analisando isoladamente o Número de Euler, pode-se afirmar que o Hidrociclone Totalmente Filtrante de menor permeabilidade (HCoF- $k_{1a}$ ) foi o melhor equipamento dentre os estudados porque apresentou um  $Eu$  cerca de 35 % menor do que o verificado para o separador convencional (HCon), tendo portanto uma redução significativa do consumo energético.

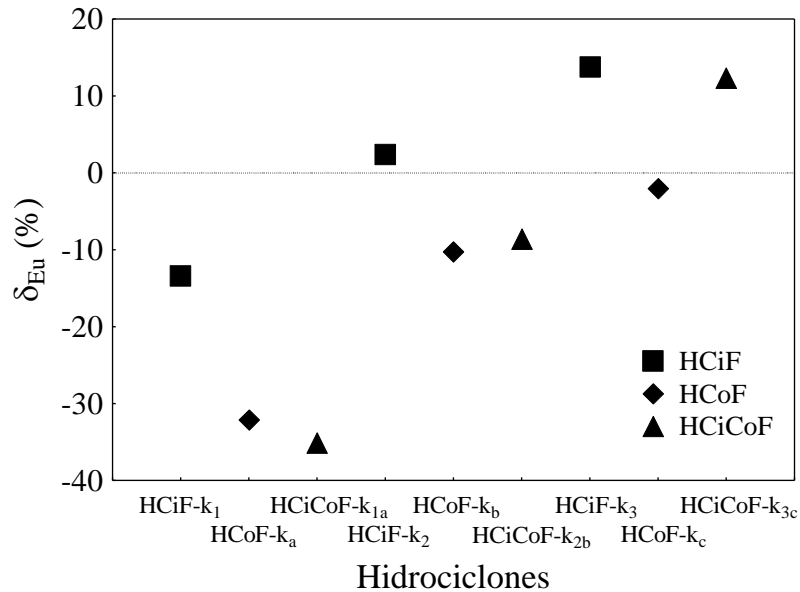


Figura 4.29 – Desvios médios do Número de Euler dos Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional.

Dando continuidade ao estudo comparativo, a Figura 4.30 apresenta as Razões de Líquido para os hidrociclones estudados. Ao comparar as Razões de Líquido obtidas para as quatro modalidades de hidrociclones utilizadas neste trabalho, verificou-se que, com exceção do HCiF-k<sub>3</sub>, todos os Hidrociclones Filtrantes tiveram incremento nesta resposta quando comparadas ao Hidrociclone Convencional, independente do diâmetro de *underflow* utilizado.

Como era esperado, a filtração foi capaz de modificar a relação entre os vórtices externo e interno, fazendo com que mais partículas migrem do vórtice interno para o externo, descarregando uma maior quantidade de suspensão na corrente de *underflow*.

Ainda observando a Figura 4.30, verificou-se que, dentre os hidrociclones constituídos de paredes permeáveis, o Hidrociclone Totalmente Filtrante foi o que apresentou a maior Razão de Líquido.

A Figura 4.31 apresenta os desvios médios da Razão de Líquido para os Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional, sintetizando, desta forma, as informações lançadas nos parágrafos anteriores.

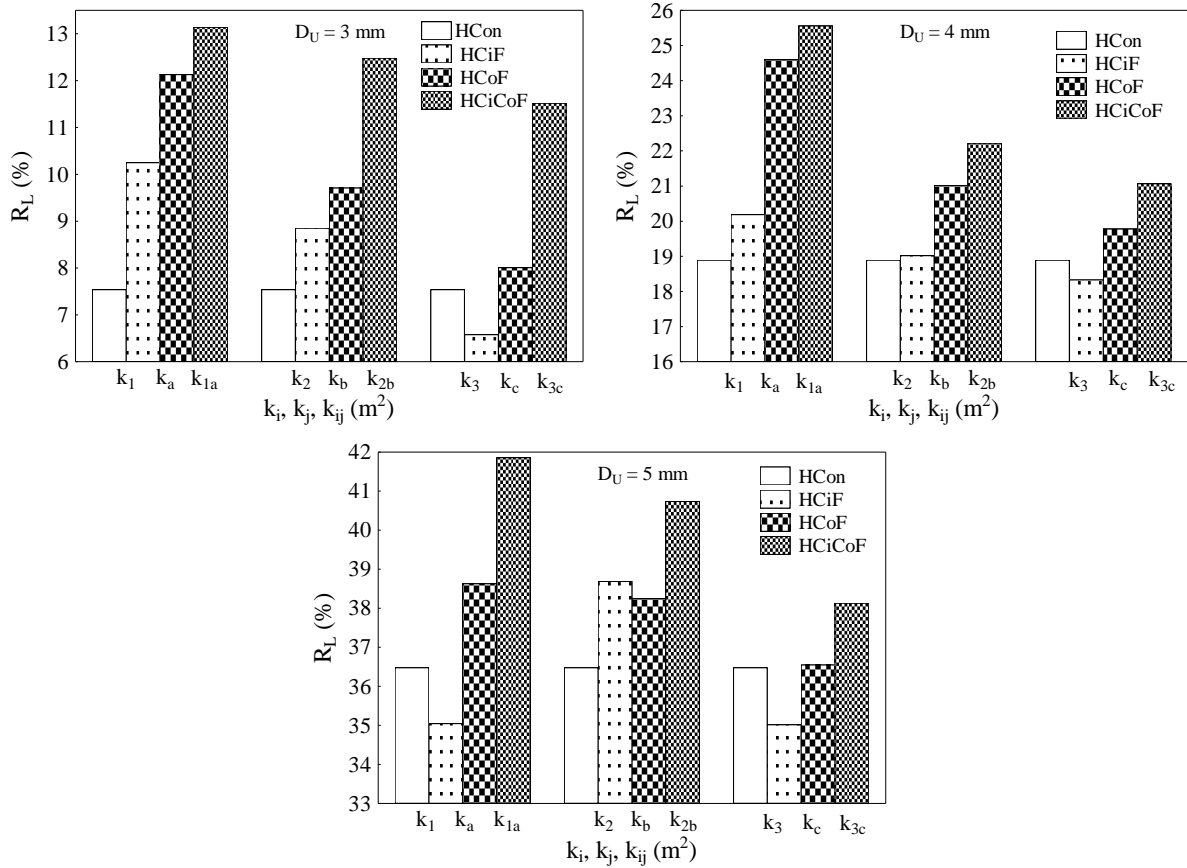


Figura 4.30 – Razão de Líquido para os hidrociclones HCon, HClF, HCoF e HClCoF em função do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade.

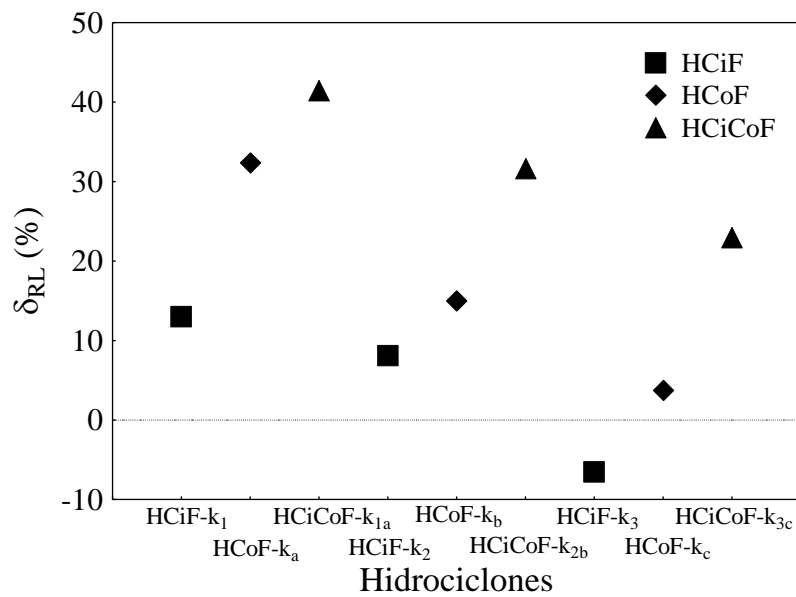


Figura 4.31 – Desvios médios da Razão de Líquido dos Hidrociclones Filtrantes em relação ao Hidrociclone Convencional.

Analisando a Figura 4.31, confirmou-se que, de maneira geral, a Razão de Líquido foi maior para os Hidrociclones Filtrantes do que para o Hidrociclone Convencional, sendo que esse aumento foi mais acentuado para o Hidrociclone Totalmente Filtrante de menor permeabilidade (HCiCoF- $k_{1a}$ ) em cerca de 40%. Entretanto, as menores Razões de Líquido foram obtidas para a configuração HCF- $k_3$ , sendo assim esta é uma interessante configuração para a operação de espessamento.

A Figura 4.32 apresenta a comparação entre os resultados experimentais obtidos para a Eficiência Total das quatro modalidades de hidrociclones estudadas.

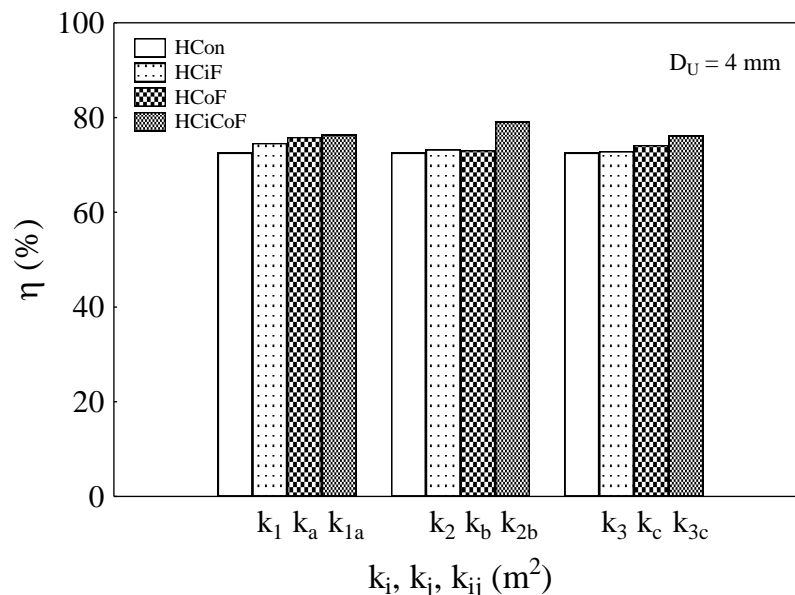


Figura 4.32 – Eficiência Total para os hidrociclones HCon, HCF, HCoF e HCF-CoF para o diâmetro de *underflow* de 4 mm.

Observou-se através da Figura 4.32 que a Eficiência Total praticamente não foi modificada devido ao posicionamento do meio filtrante. A título de exemplo, para o diâmetro de *underflow* de 4 mm, foi verificado que as diferenças entre as eficiências dos hidrociclones HCon, HCF, HCoF e HCF-CoF estavam dentro da incerteza da medida da resposta. Vale lembrar que este mesmo comportamento, foi verificado para os diâmetros de *underflow* de 3 e 5 mm.

Acredita-se que, pelo fato da configuração de hidrociclone utilizada neste trabalho ser uma geometria otimizada para a Eficiência Total (VIEIRA, 2006), essa resposta já está em

um nível alto para a faixa granulométrica utilizada neste trabalho, independente da utilização ou não da parede filtrante.

Constata-se que a Eficiência Total foi uma resposta muito mais dependente da geometria do que propriamente do efeito da operação unitária (filtração) sobre o separador. Logo, como todos os hidrociclones filtrantes derivaram da mesma gênese (HC11), razão também não haveria para que as respectivas eficiências fossem tão diferentes entre si.



---

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

Este capítulo apresenta uma síntese das principais conclusões obtidas nesse trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros que possam aprimorar os conhecimentos sobre os Hidrociclones Filtrantes.

### 5.1 - Conclusões

De acordo com as condições operacionais e os principais resultados experimentais deste trabalho, foi possível realizar as seguintes conclusões quanto a:

#### **A Influência da Variável Diâmetro de *Underflow*:**

- O aumento do diâmetro do orifício de *underflow* provocou um aumento na vazão de alimentação tanto do Hidrociclone Convencional quanto dos Hidrociclones Filtrantes.
  - Em se tratando do Hidrociclone Convencional um primeiro incremento no  $D_U$  levou a acréscimos médios de 3% na vazão volumétrica de alimentação e um segundo incremento no  $D_U$  ocasionou acréscimos de 7%, em média.
  - Para o hidrociclone HCiF verificou-se que um primeiro aumento no  $D_U$  levou a acréscimos médios de 3% na vazão de alimentação e um segundo incremento no  $D_U$  provocou acréscimos médios de 6%.
  - No caso do hidrociclone HCoF verificou-se que um primeiro aumento no  $D_U$  levou a acréscimos médios de 2% na vazão de alimentação e um segundo incremento no  $D_U$  provocou acréscimos médios de 9%.

- A vazão de alimentação do hidrociclone HCoF praticamente não sofreu alterações com a troca do  $D_U$  de 3 para 4 mm. E um segundo incremento no  $D_U$  levou a acréscimos médios de 5% na resposta.
- O Número de Euler sofreu decréscimos com o aumento do diâmetro de *underflow*, independente se foram utilizados Hidrociclones Convencional ou Filtrante.
  - Em se tratando do Hidrociclone Convencional um primeiro incremento no  $D_U$  levou a decréscimos médios de 14% no Número de Euler e um segundo incremento no  $D_U$  ocasionou decréscimos de 13%, em média.
  - Para o hidrociclone HCoF verificou-se que um primeiro aumento no  $D_U$  levou a decréscimos médios de 5% no Número de Euler e um segundo incremento no  $D_U$  provocou decréscimos médios de 12%.
  - No caso do hidrociclone HCoF verificou-se que um primeiro aumento no  $D_U$  levou a decréscimos médios de 4% no Número de Euler e um segundo incremento no  $D_U$  provocou decréscimos médios de 15%.
  - Para o hidrociclone HCoF observou-se que um incremento no  $D_U$  de 3 para 4 mm ocasionou decréscimos de 2%, em média, no Número de Euler. E um segundo incremento no  $D_U$  levou a acréscimos médios de 10% na resposta.
- Maiores diâmetros de *underflow* conduziram a maiores Razões de Líquido para as quatro modalidades de hidrociclones estudadas, HCon, HCoF e HCoF.
- Os Hidrociclones, Convencional ou Filtrantes, apresentaram maiores Eficiências Totais de separação quando foram utilizados maiores diâmetros de *underflow*.
  - No caso do Hidrociclone Convencional, a Eficiência Total com  $D_U$  de 4 mm foi 5%, em média, maior do que com  $D_U$  de 3 mm. Já a Eficiência Total com  $D_U$  de 5 mm foi 14%, em média, maior do que com  $D_U$  de 4 mm.
  - Para o hidrociclone HCoF a Eficiência Total aumentou, em média, 8 % com um primeiro incremento no  $D_U$  e 15 %, em média, com um segundo incremento no diâmetro de *underflow*.
  - A Eficiência Total do Hidrociclone Cônico-Filtrante aumentou em média 9 % quando se passou do  $D_U$  de 3 para 4 mm e 16 %, em média, quando modificou-se o  $D_U$  de 4 para 5 mm.

- No caso do hidrociclone HCoF verificou-se que um primeiro aumento no  $D_U$  levou a acréscimos médios de 12% na Eficiência Total e um segundo incremento no  $D_U$  provocou acréscimos médios de 9% na resposta em questão.

#### **A Influência da Permeabilidade no Desempenho dos Hidrociclones Filtrantes:**

- Foi possível constatar que a vazão de alimentação dos hidrociclones HCoF, HCoF e HCoF diminuiu com o incremento da permeabilidade.
  - Para o hidrociclone HCoF, um primeiro incremento na permeabilidade provocou uma queda de 8%, em média, na vazão de alimentação, já um segundo incremento levou a decréscimos de 5%, em média, na mesma resposta.
  - Em se tratando do hidrociclone HCoF, foram verificados decréscimos médios de 13% no primeiro incremento da permeabilidade, e de 4% no segundo incremento da permeabilidade.
  - Para o hidrociclone HCoF um primeiro aumento da permeabilidade resultou em um decréscimo da capacidade de processamento de 15 % em média. Um segundo incremento diminuiu a vazão de alimentação em 10 % em média.
- À medida que o valor da permeabilidade foi aumentando, o Número de Euler dos hidrociclones filtrantes HCoF, HCoF e HCoF também sofreu acréscimos.
  - Um primeiro aumento da permeabilidade provocou um acréscimo no Número de Euler de 18 % em média; já no segundo incremento o aumento foi de 11 % para o hidrociclone do tipo HCoF.
  - No caso do hidrociclone HCoF, um primeiro aumento na permeabilidade aumentou o Número de Euler cerca de 33%, em média. Um segundo incremento na permeabilidade provocou um acréscimo no gasto energético de 9 %, em média.
  - Para o hidrociclone HCoF um incremento na permeabilidade levou a um aumento médio no Número de Euler de 41 %. Um segundo incremento na permeabilidade ocasionou um aumento de 23 %, em média, no Número de Euler.

- Incrementos na permeabilidade do meio filtrante provocaram uma queda na Razão de Líquido de todas as modalidades de hidrociclones filtrantes estudadas.
  - Para o hidrociclone HClF um aumento na permeabilidade diminuiu a Razão de Líquido cerca de 10%, em média, sendo que outro aumento na permeabilidade levou a decréscimos de 13%, em média, na resposta em questão.
  - Para o hidrociclone HCoF um primeiro aumento na permeabilidade ocasionou uma queda na Razão de Líquido de 12 % em média. Um segundo incremento na permeabilidade levou a uma diminuição na Razão de Líquido de 10 % em média.
  - Em se tratando do hidrociclone HClCoF, decréscimos médios de 7% na Razão de Líquido foram observados para os dois incrementos da permeabilidade.
- A permeabilidade do meio filtrante não provocou modificações significativas na Eficiência Total dos hidrociclones filtrantes HClF, HCoF e HClCoF.

#### **A Influência do Posicionamento do Meio Filtrante sobre o Hidrociclone:**

- Em uma mesma condição operacional (distribuição granulométrica, concentração de sólidos e queda de pressão), a filtração associada à operação de hidrociclonagem foi capaz de modificar o desempenho do Hidrociclone Convencional.
- A vazão de alimentação dos Hidrociclones Filtrantes (HClF, HCoF e HClCoF), apresentou acréscimos ou decréscimos em relação ao Hidrociclone Convencional a depender da permeabilidade do meio poroso. Menores valores de permeabilidade acarretaram num aumento da vazão de alimentação enquanto que altos valores de permeabilidade ocasionaram uma queda na resposta em questão em relação ao Hidrociclone Convencional.
  - Na menor permeabilidade utilizada ( $k_1$ ,  $k_a$ , e  $k_{1a}$ ) os hidrociclones HClF, HCoF e HClCoF apresentam incrementos médios na vazão de alimentação de 6, 20 e 23% respectivamente, em relação ao hidrociclone HCon.
  - Para a permeabilidade intermediária ( $k_2$ ,  $k_b$ , e  $k_{2b}$ ), o hidrociclone HClF apresentou decréscimos médios na vazão de alimentação de 3% em relação ao hidrociclone HCon. Já para os hidrociclones HCoF e HClCoF observou-se acréscimos médios de 4 e 3%, respectivamente.

- Na maior permeabilidade utilizada ( $k_3$ ,  $k_c$ , e  $k_{3c}$ ) os hidrociclones HCiF, HCiCoF tiveram decréscimos médios na vazão de alimentação de 8 e 7% respectivamente, em relação ao hidrociclone HCon. A vazão de alimentação do hidrociclone HCoF foi menos de 1% menor do que a apresentada pelo hidrociclone HCon.
- Similarmente ao comportamento da vazão de alimentação, o Número de Euler para as três modalidades de Hidrociclones Filtrantes estudadas aumentou ou diminuiu em comparação com o Hidrociclone Convencional conforme a permeabilidade do meio filtrante utilizada. O Número de Euler para os Hidrociclones Filtrantes foi menor do que para o Hidrociclone Convencional quando se utilizou a menor permeabilidade estudada ou a permeabilidade intermediária. Quando se utilizou o maior valor de permeabilidade, o Número de Euler teve seu valor aumentado em relação ao HCon.
  - Na menor permeabilidade utilizada ( $k_1$ ,  $k_a$ , e  $k_{1a}$ ) os hidrociclones HCiF, HCoF e HCiCoF apresentam decréscimos médios no Número de Euler de 13, 32 e 35% respectivamente, em relação ao hidrociclone HCon.
  - Para a permeabilidade intermediária ( $k_2$ ,  $k_b$ , e  $k_{2b}$ ), o hidrociclone HCiF apresentou um incremento médio no Número de Euler de 2% em relação ao hidrociclone HCon. Já para os hidrociclones HCoF e HCiCoF observou-se decréscimos médios de 10 e 9%, respectivamente, no gasto energético.
  - Na maior permeabilidade utilizada ( $k_3$ ,  $k_c$ , e  $k_{3c}$ ) os hidrociclones HCiF, HCoF e HCiCoF apresentaram Número de Euler cerca de 8% maior do que o verificado para o Hidrociclone Convencional.
- Nas três modalidades de hidrociclone filtrante (HCiF, HCoF e HCiCoF), a retirada de filtrado fez com que tais equipamentos, em relação ao separador convencional, tivessem acréscimos em suas Razões de Líquido. O Hidrociclone Totalmente Filtrante de menor permeabilidade (HCiCoF- $k_{1a}$ ) foi o que apresentou a maior Razão de Líquido (cerca de 40% maior do que a apresentada para o hidrociclone HCon) e o Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante de maior permeabilidade (HCiF- $k_3$ ) foi o equipamento que apresentou a menor Razão de Líquido, sendo um equipamento interessante para a operação de espessamento.
- A Eficiência Total dos separadores filtrantes não apresentou modificações significativas frente ao valor da eficiência do Hidrociclone Convencional.

Considerando os resultados obtidos nas condições operacionais e configurações geométricas utilizadas neste trabalho, pôde-se concluir que, em se tratando de Hidrociclones Filtrantes, não é aconselhável empregar meios filtrantes mais permeáveis do que  $k_1$  e  $k_a$ , pois tudo indica que, em termos energéticos, consumiriam mais energia do que a utilizada pelo Hidrociclone Convencional e em termos de separação, seriam praticamente idênticos ao separador convencional.

## 5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, fazem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para auxiliar nas explicações do escoamento interno em Hidrociclones Filtrantes.
- Realizar estudos experimentais com valores de permeabilidade para o meio poroso inferiores a  $k_1$  e  $k_a$ .
- Realizar experimentos utilizando diferentes combinações de permeabilidades para as seções cilíndricas e cônicas filtrantes.
- Realizar planejamentos fatoriais das principais relações geométricas de um Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante e de um Hidrociclone Totalmente Filtrante, como subsídio do processo de otimização.
- Por meio dos resultados experimentais e da técnica de superfície de respostas, formular e resolver problemas de otimização, para a determinação de geometrias de hidrociclones ótimas.

---

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

AHMED, M. M.; IBRAHIM, G. A.; FARGHALY, M. Performance of a three-product hydrocyclone. **International Journal of Mineral Processing**, v. 91, p. 34-40, 2009.

ALMEIDA, C. A. K. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder**. Dissertação (Mestrado) - UFU, 2008.

ARRUDA, E. B.; ALMEIDA, C. A. K.; 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. [S.l.: s.n.], 2002.

ARRUDA, E. B. **Performance de hidrociclones filtrantes com geometria Demco**. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 185p., 2003.

BHASKAR, K.; GOVINDARAJAN, B; BARNWAL, J. P.; RAO, K. K.; GUPTA, B. K.; RAO, T. C. Classification studies of lead-zinc ore fines using water-injection cyclone. **International Journal of Mineral Processing**, v. 77, p. 80-94, 2005.

BICALHO, I. C. **Concentração de leveduras da fermentação alcoólica em hidrociclones**. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 135p., 2011.

BLOOR, M. I. G.; INGHAM, D. B. Turbulent spin in a cyclone. **Trans I. Chem. E.**, v. 15, p. 1-6, 1975.

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

CRINER, H. E. The vortex thickener. In: **International Conference on Coal Preparation**. Paris: [s.n.], 1950.

DABIR, B. **Mean Velocity Measurements in a 3"- Hydrocyclone using Laser Doppler Anemometry**. 1983. Thesis (Doctor)-Chemical Engineering Department, Michigan State University, East Lansing, MI, 1983.

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

DARBY, R. **Chemical Engineering Fluid Mechanics**. 2nd Edition. New York: Taylor & Francis, 2001. 559 p.

DRIESSEN, M. G. Review of industrial mining. **Special Issue** No. 4, p. 449-461, 1951.

DUECK, J.; PIKUSHCHAK, B.; MINKOV, L.; FARGHALY, M.; NEESSE, TH. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection. **Minerals Engineering**, v. 23, p. 289-294, 2010.

FAÇANHA, J. M. F. **Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido-líquido em hidrociclones**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

FAHLSTROM, P. H. In: INSTITUTE OF MINING AND METALURGY. **Proceedings International Mineral Processing Congress**. [S.l.], 1960. p. 632-643.

FARGHALY, M.G.; GOLYK, V.; IBRAHIM, G.A.; AHMED, M.M.; NEESSE, T.; Controlled wash water injection to the Hydrocyclone underflow. **Minerals Engineering**, v. 23, p. 321-325, 2010.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: EDUSP, 2000. 426 p.

HENRIQUE, H. M.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo da dinâmica de um sedimentador filtrante. In: **XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos**. Uberlândia: [s.n.], 1987. p. 303-310.

HWANG, K.-J.; HWANG, Y.-W.; YOSHIDA, H. Design of novel Hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. **Chemical Engineering Science**, v.85, n.15, p.62-68, 2013.



- HWANG, K.-J.; HWANG, Y.-W.; YOSHIDA, H.; SHIGEMORI, K.; Improvement of particle separation efficiency by installing conical top-plate in Hydrocyclone. **Powder Technology**, v.232, p. 41-48, 2012.
- LANNA, A. E.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. **Revista Ciência & Engenharia**, p. 175-186, 1992.
- MAINZA, A.; NARASIMHA, M.; POWELL, M. S.; HOLTHAM, P. N.; BRENNAN, M. Study of flow behaviour in a three-product cyclone using computational fluid dynamics. **Minerals Engineering**, v.19, n.10, p.1048-1058, 2006.
- MAINZA, A.; POWELL, M. S.; KNOPJES, B. Differential classification of dense material in a three-product cyclone. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 573-579, 2004.
- MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. In: Anais do **XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos**, São Carlos. [S.l.: s.n.], 1989. p. 125-136.
- NENU, R. K. T.; YOSHIDA, H. Comparison of separation performance between single and two inlets hydrocyclones. **Advanced Powder Technology**, v.20, n.2, p.195-202, 2009.
- NENU, R.K.T.; HAYASE, Y.; YOSHIDA, H.; YAMAMOTO, T.; Influence of inlet flow rate, pH, and beads mill operating condition on separation performance of sub-micron particles by electrical Hydrocyclone. **Advanced Powder Technology**, v. 21, p. 246-255, 2010.
- OBENG, D. P.; MORRELL, S. The jk three-product cyclone - performance and potential applications. **International Journal of Mineral Processing**, v. 69, p. 129-142, 2003.
- PRATARN, W.; WIWUT, T.; YOSHIDA, H.; KUNIHIRO, F. Effect of ph of fine silica suspension and central rod diameter on the cut size of an electrical hydrocyclone with and without underflow. **Separation and Purification Technology**, v. 63, p. 452-459, 2008.
- RIETEMA, K. Performance and design of hydrocyclones, parts i to iv. **Chemical Engineering Science**, v. 15, p. 298-325, 1961.
- ROCHA, S. M. S.; VIEIRA, L. G. M. Experimental determination of the permeability of non-planar porous structures during operation of equipment in own industrial unit. **Eight International Latin-American Conference in Powder Technology**. 2012.

- SCHAPEL, S. C.; CHASE, G. G. Modeling of hydrocyclone flow with permeable walls. **Advances in Filtration and Separation Technology**, v. 11, p. 33-36, 1998.
- SCHUBERT, H.; NEESE, T. A hydrocyclone separation model in consideration of the turbulent multiphase flow. In: **Proceedings of International Conference on Hydrocyclones**. [S.l.: s.n.], 1980. p. 23-36.
- SILVA, D. O., **Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas**. Tese (Doutorado) - UFU, 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**. [S.l.: s.n.], 1988. p. 353-361.
- SOUZA, F. J. **Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante**. Dissertação (Mestrado) - UFU, 1999.
- SOUZA, F. J.; NETO, A. S.; BARROZO, M. A. S. Simulação numérica de escoamentos turbulentos em hidrociclones com modelagem submalha. In: **II Escola Brasileira de Transição e Turbulência - ETT2000**, Uberlândia, p.358-368. [S.l.: s.n.], 2000.
- SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**. Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston, 1984. 198 p.
- SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 4th Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.
- VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W.; **An introduction to Computational Fluid Dynamics - The finite volume method**. Longman Group LTD, England, 1995. 257 p.
- VIEIRA, L. G. M. **Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema**. 2001. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2001.
- VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes**. 2006. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.
- VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. **Análise da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclone Filtrante**. [S.l.], 1997.

WANG, B.; YU, A. B. Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder. **Chemical Engineering Journal**, v.135, n.1-2, p.33-42, 2008.

YANG, Q.; LV, W.-J.; MA, L.; WANG, H.-L.; CFD study on separation enhancement of mini-hydrocyclone by particulate arrangement. **Separation and Purification Technology**, v.102, p. 15-25, 2013.

YOSHIDA, H.; FUKUI, K.; PRATARN, W.; TANTHAPANICHAKOON, W.; Particle separation performance by use of electrical hydrocyclone. **Separation and Purification Technology**, v. 50, p. 330-335, 2006.

---

---

## APÊNDICE A

### DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE E DA POROSIDADE DOS CILINDROS E CONE POROSOS

---

---

#### A.1 - Determinação da Permeabilidade dos Cilindros e Cones Porosos

Para a previsão da permeabilidade dos três cilindros e dos três cones utilizados no presente trabalho, foi utilizada a metodologia desenvolvida por Rocha e Vieira (2012), que consistia na caracterização dos cilindros e cones porosos durante a própria operação do equipamento. Utilizando a água como fluido, foi considerado que este era incompressível e newtoniano. Nos hidrociclones filtrantes, o escoamento através da estrutura porosa obedece a Lei de Darcy, descrita pela Equação A.1.

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{k_m} q = \frac{\mu}{k_m} \frac{Q_F}{A_{lateral}} \quad (\text{A.1})$$

Sendo que a área lateral poderá ser a área do cilindro ou a área do cone.

- Área lateral do cilindro:

$$A_{lateral} = 2\pi Hr \quad (\text{A.2})$$

- Área lateral do cone:

$$A_{lateral} = 2\pi Hr + \frac{\pi}{2} H(D_c - D_U) \quad (\text{A.3})$$

Substituindo as Equações A.2 e A.3 na Equação A.1 e integrando, obtêm-se as Equações A.4 e A.5, respectivamente, que permitem relacionar a vazão de filtrado com a queda de pressão. Vale ressaltar que Rocha e Vieira (2012) aplicaram um fator de correção para a queda de pressão quando se tratava da seção cônica como o meio poroso.

$$-\Delta P = \frac{\mu}{2\pi H.k_m} \ln\left(\frac{D_c + 2\xi}{D_c}\right) Q_F \quad (\text{A.4})$$

$$-\Delta P = \frac{\mu}{2\pi H.k_m} \ln\left(\frac{D_U + D_c + 4\xi}{D_U + D_c}\right) Q_F \quad (A.5)$$

Reorganizado as equações, é possível obter uma constante  $\psi$  que relaciona a vazão de filtrado com a queda de pressão (Equação A.6).

$$Q_F = \psi(-\Delta P) \quad (A.6)$$

- Constante para o cilindro poroso (Equação A.7):

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\mu}{2\pi H.k_m} \ln\left(\frac{D_c + 2\xi}{D_c}\right) \quad (A.7)$$

- Constante para o cone poroso (Equação A.8):

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\mu}{2\pi H.k_m} \ln\left(\frac{D_U + D_c + 4\xi}{D_U + D_c}\right) \quad (A.8)$$

Dessa forma, a partir das equações anteriores e das medidas experimentais de queda de pressão e vazão volumétrica de filtrado, pode-se estimar a constante  $\psi$  e, em seguida, obter o valor da permeabilidade dos cilindros e cones porosos. Esses valores estão apresentados nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente.

Tabela A.1 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cilindros porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação.

-ΔP (kgf/cm <sup>2</sup> )	Q <sub>F</sub> (cm <sup>3</sup> /s)		
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>
1,8	0,127	0,192	0,539
1,8	0,129	0,189	0,535
1,8	0,128	0,191	0,533
1,5	0,099	0,161	0,457
1,5	0,099	0,164	0,460
1,5	0,097	0,162	0,455
1,2	0,077	0,136	0,374
1,2	0,078	0,133	0,371
1,2	0,076	0,135	0,365
0,9	0,053	0,103	0,272
0,9	0,053	0,105	0,272
0,9	0,053	0,105	0,279

Tabela A.2 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cones porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação.

- $\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)		
	$k_a$	$k_b$	$k_c$
1,17	0,090	0,221	0,444
1,17	0,091	0,217	0,443
1,17	0,091	0,216	0,439
0,98	0,070	0,171	0,308
0,98	0,070	0,175	0,303
0,98	0,071	0,175	0,307
0,78	0,053	0,132	0,249
0,78	0,052	0,134	0,244
0,78	0,055	0,135	0,247
0,59	0,039	0,096	0,179
0,59	0,038	0,094	0,181
0,59	0,038	0,095	0,180

A partir das Tabelas A.1 e A.2 os valores da constante  $\psi$  e da permeabilidade ( $k_m$ ) são apresentados na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Valores para  $\psi$  e  $k_m$  para os cilindros e cones porosos.

Equipamento	$\psi$ (m <sup>3</sup> .Pa <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	$k_m$ (m <sup>2</sup> )
HCiF-k <sub>1</sub>	6,82.10 <sup>-13</sup>	1,91.10 <sup>-16</sup>
HCiF-k <sub>2</sub>	1,11.10 <sup>-12</sup>	2,94.10 <sup>-16</sup>
HCiF-k <sub>3</sub>	3,08.10 <sup>-12</sup>	8,85.10 <sup>-16</sup>
HCoF-k <sub>a</sub>	7,43.10 <sup>-13</sup>	1,95.10 <sup>-16</sup>
HCoF-k <sub>b</sub>	1,82.10 <sup>-12</sup>	4,55.10 <sup>-16</sup>
HCoF-k <sub>c</sub>	3,47.10 <sup>-12</sup>	8,77.10 <sup>-16</sup>

## A.2 - Determinação da Porosidade dos Cilindros e Cones Permeáveis

Nesta seção é apresentada a metodologia que foi utilizada para a determinação das porosidades dos meios filtrantes utilizados no presente trabalho.

Segundo Darby (2001) a permeabilidade da matriz porosa está relacionada com o diâmetro de partícula e com a porosidade do meio filtrante de acordo com a Equação A.9.

$$k_m = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{180(1 - \varepsilon)^2} \quad (\text{A.9})$$

Assim, utilizando os valores de permeabilidade apresentados na seção anterior foi possível encontrar a porosidade dos cilindros e cone filtrantes estudados neste trabalho. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela A.4.

Tabela A.4 – Valores de porosidade dos cilindros e cones filtrantes após o processo de colmatação.

Equipamento	$\varepsilon$ (%)
HCiF-k <sub>1</sub>	5,91
HCiF-k <sub>2</sub>	6,78
HCiF-k <sub>3</sub>	9,59
HCoF-k <sub>a</sub>	5,95
HCoF-k <sub>b</sub>	7,79
HCoF-k <sub>c</sub>	9,56

## APÊNDICE B

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS HIDROCICLONES CONVENCIONAL E FILTRANTES

#### B.1 - HCon com diferentes diâmetros de *underflow*

Tabela B.1 – Resultados experimentais para o HCon com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)
0,9	212	7,75	1974	12036	65,06	62,12	9,01	9,61	1,00
1,2	242	7,63	2479	13726	69,62	67,11	8,93	9,51	1,00
1,5	269	7,44	2413	15265	70,33	67,94	8,76	9,32	1,00
1,8	294	7,33	2056	16680	70,94	68,64	8,62	9,16	1,00

Tabela B.2 – Resultados experimentais para o HCon com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)
0,9	216	19,05	1893	11492	71,97	65,37	7,79	9,32	1,07
1,2	249	18,90	1904	13231	72,52	66,11	7,20	8,66	1,07
1,5	277	18,85	1920	14733	72,56	66,19	6,83	8,25	1,07
1,8	303	18,76	1936	16070	73,24	67,06	6,81	8,24	1,07

Tabela B.3 – Resultados experimentais para o HCon com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)
0,9	236	36,94	1596	12150	82,28	71,89	5,71	8,63	1,05
1,2	267	36,41	1653	13786	82,72	72,83	5,09	7,98	1,05
1,5	295	36,33	1691	15240	83,33	73,82	4,73	7,42	1,05
1,8	321	36,23	1717	16566	83,72	74,47	4,27	6,86	1,05



**B.2 - HCiF-k<sub>1</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***Tabela B.4 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>1</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	225	10,22	1754	13490	69,16	65,65	9,94	10,74	1,04	0,075
1,2	258	10,33	1781	15461	66,06	62,15	9,95	10,77	1,04	0,091
1,5	287	10,21	1798	17202	67,69	64,02	9,91	10,73	1,04	0,116
1,8	314	10,24	1797	18851	68,28	64,66	9,48	10,30	1,04	0,151

Tabela B.5 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>1</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	232	20,38	1653	12420	72,50	65,46	8,40	9,97	1,02	0,081
1,2	265	20,23	1686	14201	74,03	67,45	8,33	9,80	1,02	0,107
1,5	295	20,11	1693	15846	75,28	69,05	8,08	9,61	1,02	0,133
1,8	324	20,04	1692	17365	76,75	70,92	7,63	9,12	1,02	0,158

Tabela B.6 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>1</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	244	35,36	1493	12843	82,69	73,22	5,66	8,20	0,95	0,053
1,2	279	35,22	1513	14732	82,84	73,51	5,60	8,15	0,95	0,077
1,5	311	35,05	1526	16402	85,39	77,50	5,12	7,52	0,95	0,098
1,8	340	34,56	1536	17907	86,13	78,80	4,73	7,01	0,95	0,127

**B.3 - HCiF-k<sub>2</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***Tabela B.7 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>2</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	207	8,74	2074	11650	66,17	62,93	9,05	9,70	1,01	0,084
1,2	237	8,82	2111	13335	68,17	65,09	8,89	9,56	1,01	0,105
1,5	263	8,90	2144	14792	69,05	66,02	8,54	9,20	1,01	0,129
1,8	289	8,95	2130	16256	70,01	67,06	8,13	8,78	1,01	0,153

Tabela B.8 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>2</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	211	19,39	1990	12809	70,78	63,75	7,37	8,84	1,01	0,083
1,2	242	19,05	2021	14678	73,34	67,07	6,25	7,57	1,01	0,113
1,5	269	18,78	2049	16298	74,06	68,07	6,16	7,47	1,01	0,144
1,8	295	18,88	2042	17884	74,97	69,14	5,67	6,92	1,01	0,162

Tabela B.9 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>2</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	225	38,99	1747	12561	81,21	69,21	5,11	7,98	1,08	0,104
1,2	259	39,01	1757	14460	82,15	70,73	5,06	7,96	1,08	0,134
1,5	289	38,38	1768	16118	83,05	72,50	5,03	7,77	1,08	0,161
1,8	318	38,38	1759	17703	84,66	75,11	5,01	7,74	1,08	0,190

#### B.4 - HCiF-k<sub>3</sub> com diferentes diâmetros de *underflow*

Tabela B.10 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>3</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	198	6,56	2276	11879	65,71	63,31	9,04	9,56	1,03	0,161
1,2	225	6,58	2345	13513	67,30	65,00	8,72	9,23	1,03	0,205
1,5	249	6,61	2378	15001	69,61	67,46	8,40	8,90	1,03	0,246
1,8	273	6,59	2390	16392	70,06	67,95	8,09	8,58	1,03	0,282

Tabela B.11 – Resultados experimentais para o HCiF-k<sub>3</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	202	18,42	2173	11001	72,69	66,52	6,90	8,25	1,03	0,148
1,2	230	18,33	2235	12525	72,73	66,61	6,33	7,64	1,03	0,189
1,5	256	18,44	2259	13929	73,03	66,93	6,24	7,55	1,03	0,229
1,8	280	18,11	2257	15266	73,13	67,18	6,17	7,45	1,03	0,274

Tabela B.12 – Resultados experimentais para o HClF-k<sub>3</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	218	35,12	1871	11223	85,65	77,88	7,97	10,95	1,04	0,273
1,2	246	35,05	1953	12684	86,50	79,22	7,58	10,55	1,04	0,369
1,5	270	35,24	2018	13952	87,93	81,36	6,97	9,84	1,04	0,456
1,8	293	34,67	2059	15130	87,99	81,61	6,75	9,70	1,04	0,534

**B.5 - HCoF-k<sub>a</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***Tabela B.13 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>a</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	247	12,33	1456	13205	65,32	60,44	10,27	11,21	1,05	0,068
1,2	284	12,16	1464	15205	68,13	63,72	10,28	11,18	1,05	0,098
1,5	318	11,92	1462	17009	68,79	64,57	9,71	10,61	1,05	0,112
1,8	348	12,12	1465	18617	69,53	65,33	9,54	10,46	1,05	0,132

Tabela B.14 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>a</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	251	24,57	1408	14561	74,54	66,25	7,20	8,96	1,01	0,075
1,2	288	24,62	1422	16735	75,75	67,83	6,89	8,60	1,01	0,094
1,5	322	24,56	1426	18682	76,12	68,34	6,71	8,41	1,01	0,117
1,8	354	24,63	1420	20509	77,16	69,69	6,68	8,39	1,01	0,131

Tabela B.15 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>a</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	287	38,37	1078	14505	82,78	72,06	6,19	9,09	1,06	0,038
1,2	337	38,83	1037	17071	86,28	77,57	5,98	8,87	1,06	0,053
1,5	375	38,28	1048	18987	87,39	79,57	5,79	8,62	1,06	0,070
1,8	409	39,03	1057	20717	89,32	82,47	5,53	8,29	1,06	0,090

**B.6 - HCoF-k<sub>b</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***Tabela B.16 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>b</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	221	9,59	1817	12891	68,06	64,67	8,97	9,67	1,03	0,107
1,2	253	9,72	1846	14768	68,39	64,98	8,38	9,08	1,03	0,141
1,5	280	9,76	1885	16339	68,43	65,02	8,29	8,98	1,03	0,164
1,8	310	9,78	1846	18086	69,96	66,71	8,11	8,81	1,03	0,194

Tabela B.17 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>b</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	226	21,23	1729	12268	71,99	64,44	7,95	9,56	1,02	0,099
1,2	261	21,09	1736	14140	73,27	66,12	7,64	9,18	1,02	0,128
1,5	290	21,13	1761	15695	73,54	66,45	7,18	8,72	1,02	0,152
1,8	318	20,65	1753	17234	73,60	66,72	7,08	8,53	1,02	0,182

Tabela B.18 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>b</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	238	38,44	1561	12657	87,79	80,17	4,83	7,39	1,02	0,095
1,2	274	38,27	1568	14578	87,87	80,35	4,51	7,04	1,02	0,133
1,5	306	37,87	1582	16230	88,37	81,28	3,95	6,22	1,02	0,173
1,8	335	38,40	1580	17787	88,50	81,33	3,38	5,57	1,02	0,217

**B.7 - HCoF-k<sub>c</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***Tabela B.19 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>c</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	212	8,08	1965	12327	66,09	63,11	9,39	10,06	1,02	0,202
1,2	243	8,08	2000	14111	67,75	64,92	8,98	9,63	1,02	0,261
1,5	270	7,98	2030	15658	68,66	65,94	8,39	9,02	1,02	0,303
1,8	295	7,92	2040	17110	68,74	66,05	8,39	9,02	1,02	0,353

Tabela B.20 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>c</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	216	20,20	1901	11583	72,63	65,71	8,06	9,50	1,02	0,218
1,2	248	19,83	1927	13285	73,56	67,02	7,89	9,40	1,02	0,289
1,5	275	19,60	1949	14770	75,09	69,02	7,62	9,12	1,02	0,338
1,8	303	19,50	1935	16236	75,38	69,42	7,21	8,59	1,02	0,399

Tabela B.21 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>c</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	233	37,04	1639	12229	83,67	74,06	4,84	7,36	0,99	0,179
1,2	267	36,35	1661	14025	84,10	75,02	4,68	7,06	0,99	0,246
1,5	292	36,47	1738	15331	84,96	76,32	4,30	6,57	0,99	0,305
1,8	316	36,34	1776	16612	86,93	79,47	4,23	6,48	0,99	0,440

**B.8 - HCoF-k<sub>1a</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***

Tabela B.22 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>1a</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	271	12,86	1206	14472	63,24	57,81	9,99	10,97	1,02	0,137
1,2	310	13,12	1227	16565	64,16	58,74	9,80	10,78	1,02	0,185
1,5	344	13,26	1249	18354	64,79	59,40	9,78	10,75	1,02	0,233
1,8	374	13,29	1264	19986	65,03	59,67	9,66	10,64	1,02	0,278

Tabela B.23 – Resultados experimentais para o HCoF-k<sub>1a</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	263	25,45	1285	16467	75,66	67,35	8,21	10,23	1,08	0,176
1,2	301	25,46	1306	18863	76,15	68,01	7,85	9,86	1,08	0,226
1,5	337	25,78	1307	21075	76,36	68,14	7,71	9,71	1,08	0,288
1,8	369	25,56	1304	23115	77,16	69,31	7,64	9,59	1,08	0,350

Tabela B.24 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>1a</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	275	41,69	1176	14992	83,05	70,94	5,66	8,51	1,05	0,168
1,2	317	41,86	1179	17293	83,37	71,40	5,33	8,15	1,05	0,215
1,5	354	41,60	1177	19349	83,65	72,00	5,13	7,84	1,05	0,267
1,8	388	42,27	1176	21203	84,22	72,67	5,10	7,95	1,05	0,320

**B.9 - HClCoF-k<sub>2b</sub> com diferentes diâmetros de underflow**

Tabela B.25 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>2b</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	221	12,47	1815	11231	66,14	61,31	9,26	10,29	1,01	0,199
1,2	255	12,44	1812	12978	67,47	62,85	9,10	10,12	1,01	0,268
1,5	285	12,49	1821	14475	69,45	65,09	8,75	9,76	1,01	0,311
1,8	313	12,52	1806	15922	69,85	65,54	8,44	9,43	1,01	0,372

Tabela B.26 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>2b</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	222	22,37	1793	12112	77,02	70,40	7,33	9,04	1,05	0,187
1,2	256	22,13	1807	13928	79,80	74,06	7,16	8,80	1,05	0,230
1,5	286	22,27	1810	15560	79,87	74,10	7,09	8,77	1,05	0,270
1,8	314	22,10	1794	17124	79,85	74,14	6,69	8,31	1,05	0,309

Tabela B.27 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>2b</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-ΔP$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$η$ (%)	$η'$ (%)	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	233	40,90	1636	12549	80,17	66,45	5,61	8,38	1,03	0,168
1,2	269	41,07	1627	14531	81,12	67,95	5,53	8,28	1,03	0,212
1,5	301	40,94	1631	16225	82,42	70,24	5,47	8,20	1,03	0,250
1,8	330	40,03	1626	17805	83,22	72,03	5,43	8,06	1,03	0,304

**B.10 - HClCoF-k<sub>3c</sub> com diferentes diâmetros de *underflow***Tabela B.28 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>3c</sub> com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	203	11,33	2153	11082	72,24	68,70	8,32	9,28	1,07	0,440
1,2	232	11,45	2205	12644	74,86	71,61	7,56	8,48	1,07	0,564
1,5	257	11,62	2239	14029	75,12	71,85	7,21	8,12	1,07	0,669
1,8	281	11,67	2240	15365	75,43	72,18	7,08	7,99	1,07	0,776

Tabela B.29 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>3c</sub> com  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	202	21,06	2173	11087	75,31	68,72	5,96	7,41	1,09	0,497
1,2	230	20,96	2233	12629	76,05	69,70	5,71	7,14	1,09	0,646
1,5	258	21,14	2222	14156	76,29	69,93	5,72	7,19	1,09	0,787
1,8	282	21,12	2229	15482	77,19	71,08	5,61	7,03	1,09	0,943

Tabela B.30 – Resultados experimentais para o HClCoF-k<sub>3c</sub> com  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,9	212	38,49	1978	11620	85,16	75,87	5,06	7,81	1,05	0,567
1,2	242	38,11	2018	13284	87,92	80,48	4,88	7,49	1,05	0,724
1,5	269	37,72	2044	14758	88,79	82,01	4,84	7,45	1,05	0,868
1,8	295	38,22	2039	16187	89,12	82,39	4,23	6,70	1,05	1,008

---

## APÊNDICE C

### CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROCICLONES CONVENCIONAL E FILTRANTES

---

#### C.1 - Equações de Projeto para os Hidrociclones Convencional e Filtrantes

Como foi visto no Capítulo 2, a abordagem empírica proposta por Massarani (1989) é muito utilizada em estudos de hidrociclones. Portanto, a fim de caracterizar os Hidrociclones Convencional e Filtrantes tal metodologia foi empregada para previsão de Diâmetro de Corte Reduzido ( $d'_{50}$ ) e Razão de Líquido ( $R_L$ ) a partir dessa abordagem clássica. Os resultados experimentais obtidos foram correlacionados de acordo com o modelo através de regressão não linear feita no *software* Statística®.

As Equações C.1 e C.2 apresentam as correlações para o Diâmetro de Corte Reduzido e Razão de Líquido, respectivamente, propostas por Massarani (1989), nas quais “ $K$ ”, “ $A$ ”, “ $a$ ” e “ $b$ ” são parâmetros que devem ser estimados experimentalmente.

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

$$R_L = a \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^b \quad (C.2)$$

Os parâmetros das Equações C.1 e C.2 são apresentados nas Tabelas C.1 e C.2.



Tabela C.1 – Parâmetros da Equação C.1 estimados estatisticamente.

Equipamento	K	$\delta_K$	A	$\delta_A$	R <sup>2</sup>
HCon	0,049	0,001	0,56	0,11	0,9395
HCiF-k <sub>1</sub>	0,063	0,002	1,42	0,24	0,9438
HCiF-k <sub>2</sub>	0,045	0,003	0,43	0,27	0,6857
HCiF-k <sub>3</sub>	0,038	0,002	-0,67	0,18	0,6214
HCoF-k <sub>a</sub>	0,061	0,004	0,74	0,36	0,699
HCoF-k <sub>b</sub>	0,054	0,003	1,18	0,31	0,9003
HCoF-k <sub>c</sub>	0,053	0,002	1,11	0,23	0,9271
HCiCoF-k <sub>1a</sub>	0,071	0,003	1,24	0,22	0,9192
HCiCoF-k <sub>2b</sub>	0,054	0,002	0,66	0,2	0,7839
HCiCoF-k <sub>3c</sub>	0,042	0,002	0,46	0,24	0,6807

Tabela C.2 – Parâmetros da Equação C.2 estimados estatisticamente.

Equipamento	A	$\delta_a$	b	$\delta_b$	R <sup>2</sup>
HCon	81,66	4,88	3,02	0,03	0,9997
HCiF-k <sub>1</sub>	27,24	1,08	2,43	0,02	0,9997
HCiF-k <sub>2</sub>	86,63	9,07	3,02	0,06	0,9989
HCiF-k <sub>3</sub>	88,95	10,71	3,09	0,06	0,9988
HCoF-k <sub>a</sub>	19,54	1,69	2,18	0,04	0,9984
HCoF-k <sub>b</sub>	46,73	1,49	2,68	0,02	0,9998
HCoF-k <sub>c</sub>	63,69	5,21	2,87	0,04	0,9993
HCiCoF-k <sub>1a</sub>	23,58	0,78	2,25	0,02	0,9997
HCiCoF-k <sub>2b</sub>	32,89	4,47	2,45	0,07	0,997
HCiCoF-k <sub>3c</sub>	30,91	3,35	2,45	0,06	0,9981

Os parâmetros contidos nas Tabelas C.1 e C.2 são úteis para prever a Eficiência Total dos hidrociclones frente a novas distribuições granulométricas caso este material particulado seja hidrociclonado.

## C.2 - Curvas de Eficiência dos Hidrociclones Convencional e Filtrantes

A fim de caracterizar as modalidades de hidrociclones estudadas foram levantadas curvas de Eficiência Total para outras distribuições granulométricas. O procedimento para a determinação das curvas de Eficiência Total está sistematizado a seguir:

- A Eficiência Granulométrica Reduzida ( $G'$ ) foi correlacionada com a razão do diâmetro de partícula em relação ao Diâmetro de Corte Reduzido, segundo a Equação C.3. Os parâmetros “ $N$ ” e “ $m$ ” da Equação C.3 foram estimados através de regressão não linear utilizando o *software* Statistica® a partir de dados experimentais.

$$G' = \frac{\left(\frac{d_p}{d'_{50}}\right)^m}{N + \left(\frac{d_p}{d'_{50}}\right)^m} \quad (\text{C.3})$$

- O diâmetro de determinada partícula ( $d_p$ ) pode ser posto em função da fração mássica cumulativa ( $X$ ) e dos parâmetros de distribuição granulométrica do modelo RRB (“ $d_{63,2}$ ” e “ $n$ ”), de acordo com a Equação C.4.

$$d_p = d_{63,2} \left[ \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (\text{C.4})$$

- Combinando as Equações C.3 e C.4 obteve-se a Equação C.5.

$$G' = \frac{\left\{ \frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \left[ \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^m}{N + \left\{ \frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \left[ \ln\left(\frac{1}{1-X}\right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^m} \quad (\text{C.5})$$

- A partir da Equação C.5 realizou-se a integração em “X” para o cálculo da Eficiência Total Reduzida, variando “n” e “ $d_{63,2}/d'_{50}$ ”, conforme a Equação C.6.

$$\eta' = \int_0^1 G' dX \quad (\text{C.6})$$

- Genericamente, para cada valor de  $d_{63,2}/d'_{50}$ , a Equação C.5 deve ser integrada de modo a se obter uma Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ ) correspondente. Conhecendo a Eficiência Total Reduzida, pode-se de imediato fazer o cálculo da Eficiência Total ( $\eta$ ), de acordo com a Equação C.7.

$$\eta = (1 - R_L)\eta' + R_L \quad (\text{C.7})$$

- Para cada “n”, plotou-se  $\eta$  contra  $d_{63,2}/d'_{50}$ , no mesmo gráfico.

As figuras com as curvas de Eficiência Total para os hidrociclones estudados são apresentados a seguir.

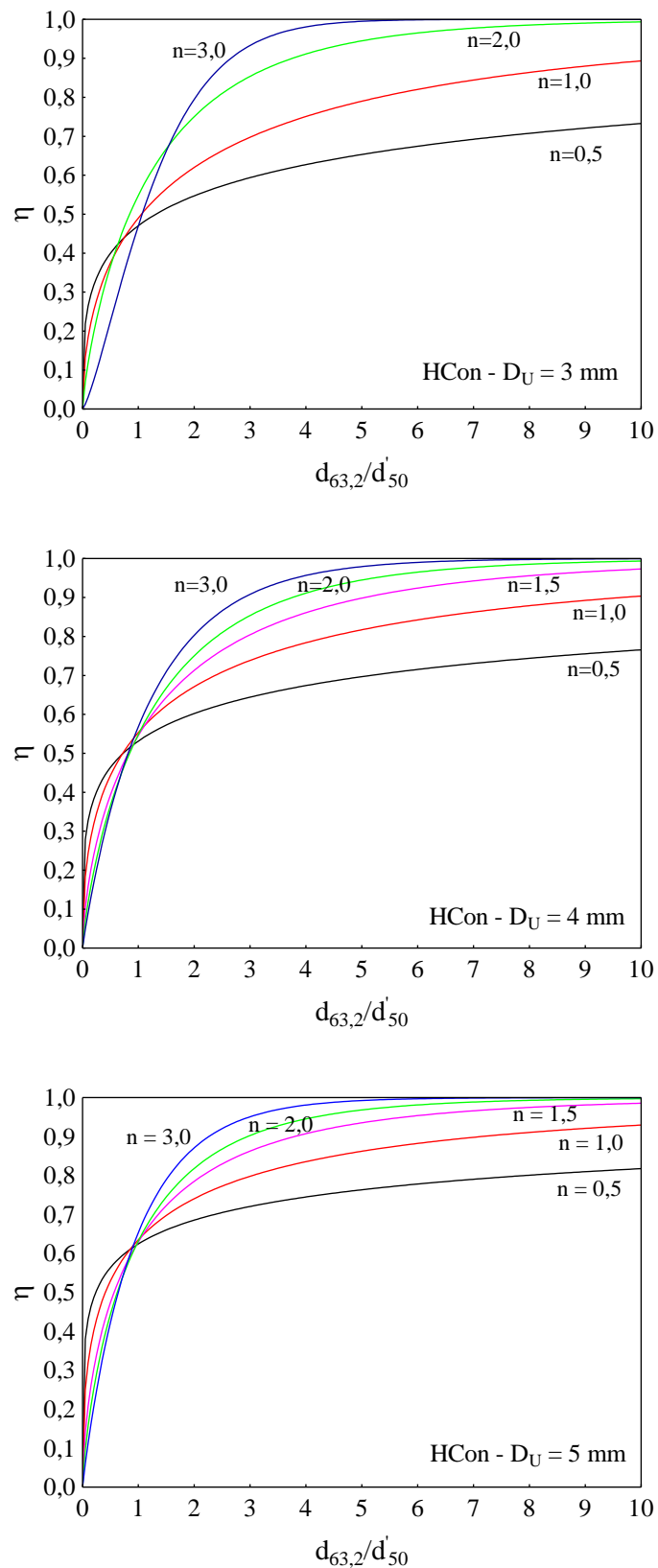


Figura C.1 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone Convencional para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

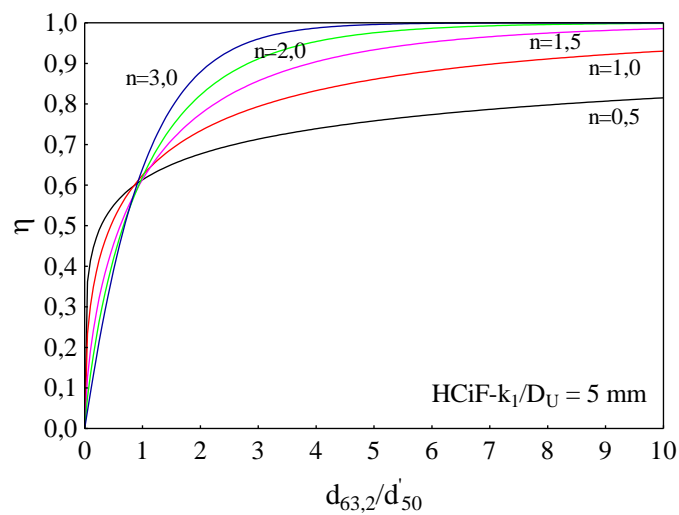
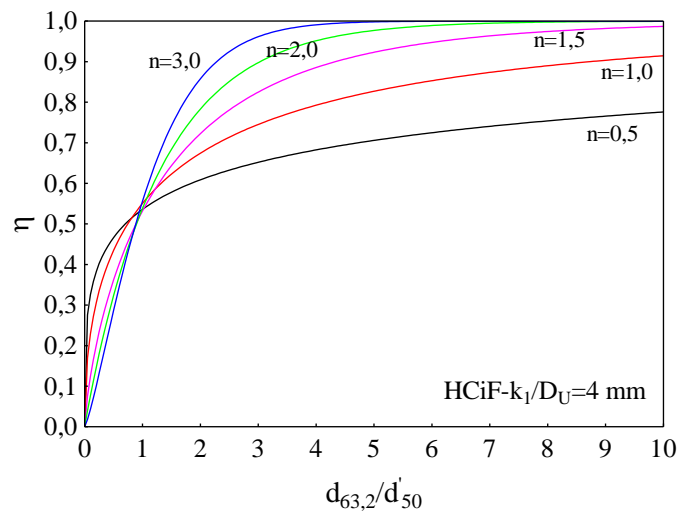
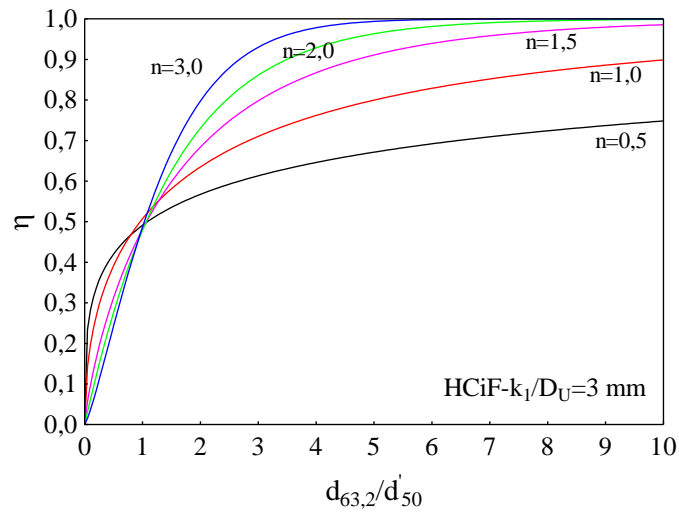


Figura C.2 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiF- $k_1$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

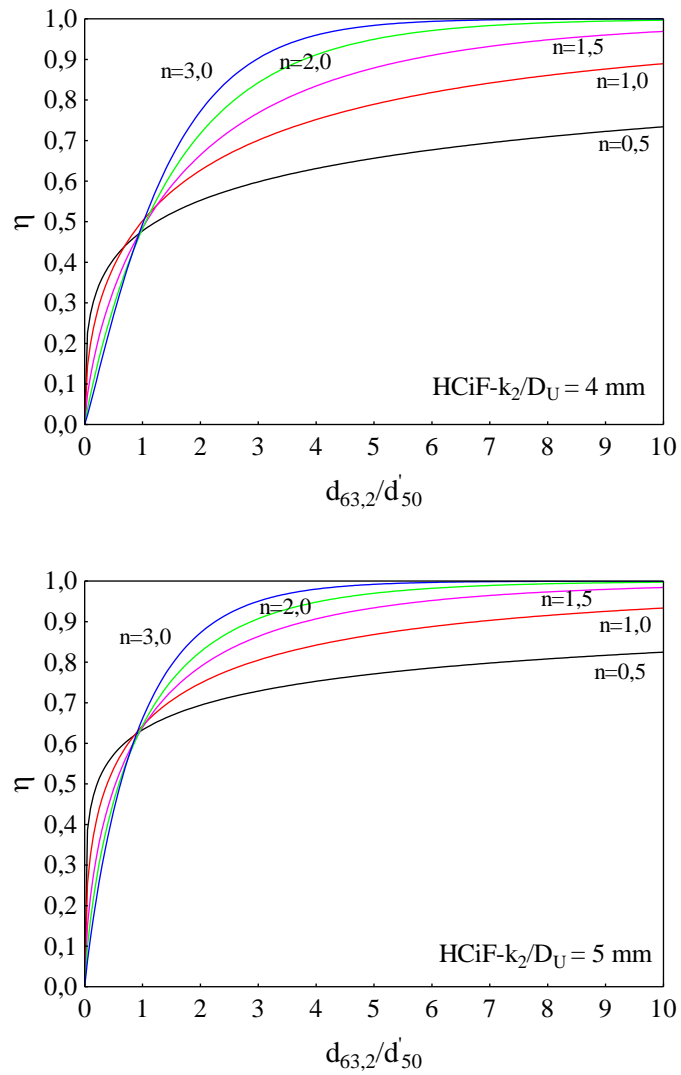


Figura C.3 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiF-k<sub>2</sub> para os diâmetros de *underflow* de 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

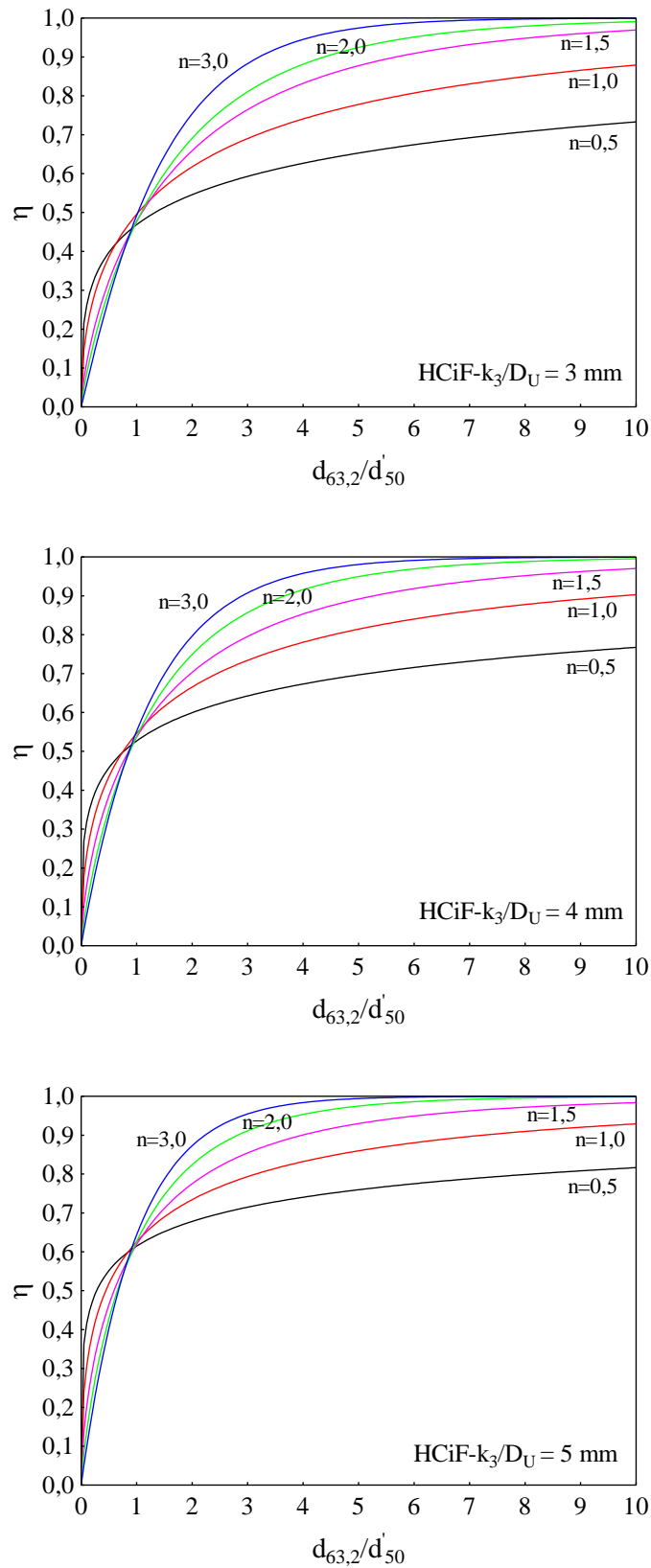


Figura C.4 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone  $HCiF-k_3$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

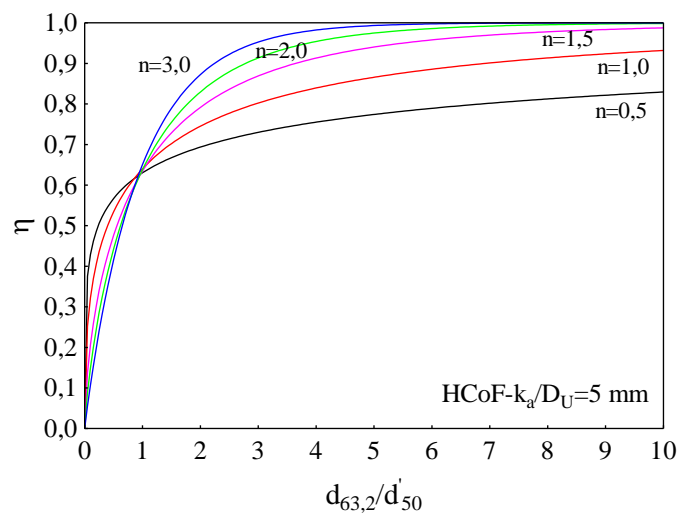
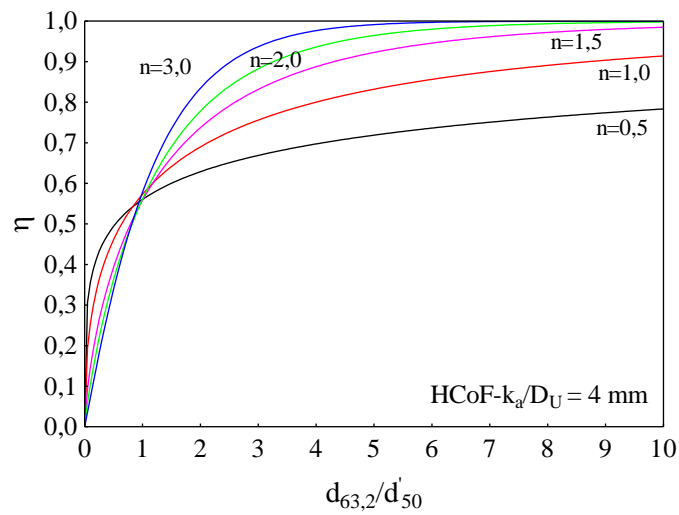
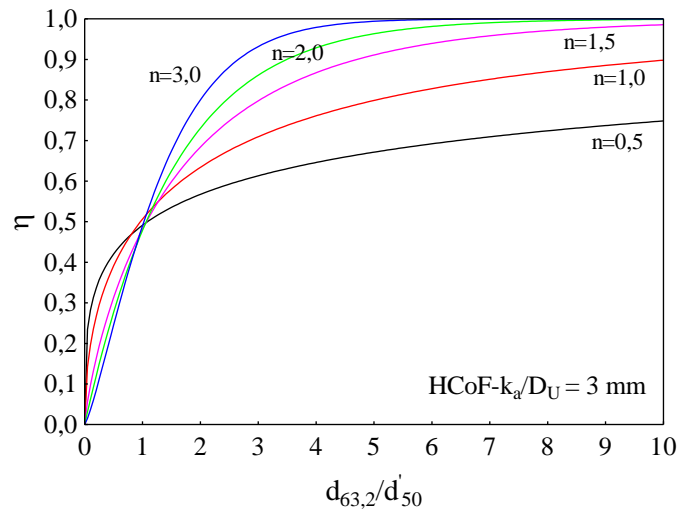


Figura C.5 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCoF- $k_a$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.



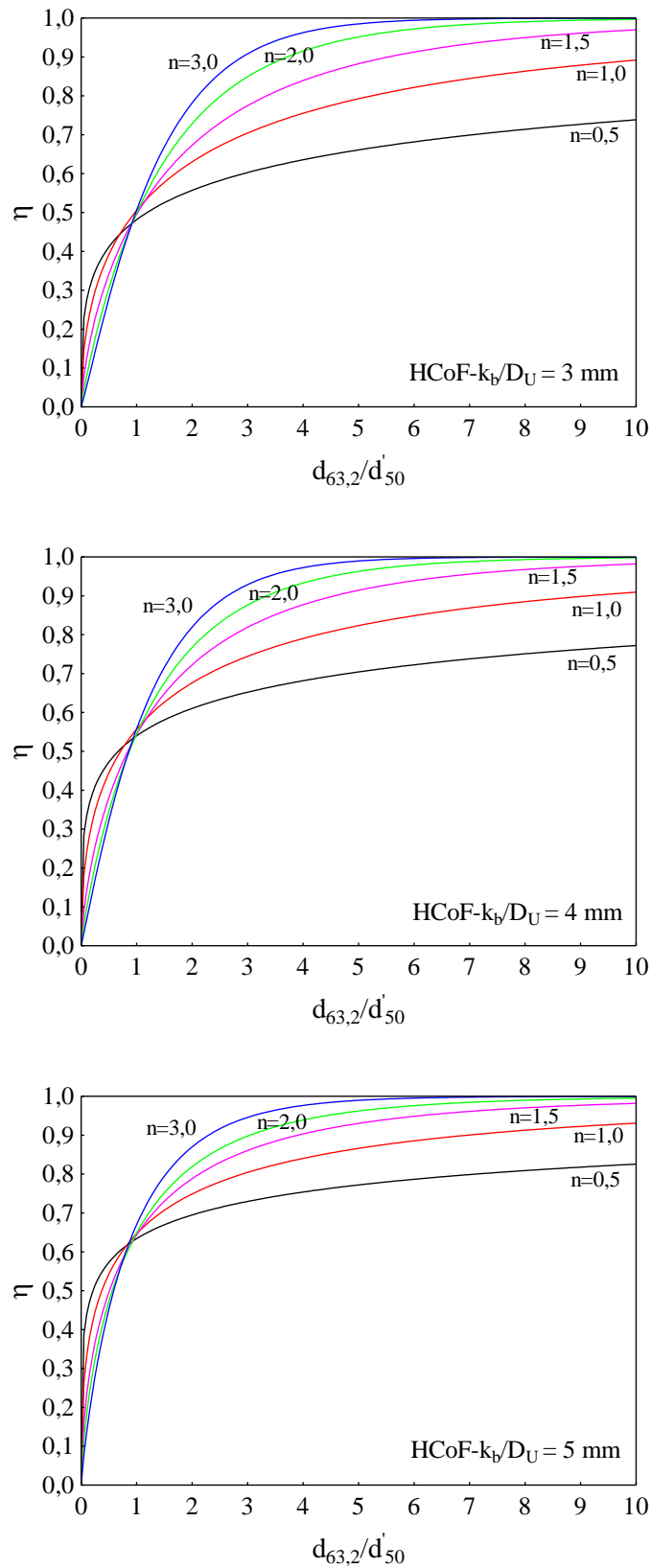


Figura C.6 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCoF- $k_b$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

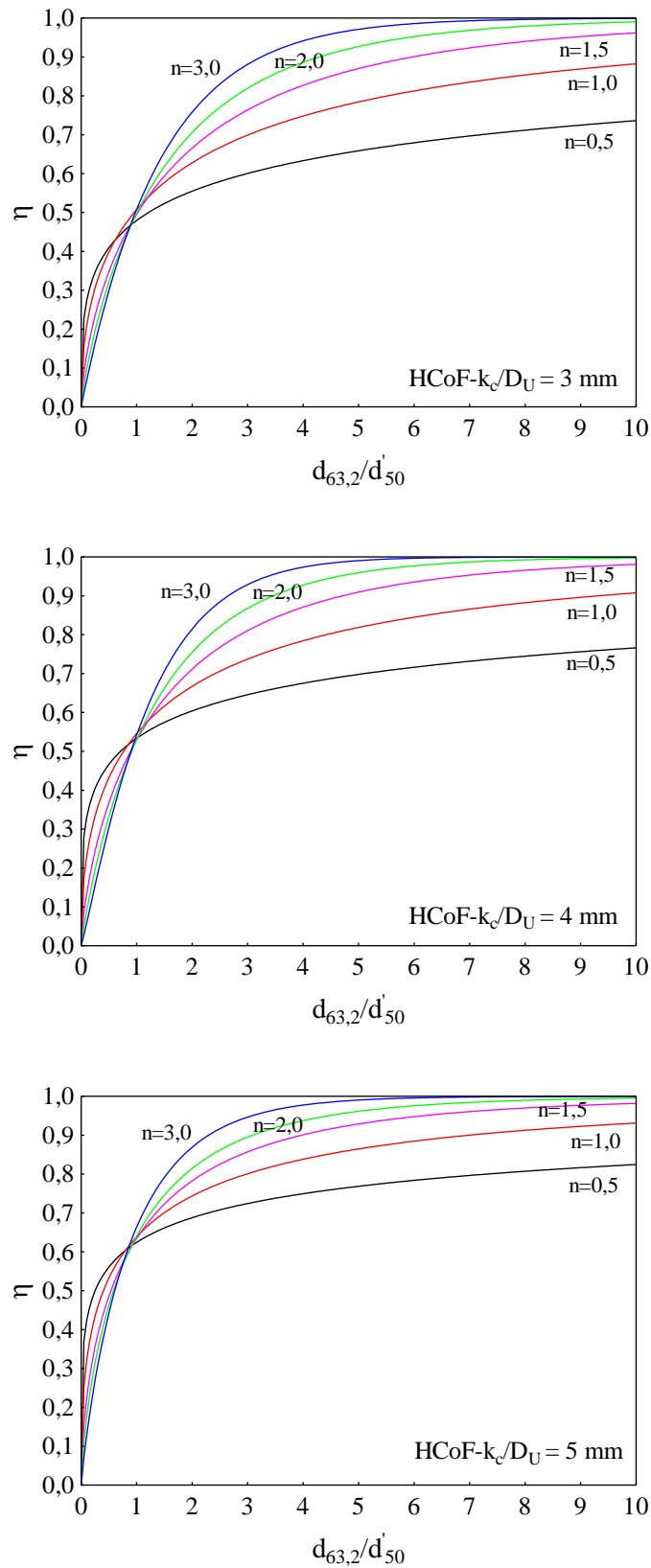


Figura C.7 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCoF- $k_c$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

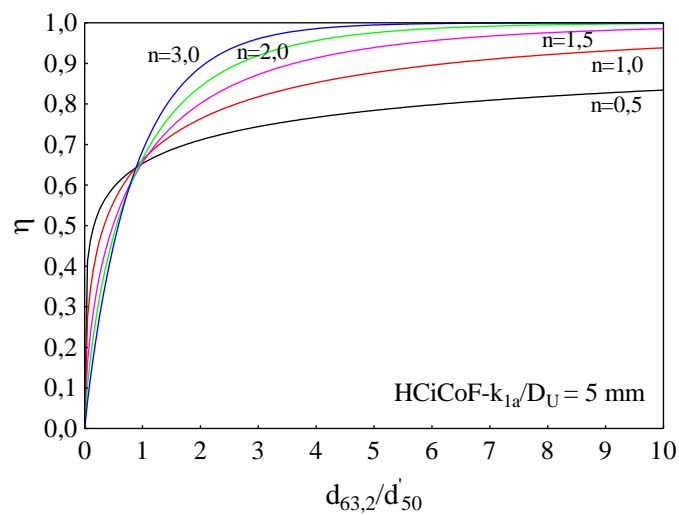
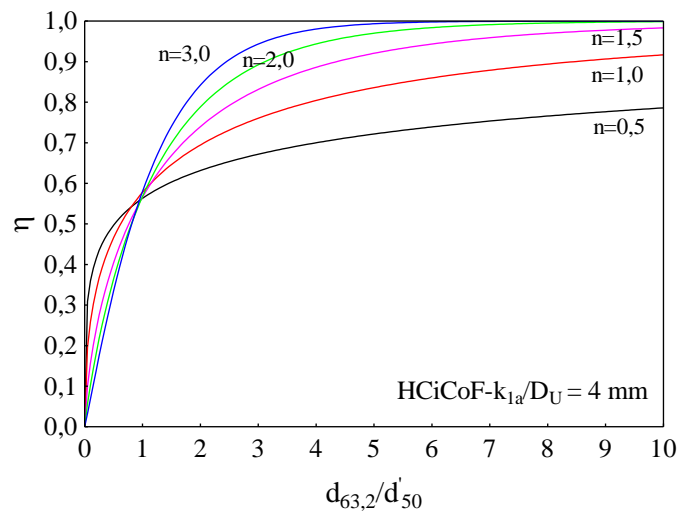
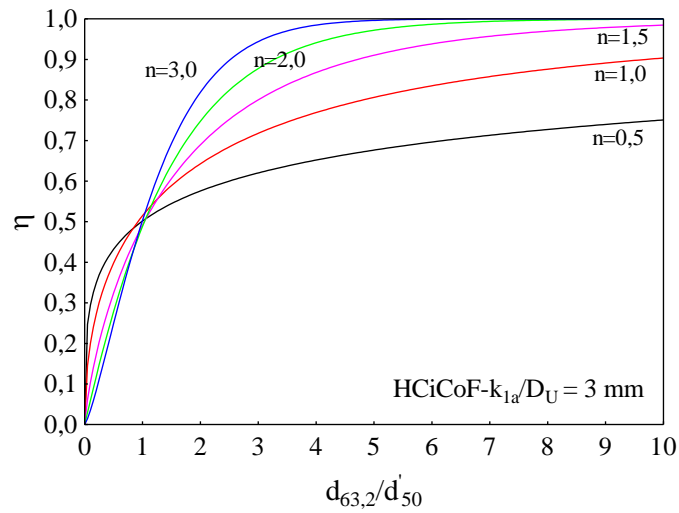


Figura C.8 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiCoF- $k_{1a}$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

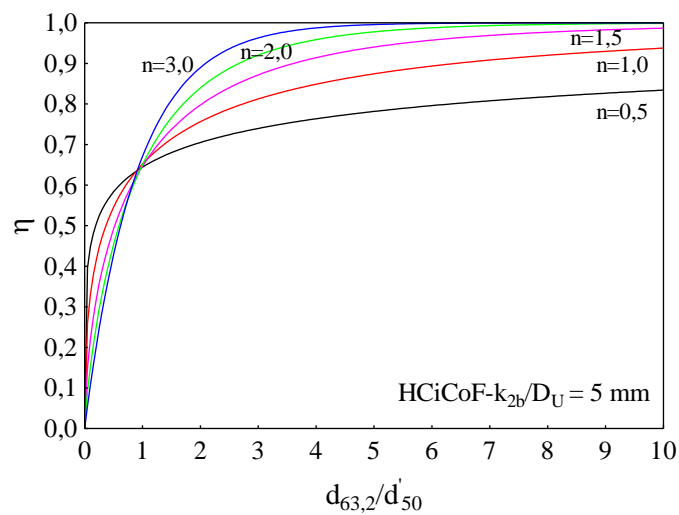
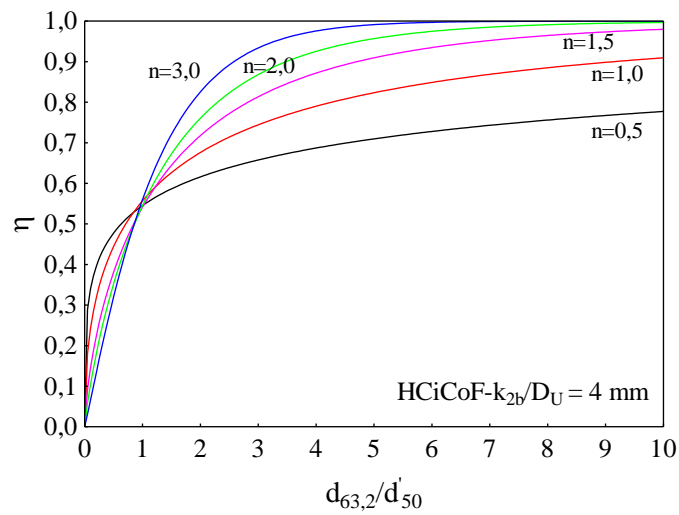
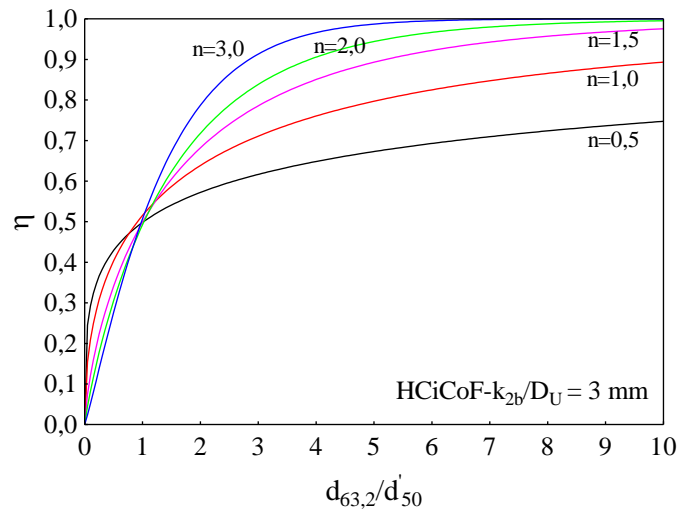


Figura C.9 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiCoF- $k_{2b}$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.

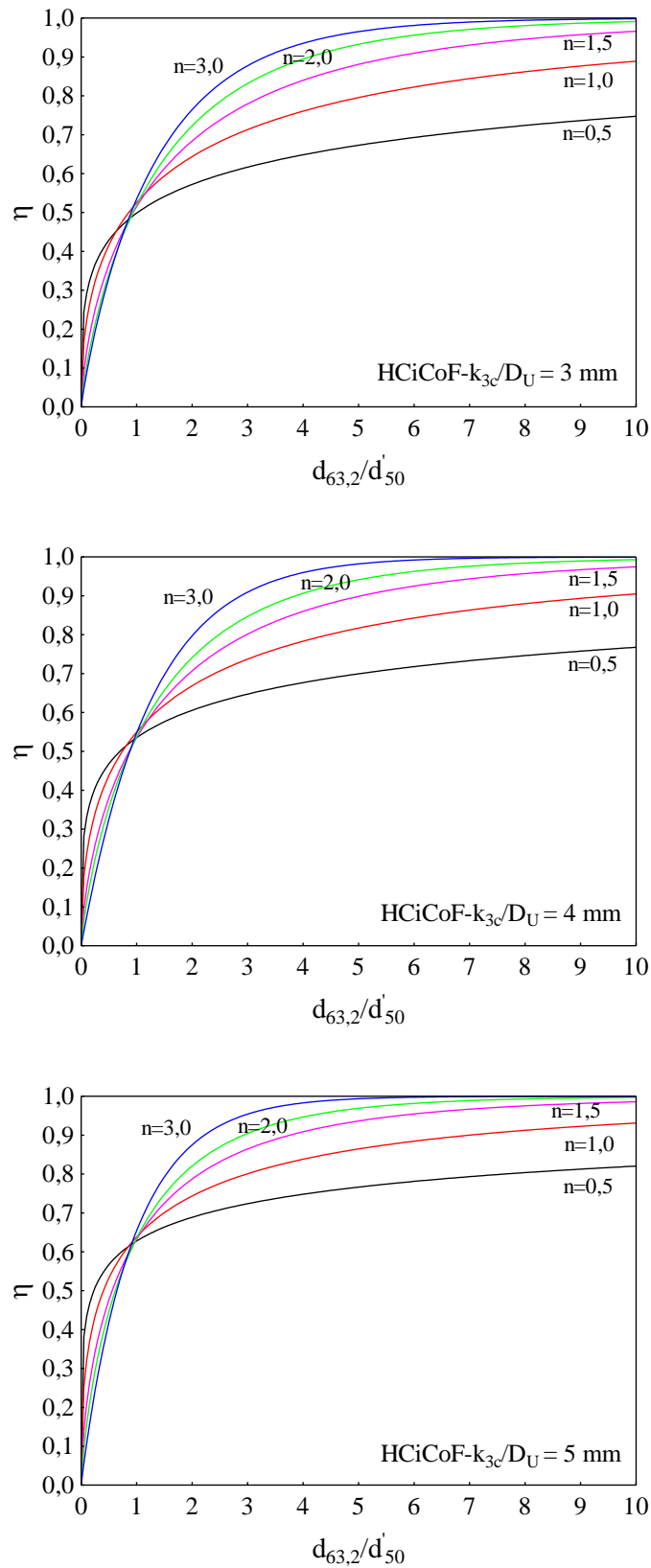


Figura C.10 – Curvas de Eficiência Total do Hidrociclone HCiCoF- $k_{3c}$  para os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm em função de diferentes distribuições granulométricas.