



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



**EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E DE VARIÁVEIS  
OPERACIONAIS NO DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE  
CONCENTRADOR**

**Suélen Mara Gonçalves**

**Uberlândia - MG**

**2016**



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



**EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E DE VARIÁVEIS  
OPERACIONAIS NO DESEMPENHO DE UM HIDROCICLONE  
CONCENTRADOR**

**Suélen Mara Gonçalves**

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira

Marcos Antonio de Souza Barrozo

Dissertação de mestrado apresentada 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, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Uberlândia - MG**

**2016**

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

---

G635e  
2016      Gonçalves, Suélen Mara, 1990-  
             Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais  
             no desempenho de um hidrociclone concentrador / Suélen Mara  
             Gonçalves. - 2016.  
             91 f. : il.

             Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.  
             Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
             Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
             Inclui bibliografia.

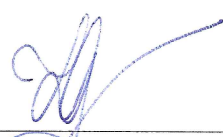
             1. Engenharia Química - Teses. 2. Separação (Tecnologia) - Teses.  
             3. Hidrociclone - Teses. 4. Processos químicos - Teses. I. Vieira, Luiz  
             Gustavo Martins, 1976-. II. Universidade Federal de Uberlândia,  
             Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

---

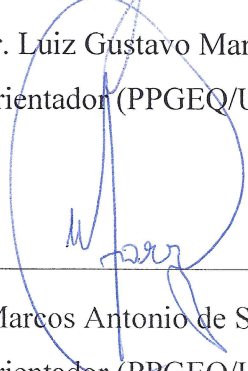
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 26 DE FEVEREIRO DE 2016.

BANCA EXAMINADORA:




---

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



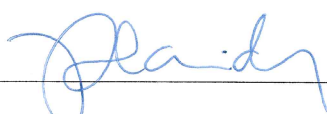
---

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



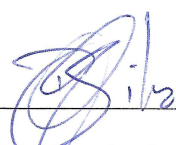
---

Profa. Dra. Isabele Cristina Bicalho  
(DEG/UFLA)



---

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde  
(PPGEQ/FEQUI)



---

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva  
(EAL/FEQUI)

*Dedico este trabalho aos meus pais e irmã.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder fé e me auxiliar em todos os momentos de minha vida. Por ser nosso refúgio, fortaleza e socorro bem presente.

Aos meus queridos pais pelo incentivo e dedicação, por estarem sempre ao meu lado dando todo suporte necessário à minha formação pessoal e profissional.

À minha irmã Tatiana, amiga e companheira de todas as horas, por quem eu tenho imenso carinho. Aos demais familiares que me apoiaram. Ao meu namorado pelo carinho, paciência e compreensão.

Aos meus orientadores, Luiz Gustavo Martins Vieira e Marcos Antonio de Souza Barrozo, não apenas pelos valiosos ensinamentos em hidrociclização e adequado direcionamento na formulação deste trabalho, mas por toda competência, gentileza e constante incentivo à pesquisa.

Às companheiras de pesquisa, Fernanda Falqueto Salvador e Yanne Novais Kyriakidis, por todo conhecimento compartilhado, disposição em ajudar e tirar dúvidas. Auxiliaram de maneira ímpar na execução dos experimentos e na preparação do material particulado. Ainda pela motivação constante e amizade construída ao longo desses dois anos.

Aos alunos de iniciação científica Maria Tereza Vidigal Souza e Victor César Ferreira Reis que colaboraram, sobremaneira, na coleta dados experimentais e estiveram sempre dispostos a ajudar e aprender frente as dificuldades.

Aos colegas de mestrado e amigos Marcela Vieira Caixeta Machado e Geraldo Daniel Ribeiro Nogueira, que além de compartilhar esse momento comigo, ajudaram-me por diversas vezes e tornaram a rotina de trabalho mais agradável. Aos demais amigos pelos momentos alegres e palavras de incentivo.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química que contribuíram de alguma forma para a concretização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade concedida e à CAPES pelo apoio financeiro.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	vi
RESUMO.....	ix
ABSTRACT .....	x
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos .....	4
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>6</b>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1. Configuração Geométrica .....	6
2.2. Condições Operacionais .....	8
2.3. Escoamento em Hidrociclones .....	9
2.4. Conceitos Fundamentais .....	12
2.5. Teoria Clássica de Separação .....	16
2.6. Histórico de Pesquisa – FEQUI/UFU .....	18
2.7. Trabalhos Correlatos .....	23
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>33</b>
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. Material Particulado .....	33
3.2. Unidade Experimental.....	35
3.3. Hidrociclones .....	37
3.4. Planejamento de Experimentos .....	38
3.5. Procedimento Experimental .....	39
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>42</b>
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
4.1. Desempenho do Hidrociclone Concentrador Otimizado .....	43
4.2. Estudo Comparativo entre HCO e HCOF .....	56
4.3. Comparação do Comportamento do HCO com a Família Rietema.....	61
4.4. Previsão de Desempenho do HCO .....	65
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>72</b>
5. CONCLUSÕES e SUGESTÕES .....	72
5.1. Conclusões .....	72
5.2. Sugestões.....	74

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>82</b>
Resultados Experimentais para o Hidrociclone Concentrador Otimizado .....	82
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>85</b>
Resultados Experimentais para o Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado .....	85
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>88</b>
Procedimento para construção das Curvas de Eficiência do HCO.....	88
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>90</b>
Resultados Experimentais dos Hidrociclones otimizados por Silva (2012) e Silva (2014) .	90
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>91</b>
Resultados Experimentais para o Hidrociclone Rietema (Vieira, 2006).....	91



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -Trajetória simplificada do fluido no interior de um hidrociclone (Adaptado: SVAROVSKY, 1984). .....	2
Figura 1.2 - Esquema do hidrociclone convencional (I) e filtrante (II) (Adaptado: SALVADOR, 2013). .....	3
Figura 2.1 - Principais dimensões de um hidrociclone (Adaptado: SILVA, 2014). .....	6
Figura 2.2 - Decomposição esquemática das velocidades: tangencial ( $v_{\theta}$ ), axial ( $v_a$ ) e radial ( $v_r$ ) (BERGSTRÖM, 2006). .....	9
Figura 2.3 - Representação esquemática do fluxo caótico e de curto-circuito. (Adaptado: SILVA, 2012) .....	10
Figura 2.4 – Diferentes configurações da alimentação: (O) original, (A) duas entradas com metade do diâmetro original, (B) duas entradas com diâmetro original, (C) quatro entradas com metade do diâmetro original (Adaptado: HWANG <i>et al.</i> , 2013). .....	24
Figura 2.5 – Diferentes modificações de entrada: (D) cone superior 30°, (E) cone superior 45°, (F) cone superior 60°, (G) caminho-guia 180°, (H) caminho-guia 270° (Adaptado: HWANG <i>et al.</i> , 2013). .....	24
Figura 2.6 – Diferentes formas de <i>vortex finder</i> : a) cone, b) tradicional cilíndrico, c) cone invertido, d) malha computacional usada para o caso tradicional (Adaptado: GHODRAT <i>et al.</i> , 2014a). .....	25
Figura 2.7 – Diferentes formas de seção cônica: a) côncava, b) tradicional, c) convexa (Adaptado: GHODRAT <i>et al.</i> , 2014b). .....	28
Figura 2.8 – Diagrama de um grupo de mini hidrociclones arranjados em paralelo: 1) mini hidrociclone; 2) saída de <i>overflow</i> ; 3) alimentação; 4) saída de <i>underflow</i> (Adaptado: HUANG <i>et al.</i> , 2013). .....	30
Figura 2.9 – Diagrama esquemático do arranjo de partículas (Adaptado: YANG <i>et al.</i> , 2013) .....	31
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica do quartzito moído. ....	34
Figura 3.2 – Unidade experimental (Adaptado: SALVADOR, 2013) .....	35
Figura 3.3 – Medidor de vazão tipo Coriolis – (I) sensor instalado na linha de alimentação e (II) totalizador com <i>display</i> de dados. (Adaptado: SALVADOR, 2013) .....	36
Figura 3.4 – (I) HCO, (II) HCOF. ....	38
Figura 3.5 – Dutos de <i>underflow</i> . (Adaptado: KYRIAKIDIS, 2014). .....	39

Figura 4.1 – Capacidade de processamento ( $Q$ ) do HCO em função do diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) e da queda de pressão ( $-\Delta P$ ). .....	43
Figura 4.2 – Capacidade de processamento ( $Q$ ) do HCO em função da concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ) e da queda de pressão ( $-\Delta P$ ). .....	44
Figura 4.3 – Número de Euler ( $Eu$ ) do HCO em função do diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ). .....	46
Figura 4.4 – Superfície de Resposta para o número de Euler do hidrociclone HCO. ....	47
Figura 4.5 – Eficiência Total ( $\eta$ ) do HCO em função do diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ). .....	48
Figura 4.6 – Superfície de Resposta para a Eficiência Total ( $\eta$ ) do hidrociclone HCO. ....	49
Figura 4.7 – Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do HCO em função do diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ). .....	50
Figura 4.8 - Superfície de Resposta para o Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do hidrociclone HCO. ....	51
Figura 4.9 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) do HCO em função do diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ). .....	52
Figura 4.10 – Superfície de Resposta para o Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do hidrociclone HCO. ....	53
Figura 4.11 – Concentração volumétrica da corrente de <i>underflow</i> ( $C_{VU}$ ) do HCO em função do diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ). .....	54
Figura 4.12 – Superfície de Resposta para a concentração volumétrica da corrente de <i>underflow</i> ( $C_{VU}$ ) do hidrociclone HCO. ....	55
Figura 4.13 – Número de Euler ( $Eu$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental .....	57
Figura 4.14 – Eficiência Total ( $\eta$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental. ....	57
Figura 4.15 – Diâmetro de Corte ( $d_{50}$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental. ....	58
Figura 4.16 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental. ....	58
Figura 4.17 – Concentração volumétrica do <i>underflow</i> ( $C_{VU}$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental. ....	59
Figura 4.18 – Capacidade de processamento ( $Q$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais. ....	62
Figura 4.19 – Número de Euler ( $Eu$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais. ....	62

Figura 4.20 – Eficiência Total ( $\eta$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais. ....	63
Figura 4.21 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais. ....	64
Figura 4.22 – Concentração volumétrica do <i>underflow</i> ( $C_{VU}$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais. ....	64
Figura 4.23 – Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 1,0%. ....	67
Figura 4.24 – Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 1,0%. ....	68
Figura 4.25 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 1,0%. ....	68
Figura 4.26 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 5,5%. ....	69
Figura 4.27 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 5,5%. ....	69
Figura 4.28 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 5,5%. ....	70
Figura 4.29 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 10,0% ....	70
Figura 4.30 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 10,0%. ....	71
Figura 4.31 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de <i>underflow</i> ( $D_U$ ) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 10,0%. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relações geométricas para algumas tradicionais famílias de hidrociclones (SVAROVSKY, 1984). .....	7
Tabela 3.1 – Dimensões geométricas do hidrociclone HFOT3 otimizadas por SILVA (2014) .....	37
Tabela 3.2 – Matriz de Planejamento para estudo dos efeitos de $C_{VA}$ e $D_U$ sobre o desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF .....	39
Tabela 4.1 – Resultados experimentais para as respostas número de Euler, eficiência total, diâmetro de corte, razão de líquido e concentração de sólidos no <i>underflow</i> para os hidrociclones HCO e HCOF a 1,0%v e $D_U = 5$ mm. ....	60
Tabela 4.2 – Parâmetros K, A e D da Equação 4.8 para o hidrociclone HCO, juntamente com seus desvios padrões .....	66
Tabela 4.3 – Parâmetros B e C da Equação 4.9 para o hidrociclone HCO, juntamente com seus desvios padrões .....	66
Tabela A.1 - Resultados experimentais para HCO para $D_U = 3$ mm e $C_{VA} = 1,0\%$ v. ....	82
Tabela A.2- Resultados experimentais para HCO para $D_U = 4$ mm e $C_{VA} = 1,0\%$ v. ....	82
Tabela A.3 - Resultados experimentais para HCO para $D_U = 5$ mm e $C_{VA} = 1,0\%$ v. ....	82
Tabela A.4 - Resultados experimentais para HCO com $D_U = 3$ mm e $C_{VA} = 5,5\%$ v.....	83
Tabela A.5 - Resultados experimentais para HCO com $D_U = 4$ mm e $C_{VA} = 5,5\%$ v.....	83
Tabela A.6 - Resultados experimentais para HCO com $D_U = 5$ mm e $C_{VA} = 5,5\%$ v.....	83
Tabela A.7 - Resultados experimentais para HCO com $D_U = 3$ mm e $C_{VA} = 10,0\%$ v.....	84
Tabela A.8 - Resultados experimentais para HCO com $D_U = 4$ mm e $C_{VA} = 10,0\%$ v.....	84
Tabela A.9 - Resultados experimentais para HCO com $D_U = 5$ mm e $C_{VA} = 10,0\%$ v .....	84
Tabela B.1 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 3$ mm e $C_{VA} = 1,0\%$ v. ....	85
Tabela B.2 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 4$ mm e $C_{VA} = 1,0\%$ v. ....	85
Tabela B.3 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 5$ mm e $C_{VA} = 1,0\%$ v. ....	85
Tabela B.4 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 3$ mm e $C_{VA} = 5,5\%$ v. ....	86
Tabela B.5 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 4$ mm e $C_{VA} = 5,5\%$ v. ....	86
Tabela B.6 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 5$ mm e $C_{VA} = 5,5\%$ v. ....	86
Tabela B.7 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 3$ mm e $C_{VA} = 10,0\%$ v. ....	87
Tabela B.8 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 4$ mm e $C_{VA} = 10,0\%$ v. ....	87
Tabela B.9 - Resultados experimentais para HCOF para $D_U = 5$ mm e $C_{VA} = 10,0\%$ v. ....	87

Tabela An1.1 - Resultados experimentais para os hidrociclones filtrantes otimizados por SILVA (2014) a 1,47 bar.....	90
Tabela An1.2 - Resultados experimentais para os hidrociclones convencionais otimizados por SILVA (2012) a 1,47 bar.....	90
Tabela An2.1 - Resultados experimentais para Rietema com $D_U = 3$ mm.....	91
Tabela An2.2 - Resultados experimentais para Rietema para $D_U = 4$ mm.....	91
Tabela An2.3 - Resultados experimentais para Rietema para $D_U = 5$ mm.....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$a$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$B$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$b$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$C$	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> , $[M^0L^1T^0]$
$D$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$D_C$	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_i$	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_o$	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, $[M^0L^0T^0]$
$G$	Eficiência granulométrica, $[M^0L^0T^0]$
$G'$	Eficiência granulométrica reduzida, $[M^0L^0T^0]$
$H$	Comprimento da seção cônica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$h$	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$K$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones, $[M^0L^0T^0]$
$k$	Permeabilidade do meio filtrante, $[M^0L^2T^0]$
$L$	Comprimento total do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$\ell$	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> , $[M^0L^0T^0]$
$p$	Probabilidade normal estatística, $[M^0L^0T^0]$
$Q_A$	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_i$	Vazão volumétrica de uma corrente genérica $i$ , $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_F$	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, $[M^0L^3T^{-1}]$
$R^2$	Variância, $[M^0L^0T^0]$
$R$	Coeficiente de correlação linear, $[M^0L^0T^0]$
$Re$	Número de Reynolds, $[M^0L^0T^0]$
$R_L$	Razão de líquido, $[M^0L^0T^0]$
$Stk_{50}$	Número de Stokes, $[M^0L^0T^0]$
$u_c$	Velocidade do fluido na seção cilíndrica, $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_a$	Componente de velocidade axial, $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_i$	Velocidade da partícula no duto de alimentação, $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_r$	Componente de velocidade radial, $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_\theta$	Componente de velocidade tangencial, $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_z$	Velocidade da partícula na direção axial, $[M^0L^1T^{-1}]$
$W_A$	Vazão mássica da corrente de alimentação, $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_i$	Vazão mássica de uma corrente genérica $i$ , $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_O$	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 cumulativa, $[M^0L^0T^0]$
$X_A$	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> , $[M^0L^0T^0]$

$X1$	Variável codificada concentração volumétrica de sólidos na alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$X2$	Variável codificada diâmetro de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Nível de significância, $[M^0L^0T^0]$
$-\Delta P$	Queda de pressão, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
$\varepsilon$	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 do fluido de trabalho, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_A$	Densidade da alimentação, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_i$	Densidade de uma corrente genérica $i$ , $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_O$	Densidade da corrente de <i>overflow</i> , $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_S$	Densidade real do sólido, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_U$	Densidade da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1L^{-3}T^0]$



## RESUMO

A hidrociclonagem é um processo de separação sólido-líquido ou líquido-líquido por ação da força centrífuga. Hidrociclones são equipamentos simples e de tamanho reduzido utilizados tanto na clarificação quanto no espessamento de correntes. Usados em diversos setores, como no petroquímico e de processamento mineral, acumulam vantagens como versatilidade e baixo custo de aquisição e manutenção. Todavia, a demanda por melhoria nos processos e redução de custos na indústria tem impulsionado diversos estudos de otimização de equipamentos. O hidrociclone filtrante é um equipamento não convencional desenvolvido na FEQUI/UFU com o objetivo de incrementar a eficiência de separação na hidrociclonagem. A proposta deste trabalho é estudar as condições operacionais de concentração da alimentação e diâmetro de *underflow* no desempenho de uma geometria filtrante otimizada para minimização de gastos energéticos. O efeito da filtração foi investigado através da comparação do desempenho do Hidrociclone Cônico-filtrante Otimizado (HCOF) com o Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) e da execução de testes estatísticos. Em virtude da semelhança de desempenho dos hidrociclones, foi constatado estatisticamente que a filtração não apresentou efeito significativo no desempenho do HCOF. Verificou-se que, nesta geometria, o decréscimo da variável diâmetro de *underflow* foi extremamente favorável à operação de espessamento. A concentração da suspensão de quartzito a 1,0% de sólidos em volume foi majorada em 42 vezes ao utilizar o diâmetro de *underflow* de 3 mm. O acréscimo no percentual de sólidos na alimentação foi benéfico para o consumo energético, de modo que o mínimo número de Euler de 730 foi alcançado para  $C_{VA} = 10,0\%$  em volume, entretanto, quanto maior a quantidade de sólidos em suspensão menor foi a eficiência do equipamento. Portanto, para minimizar a razão de líquido e manter o patamar de alta eficiência, é indicado trabalhar com suspensão diluída ( $C_{VA} = 1,0\%$ ) e diâmetro de *underflow* de 3 mm ( $\eta = 67\%$ ). Entretanto, se for necessário trabalhar com alimentação mais concentrada, o uso do diâmetro de *underflow* de 5 mm contribui para o aumento da eficiência. O HCO foi comparado à tradicional família de hidrociclones concentradores Rietema e apresentou vantagens em relação à eficiência, 34% maior, e ao gasto energético, 20% menor, em média. Por fim, as curvas de eficiência e as Equações de Projeto puderam ser devidamente levantadas para o HCO, todas com ajuste satisfatório.

Palavras-chave: hidrociclonagem, diâmetro de *underflow*, filtração, equação de projeto.

## ***ABSTRACT***

The hydrocycloning operation has a goal to separate solid-liquid suspensions and liquid-liquid emulsions through the centrifugal force action. Hydrocyclones are equipment with reduced size and used in both clarification and thickening. This device is used in many areas, like petrochemical and minerals process, and accumulate advantages like versatility and low cost of maintenance. However, the demand to improve the process and to reduce the costs has motivated several studies of equipment optimization. The filtering hydrocyclone is a non-conventional equipment developed at FEQUI/UFU with objective to improve the hydrocycloning separation efficiency. The purpose of this study is to evaluate the operating conditions of feed concentration and underflow diameter on the performance of a filtering geometry optimized to minimization of energy costs. The filtration effect was investigated through the comparison between the performance of the Optimized Filtering Hydrocyclone (HCOF) and the Optimized Concentrator Hydrocyclone (HCO). Because of the resemblance of hydrocyclones performance, the filtration did not represent significant effect on the performance of the HCOF. It was found that in this geometry the decrease of the variable underflow diameter was very favorable to thickening operation. The suspension concentration of quartzite at 1.0% of solids in volume was increased about 42 times when the 3 mm underflow diameter was used. The increase on the feed solid percentage was good for decreasing the energy spent, so that a minimum number of Euler of 730 was achieved at  $C_{VA} = 10.0\%v$ . However, a greater amount of solids in suspension leads to a lower efficiency of the equipment. Therefore, to minimize the underflow-to-throughput ratio and keep a high efficiency level, it is indicated to work with dilute suspension ( $C_{VA} = 1.0\%$ ) and 3 mm underflow diameter ( $\eta = 67\%$ ). But if it is necessary to work with high feed concentration, the use of 5 mm underflow diameter provides a rise in the efficiency. The HCO hydrocyclone was compared to the traditional family of hydrocyclones Rietema and presented advantages like higher efficiency (34% higher in average) and lower energy costs (20% lower in average). Finally, the efficiency curves and project equation have been raised for the HCO hydrocyclone each with satisfactory adjust.

Key words: hydrocycloning, underflow diameter, filtration, project equation

### 1. INTRODUÇÃO

Hidrociclones são separadores centrífugos de ampla aplicação industrial. Podem ser utilizados tanto na separação de suspensões sólido-líquido quanto nas emulsões líquido-líquido. No setor petroquímico seu uso é frequente no tratamento de fluidos de perfuração e na separação de óleo/água; na indústria de processamento mineral são empregados na eliminação de finos (deslamagem) e na pré-concentração (espessamento) de minérios. Além disso, podem ser usados na recuperação de sólidos em efluentes e na limpeza de águas de reprocesso em diversos segmentos industriais, dentre diversas outras aplicações.

Assim, por diferença de tamanho de partículas, os hidrociclones podem ser usados na separação sólido-sólido, de maneira que, os sólidos alimentados são divididos em duas frações, uma fina e outra de maior granulometria. Funcionam como classificadores no aprimoramento do desempenho de outros separadores, na remoção de partículas grossas em operações de refino e na remoção de partículas finas em operações de limpeza (SVAROVSKY, 2000). Em suma, são flexíveis quanto ao objetivo de separação, podem clarificar ou concentrar correntes a depender de suas dimensões geométricas, e ainda separam de forma eficiente partículas com tamanho entre 5 e 400  $\mu\text{m}$  (VIEIRA, 2006).

Em comparação a outros separadores, como centrífugas e sedimentadores, os hidrociclones possuem tamanho reduzido que confere às partículas um baixo tempo de residência, além de ocupar um menor espaço numa planta industrial. A ausência de partes móveis também é uma vantagem que, combinada com as outras características do equipamento, garante simplicidade operacional e baixo custo de manutenção e aquisição aos hidrociclones (SVAROVSKY, 2000).

De forma sucinta, o hidrociclone convencional consiste em um cilindro acoplado a um tronco de cone. São manufaturados de material impermeável e apresentam uma alimentação e duas saídas de fluido, *underflow* e *overflow*. A parte cilíndrica é responsável pela capacidade de processamento do equipamento enquanto a parte cônica pela eficiência de separação do mesmo (SILVA, 2014; RICHARDSON E HARKER, 2002). Comumente o diâmetro da parte cilíndrica varia entre 10 mm e 2,5 m (SVAROVSKY, 2000), entretanto, equipamentos com diâmetro inferior a 10 milímetros são utilizados para aprimoramento da separação de partículas

finas e leves em um líquido viscoso (PETTY e PARKS, 2004; WENGELER *et al.*, 2006; ZHU *et al.*, 2010, ZHU *et al.*, 2012; HUANG *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2013).

Os hidrociclones são caracterizados através de suas relações geométricas. A partir da relação entre determinada dimensão e o diâmetro da parte cilíndrica, pode-se definir uma família de hidrociclones. Uma família de hidrociclones possui proporções geométricas definidas, de forma que a escolha delas determina o objetivo da operação (VIEIRA, 2006). Existem famílias que apresentam baixo gasto energético, outras alcançam alta eficiência, destinadas à classificação ou à concentração de sólidos. Rietema, Bradley, Krebs e Demco II são exemplos de tradicionais famílias de hidrociclones.

A alimentação, dotada de energia de pressão, é injetada tangencialmente na parte superior cilíndrica do equipamento. Em função da força centrífuga gerada, é formado um movimento espiral descendente de forma que as partículas maiores e de maior densidade aproximam-se da parede e são coletadas no orifício de *underflow*. Um outro vórtice central de movimento ascendente é formado e arrasta as partículas menores e menos densas para o duto de *overflow*.

O movimento do fluido dentro do hidrociclone pode ser visualizado através da Figura 1.1.

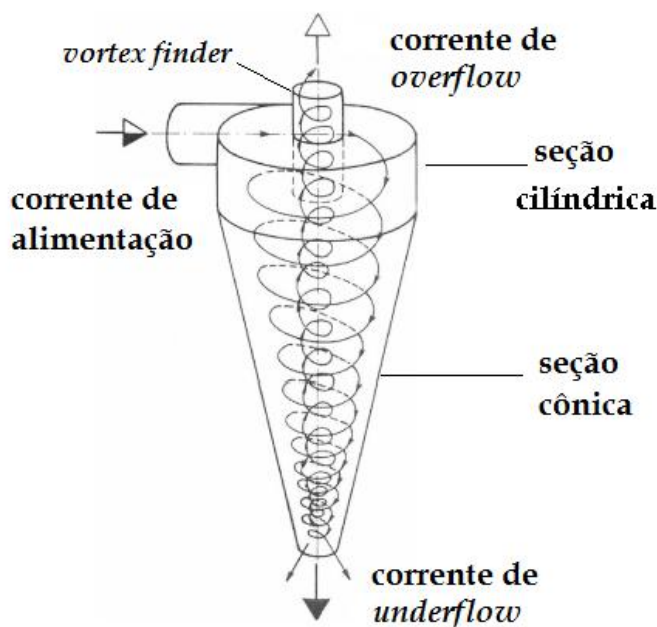


Figura 1.1 -Trajetória simplificada do fluido no interior de um hidrociclone (Adaptado: SVAROVSKY, 1984).

DAMASCENO e MASSARANI (1986), com o objetivo de unir as operações unitárias de filtração e hidrociclonagem, propuseram a incorporação de uma parede filtrante em um hidrociclone de tradicional família. Foi então concebida a configuração não-convencional, constituída de parede cônica porosa, denominada de Hidrociclone Filtrante (HENRIQUE *et al.*, 1987). Posteriormente, este novo separador foi objeto de patente pleiteado por docentes da Faculdade de Engenharia Química da UFU (Patente de Invenção número - INPI: PI 0701118-0).

Os primeiros experimentos com a modalidade filtrante foram conduzidos por LANNA *et al.* (1992) na geometria Bradley e, logo em seguida, diversos foram os estudos com Hidrociclones Filtrantes pelos pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da UFU. Para a geometria Bradley, a inserção do tronco de cone poroso contribuiu para a capacidade de processamento e para concentração de sólidos na corrente de *underflow* em determinada geometria (LANNA *et al.*, 1992), enquanto para a geometria Rietema, houve aumento na eficiência de coleta comparado à geometria convencional (VIEIRA, 2001). É certo que o movimento do fluido no interior do equipamento foi modificado. Logo, ocorrem alterações nos perfis de velocidade axial e tangencial do fluido que puderam alterar o desempenho do separador.

A Figura 1.2 ilustra as entradas e saídas de fluido para hidrociclones na modalidade convencional e cônico-filtrante. Observa-se que o Hidrociclone Filtrante apresenta, além das vazões volumétricas de alimentação ( $Q_A$ ), *underflow* ( $Q_U$ ) e *overflow* ( $Q_O$ ), uma corrente extra de filtrado ( $Q_F$ ) que flui pela parede cônica permeável durante o processo de hidrociclonagem.

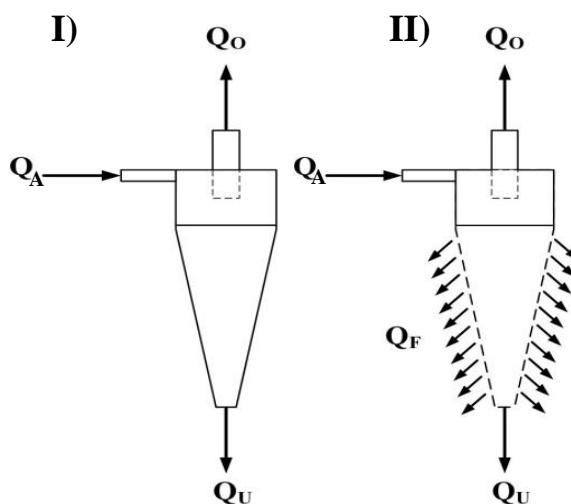


Figura 1.2 - Esquema do hidrociclone convencional (I) e filtrante (II) (Adaptado: SALVADOR, 2013).

VIEIRA (2006) iniciou um estudo de otimização da hidrociclonagem através da construção de 25 diferentes configurações de hidrociclones, tanto na modalidade cônico-filtrante quanto na convencional. Concluiu que a geometria do equipamento deve ser escolhida a depender da demanda industrial. Neste estudo, não se empregou uma técnica específica de otimização para eleger a melhor geometria, em termos de separação de partículas.

O trabalho de VIEIRA (2006) inspirou outros estudos de otimização, usando técnicas específicas de otimização, como o algoritmo de Evolução Diferencial e Superfícies de Resposta. SILVA (2012) e KYRIAKIDIS (2014) estudaram a otimização de hidrociclones convencionais e posteriormente SILVA (2014) estudou a otimização de hidrociclone filtrantes.

Uma das geometrias otimizadas por SILVA (2014), planejada para proporcionar alta capacidade de operação, ou seja, baixo gasto energético, apresentou também características de um equipamento concentrador. Além de trabalhar com altas vazões, este equipamento apresentou alta eficiência, o que despertou o interesse de estudo dessa configuração chamada de HFOT3.

## 1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho foi dar continuidade aos promissores estudos com hidrociclones realizados por SILVA (2014), a fim de potencializar o desempenho do hidrociclone filtrante otimizado de característica concentradora denominado de HFOT3. Por se tratar de uma geometria concentradora, o efeito da concentração de sólidos da suspensão alimentada foi alvo de investigação. Os efeitos da filtração e da variável operacional diâmetro de *underflow* também foram objeto de pesquisa.

No presente estudo, a geometria cônico-filtrante (HFOT3) será denominada simplesmente de HCOF (Hidrociclone Cônico-filtrante Otimizado), enquanto a configuração de parede totalmente impermeável, mas de mesma dimensão geométrica, será chamada simplesmente de HCO (Hidrociclone Concentrador Otimizado).

Assim, com o objetivo de continuar os trabalhos efetuados com hidrociclones filtrantes e convencionais, o presente estudo tem como objetivos específicos:

- Dar continuidade aos estudos com a geometria do hidrociclone HFOT3, concebido e preliminarmente estudado por SILVA (2014);
- Estudar os efeitos lineares, quadráticos e de interação dos fatores: (I) diâmetro do orifício de *underflow* e (II) concentração de material particulado sobre o desempenho

do hidrociclone HFOT3 na modalidade convencional (HCO), mediante a manipulação dos efeitos anteriores na faixa de 1,0 a 10,0% para a concentração volumétrica e de 3 a 5 mm para o diâmetro de *underflow*;

- Comparar o desempenho do HFOT3 na modalidade convencional (HCO) com a mesma geometria na modalidade filtrante (HCOF) frente a alteração dos fatores mencionados anteriormente;
- Comparar o desempenho do hidrociclone HFOT3 na configuração convencional (HCO) com uma família clássica de hidrociclones concentradores – Rietema.
- Levantar a equação de projeto do hidrociclone HFOT3 na configuração convencional (HCO) e suas respectivas curvas de eficiência;
- Apresentar, ao final, qual a condição operacional de hidrociclone mais viável tecnicamente, a fim de que se possa, na sequência deste trabalho, fazer a transferência de tecnologia para o setor industrial.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados conceitos importantes relacionados à geometria de hidrociclones, uma discussão sobre efeitos do escoamento de fluidos no interior do equipamento e teorias clássicas sobre a separação de partículas. Deste modo, as variáveis que quantificam o gasto energético e separação de partículas no processo de hidrociclonação são apresentadas. Um breve histórico sobre os estudos conduzidos na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia também está exposto juntamente com os atuais trabalhos desenvolvidos nesta área.

#### 2.1. CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA

As principais dimensões de um hidrociclone são: diâmetro da parte cilíndrica ( $D_c$ ), diâmetro da alimentação ( $D_i$ ), diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ), diâmetro de *underflow* ( $D_u$ ), comprimento da parte cilíndrica ( $h$ ), comprimento do tronco de cone ( $H$ ), comprimento total ( $L$ ), comprimento de *vortex finder* ( $\ell$ ) e o ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ). A Figura 2.1 ilustra a geometria convencional de um hidrociclone com suas dimensões características.

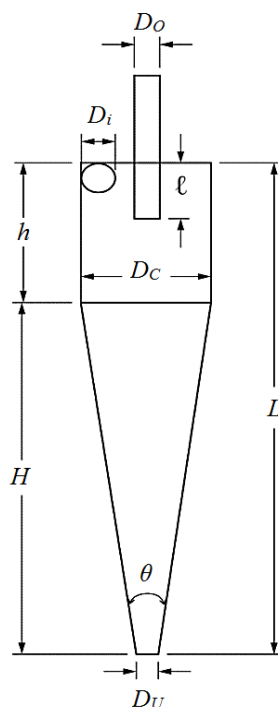


Figura 2.1 - Principais dimensões de um hidrociclone (Adaptado: SILVA, 2014).



Sabe-se que os hidrociclones são agrupados em famílias. Uma determinada família de hidrociclones tem razão fixa das principais dimensões geométricas pelo diâmetro da parte cilíndrica (VIEIRA, 2006). Ou seja, a combinação das relações geométricas  $D_i/D_c$ ,  $D_o/D_c$ ,  $\ell/D_c$ ,  $L/D_c$ , e o ângulo do tronco de cone  $\theta$ , especifica uma família de hidrociclones, que por sua vez possui características distintas. A Tabela 2.1 apresenta algumas das tradicionais famílias de hidrociclones com suas relações geométricas.

Tabela 2.1 - Relações geométricas para algumas tradicionais famílias de hidrociclones (SVAROVSKY, 1984).

Família de Hidrociclone	Proporções Geométricas				
	$D_i/D_c$	$D_o/D_c$	$D_U/D_c$	$L/D_c$	$\theta$
Bradley	0,133	0,200	0,330	6,85	9°
Demco	0,217	0,500	1,000	4,70	25°
Demco	0,244	0,313	0,833	3,90	20°
Hi-Klone	0,175	0,250	0,920	5,60	10°
Hi-Klone	0,150	0,200	0,800	5,40	10°
Mozley	0,154	0,214	0,570	7,43	6°
Mozley	0,160	0,250	0,570	7,71	6°
Mozley	0,197	0,320	0,570	7,71	6°
Rietema	0,280	0,340	0,400	5,00	20°
RW 2515	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
Warman	0,290	0,200	0,310	4,00	15°

A escolha da geometria do equipamento depende do objetivo da operação de hidrociclonagem. (VIEIRA, 2006). A alteração de suas proporções geométricas influencia na capacidade e no poder de classificação do hidrociclone. De acordo com SVAROVSKY (2000), grandezas que conferem resistência ao escoamento aumentam a eficiência. A diminuição do orifício de alimentação estabelece resistência ao escoamento diminuindo sua capacidade, entretanto a recuperação de partículas se torna maior devido a maior velocidade de alimentação. Equipamentos com ângulo menor que 25°, propiciam melhor separação de partículas finas, como solicitado nas operações de clarificação, espessamento e classificação de materiais.

A capacidade de processamento é influenciada pelo tamanho da parte cilíndrica, enquanto a circulação de fluido na parte cônica do hidrociclone depende do tamanho do ângulo do tronco de cone (SVAROVSKY, 2000). Por exemplo, a família de hidrociclones Rietema possui comprimento da parte cilíndrica maior que o tronco de cone, e é tipicamente conhecida por apresentar alta capacidade, ou seja, baixo gasto energético ( $Eu = 1200$ ) e ser concentradora. Em oposição, o hidrociclone Bradley apresenta maior tronco de cone e menor ângulo, é um

típico hidrociclone classificador de alta eficiência, porém de maior gasto energético ( $E_u = 7500$ ).

Como os hidrociclones são caracterizados segundo suas relações geométricas, a manipulação de suas dimensões desempenha papel importante na melhora do desempenho, como no aumento da eficiência e na minimização de gastos energéticos. Diversos estudos objetivando o aprimoramento da separação em hidrociclones são relacionados à otimização de suas variáveis geométricas (VIEIRA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2015a).

## 2.2. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Além de sua geometria, as condições operacionais, como queda de pressão e concentração da alimentação, influenciam no desempenho de hidrociclones. A elevação dos níveis de queda de pressão aumenta a eficiência de separação, entretanto, é usual operar com pressões de até 2 bar. Em contrapartida, o aumento da concentração da suspensão alimentada leva ao rápido decréscimo na eficiência, por isso a alimentação diluída é preferida quando busca-se por alta recuperação mássica sólidos (SVAROVSKY, 2000).

Quando o material a ser hidrociclonado está em uma concentração não diluída, por razões práticas, seria mais simples diluir a suspensão a ser alimentada para obter alta recuperação. Entretanto, a quantidade de água adicionada ao processo seria maior, e como consequência, maior quantidade de rejeitos numa unidade industrial. Nesse sentido, alguns estudos têm sido desenvolvidos (KUANG *et al.*, 2012; GHODRAT *et al.*, 2014a; ABDOLLAHZADEH *et al.*, 2015), entretanto ainda é necessário compreender melhor o efeito de concentração na performance de hidrociclones.

De forma peculiar, o diâmetro de *underflow* é considerado uma variável operacional, que deve ser ajustada de acordo com as condições em vigor na planta industrial. O correto dimensionamento do orifício de *underflow* é fundamental para o sucesso do processo de hidrociclonagem. Com a finalidade de encontrar uma condição ótima para uma determinada aplicação, frequentemente pesquisadores incluem a variável operacional diâmetro de *underflow* em seu planejamento de experimentos (SALVADOR, 2013; KYRIAKIDIS, 2014; SILVA *et al.*, 2015b).

## 2.3. ESCOAMENTO EM HIDROCICLONES

O princípio básico de separação em hidrociclones é a sedimentação centrífuga. A entrada da suspensão de forma rotacional dá origem a um campo centrífugo de alta aceleração que promove a separação da suspensão em duas correntes. As partículas maiores são coletadas na saída de *underflow* em virtude da força centrífuga; em oposição, a força de arraste induz a migração das partículas menores para o vórtice interno juntamente com a maior parcela de fluido, sendo descarregadas na saída de *overflow*. Todavia, compreender o movimento da suspensão no interior de hidrociclones é essencial para definir a trajetória do fluido, que determina a eficiência e o desempenho do equipamento.

A alimentação tangencial de fluido dá origem ao movimento helicoidal. As partículas maiores adquirem aceleração centrífuga e se deslocam para a parede do equipamento. A suspensão é induzida a seguir o movimento descendente, próximo à parede externa. Por fim, apenas parte da suspensão é coletada na pequena abertura inferior, orifício de *underflow*. As partículas menores e de baixa densidade, que não tiveram tempo de alcançar a parede, se deslocam para o vórtice interior, de movimento ascendente, e são descarregadas no duto de *overflow* (SVAROVSKY, 1984).

O escoamento em hidrociclones é complexo, turbulento e tridimensional. O movimento do fluido é explicado por sua distribuição de velocidade, que pode ser decomposta nas componentes: tangencial ( $v_\theta$ ), axial ( $v_a$ ) e radial ( $v_r$ ). A velocidade tangencial, está diretamente relacionada a geração das forças centrífugas, responsáveis pela coleta de determinada partícula, e das forças de cisalhamento, que não permitem a formação de torta quando se tratar do hidrociclone filtrante. A Figura 2.2 representa de forma esquemática as componentes da velocidade.

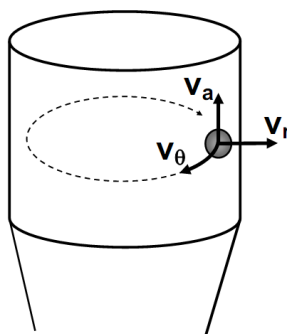


Figura 2.2 - Decomposição esquemática das velocidades: tangencial ( $v_\theta$ ), axial ( $v_a$ ) e radial ( $v_r$ ) (BERGSTRÖM, 2006).

À medida que o fluido adentra a parte cônica do equipamento, maiores são as componentes da velocidade, em virtude da diminuição da seção disponível ao escoamento. Próximo ao orifício de *underflow* ocorre transferência de quantidade de movimento e as componentes radial e axial recebem energia do movimento rotacional. Ocorre a formação do *vortex breakdown*: a parcela não descarregada no *underflow* se dirige ao centro do equipamento que induz um vórtice interno ascendente e inverso ao anterior (VIEIRA, 2006).

A turbulência influencia de forma significativa o comportamento da suspensão. Por exemplo, na parte cônica do equipamento se a velocidade radial do líquido, direcionada das paredes para o eixo central, é muito grande partículas maiores são arrastadas para o centro do hidrociclone, diminuindo sua eficiência. Outros fatores excepcionais prejudicam o desempenho de separação em hidrociclones, como, o efeito de curto-circuito e a formação de uma coluna de ar no centro do equipamento chamada de *air core* (SVAROVSKY, 2000). Estas particularidades do processo de hidrociclonagem estão descritas a seguir.

No topo do equipamento, próximo à parede externa do *vortex finder*, existe uma região de turbulência que dá origem ao curto-circuito de partículas. A formação deste fluxo caótico ocorre em virtude do gradiente de pressão formado e da diferença de tamanho entre o *vortex finder* e o vórtice interno ascendente (SOUZA *et al.*, 2000). A Figura 2.3 ilustra o comportamento da suspensão na entrada do hidrociclone, quando as condições propiciam a formação de curto-circuito. Nesta situação indesejável, a alimentação segue um caminho preferencial, não passa pelo processo de separação, de forma que, independentemente do tamanho ou densidade, as partículas são descarregadas no duto de *overflow*.

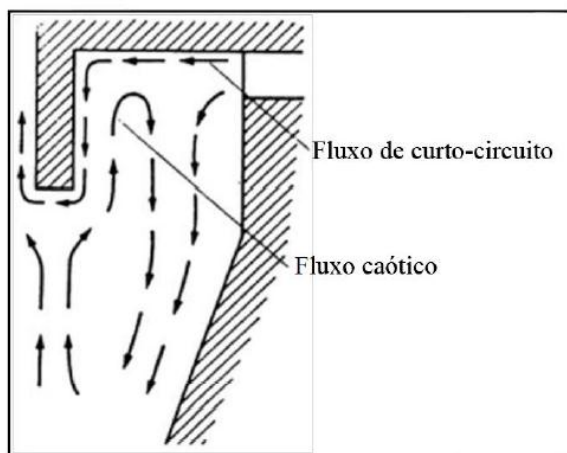


Figura 2.3 - Representação esquemática do fluxo caótico e de curto-circuito. (Adaptado: SILVA, 2012)

O projeto do comprimento ideal do *vortex finder* é sobremaneira importante para minimizar a formação de curto-circuito entre a alimentação e a corrente de *overflow*. Quanto menor o comprimento de *vortex finder* mais favorável será a passagem do fluxo alimentado diretamente para o *overflow* (SILVA, 2014). Quanto mais longo este acessório, maior será o tempo das partículas se deslocarem para corrente de *underflow*, entretanto, se o comprimento do mesmo exceder determinado limite, pode impedir a migração de partículas do *vortex* interno para o externo, diminuindo a eficiência. Portanto, a escolha do comprimento de *vortex finder* é essencial. Segundo MARTÍNEZ *et al.* (2008), a determinação do comprimento ótimo deve ser feita experimentalmente pois depende do tamanho das partículas e de sua distribuição na alimentação.

Por vezes o surgimento de um vórtice de ar no interior do equipamento modifica seu desempenho e eficiência. O chamado *air core* possui estrutura instável que por sua vez, gera instabilidades no fluxo de partículas, afeta o regime permanente e a homogeneidade do escoamento, contribuindo para o decréscimo da eficiência de separação (XU *et al.*, 2013). Devido sua importância, diversos são os estudos para compreender o mecanismo de formação do *air core* e encontrar maneiras de evitá-lo.

Sabe-se que altas velocidades tangenciais provocam a diminuição da queda de pressão. Por consequência, o *air core* é formado devido à criação de uma região de pressão negativa no eixo central, induzindo a entrada de ar pelo orifício de *underflow* e saída pelo *overflow*. Segundo CHU *et al.* (2004) é possível proporcionar a quebra do *air core* através da inserção de uma haste no eixo central dos hidrociclones. Além disso, este fenômeno indesejado pode ser extinguido pela adição de contrapressão ou a alteração da faixa operacional (VIEIRA, 2006).

Outros desvios da linearidade também podem ocorrer na operação de um hidrociclone. O chamado *fish hook* diz respeito à formação de uma inflexão na curva de eficiência dos hidrociclones, de modo que a diminuição do tamanho de partículas, além de um tamanho crítico, torna a eficiência maior. Este efeito surgiu na literatura na década de 80 (FINCH, 1983), tornou-se objeto de pesquisa, e por muitas vezes foi alvo de discussões acadêmicas (NAGESWARARAO, 2000; BOURGEOIS e MAJUMDER, 2013). Por indicar um aumento na separação dos finos, que é de grande interesse, estudos têm sido desenvolvidos para modelar o efeito, comprovar sua existência e entender quais as variáveis influenciam no mesmo (ZHU E LIOW, 2014, ABDOLLAHZADEH *et al.*, 2015). DUECK *et al.* (2014), propuseram uma equação que contém o efeito *fish hook*, incluindo parâmetros relacionados ao conteúdo da suspensão alimentada e sua distribuição granulométrica; os autores concluíram que para controlar o *fish hook* deve-se trabalhar com suspensão diluída.

Levando em consideração a discussão apresentada, conclui-se que, mesmo que a estrutura e operação em hidrociclones seja simples, o escoamento em seu interior é de grande complexidade. Com o intuito de facilitar a descrição do comportamento de fluidos no interior de hidrociclones, técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) têm sido utilizadas para compreender melhor os escoamentos no interior de um hidrociclone e assim prever o desempenho destes equipamentos. Deve-se considerar que as técnicas numéricas necessitam de validação empírica, portanto tal ferramenta deve ser usada como auxílio aos estudos e não como substituta dos experimentos (PATANKAR, 1980).

## 2.4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A avaliação quantitativa, da separação/classificação de partículas na operação de hidrociclonagem, tem por princípio o estudo da divisão de fluxos e da quantidade de matéria coletada e descarregada nas correntes de *underflow* e *overflow*. Para tanto, primeiramente é necessário compreender as principais variáveis relacionadas à hidrociclonagem. Logo, neste tópico são apresentados os conceitos de concentração volumétrica, capacidade de processamento, razão de líquido, eficiência total, eficiência total reduzida, eficiência granulométrica e eficiência granulométrica reduzida, além das variáveis relacionadas a classificação de partículas, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido. Não obstante, será abordado o conceito de número de Euler, que está relacionado ao consumo energético.

### 2.4.1. Concentração Volumétrica

A partir da prévia aferição experimental da concentração mássica ( $C_{wi}$ ) de determinada corrente, pode-se determinar a concentração volumétrica ( $C_{vi}$ ) de sólidos nessa corrente. De acordo com a Equação 2.1, para o cálculo da concentração volumétrica de determinada corrente, além da concentração mássica, é necessário conhecimento da densidade dos sólidos em suspensão ( $\rho_s$ ) e do fluido de trabalho ( $\rho$ ). Lembrando que a concentração mássica é medida com auxílio de técnicas de gravimetria.

$$C_{vi} = \frac{1}{\left[ \frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_{wi}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (2.1)$$

### 2.4.2. Capacidade de Processamento

Define-se capacidade de processamento de um hidrociclone como sendo a vazão volumétrica alimentada ( $Q_A$ ) no equipamento em determinada queda de pressão. Por sua vez a vazão volumétrica ( $Q_i$ ), definida através da Equação 2.2, é a razão entre a vazão mássica ( $W_i$ ) e a densidade da corrente ( $\rho_i$ ), onde o subscrito  $i$  indica uma corrente genérica (alimentação, *overflow* ou *underflow*).

$$Q_i = \frac{W_i}{\rho_i} \quad (2.2)$$

As vazões mássicas ( $W_i$ ) podem ser quantificadas experimentalmente por técnicas de gravimetria. A densidade das correntes ( $\rho_i$ ) é determinada pela Equação 2.3.

$$\rho_i = \frac{\rho}{1 - C_{wi} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)} \quad (2.3)$$

### 2.4.3. Razão de Líquido

A razão de líquido ( $R_L$ ) representa a fração de líquido que, inicialmente alimentada no hidrociclone é descarregada na corrente de *underflow*. O equipamento, independente da ação da força centrífuga, age como um divisor de correntes e por consequência arrasta partículas para o *underflow*. Portanto, parte da massa sólida é separada não somente devido à ação da força centrífuga, pois a corrente inicialmente alimentada dá origem às correntes de *underflow* e *overflow*. Esse fenômeno, popularmente conhecido como “efeito T” (SILVA, 1989; SILVA, 2012), está quantificado através da resposta razão de líquido conforme Equação 2.4. Os subscritos “A” e “U” indicam a corrente de alimentação e *underflow*, respectivamente.

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{VU})}{Q_A(1 - C_{VA})} \quad (2.4)$$

A razão de líquido está diretamente relacionada ao poder de classificação e concentração dos hidrociclones. Se grande quantidade de fluido é descarregada na corrente de *underflow*, maior será também a quantidade de sólidos coletada, e, portanto, maior a eficiência de separação. Contudo, se o objetivo da hidrociclonagem é uma corrente de produto concentrada, menores valores para a razão de líquido devem ser obtidos, e neste caso menores eficiências são também observadas.

#### 2.4.4. Eficiência Total e Eficiência Reduzida

A Eficiência Total ( $\eta$ ) 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 (VIEIRA, 2006). O cálculo da eficiência total pode ser visualizado através da Equação 2.5.

$$\eta = \frac{C_{WU}W_U}{C_{WA}W_A} \quad (2.5)$$

A Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ ) considera somente as partículas coletadas no *underflow* devido à ação do campo centrífugo, desconsiderando a influência da divisão de fluxos. Dessa forma, a Eficiência Total Reduzida, representada pela Equação 2.6, desconta da eficiência total o efeito de arraste que o líquido proporciona, representado pela resposta Razão de Líquido ( $R_L$ ) (VIEIRA, 2006).

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (2.6)$$

#### 2.4.5. Eficiência Granulométrica e Eficiência Granulométrica Reduzida

A Eficiência Granulométrica ( $G$ ) está relacionada ao poder de separação dos hidrociclones em relação a um tamanho de partícula, deste modo, representa a probabilidade de determinada partícula ser coletada. A curva de eficiência granulométrica é também chamada de curva de distribuição de probabilidade, pois,  $G$  é a probabilidade de que partículas com determinado tamanho possam ser separadas na corrente de *underflow* a partir da alimentação de um hidrociclone (VIEIRA, 2006). Relaciona a eficiência total ( $\eta$ ) com a variação dos tamanhos de partículas após a hidrociclonagem. É obtida pelo produto da eficiência total pela relação entre a distribuição de tamanho das partículas das correntes de *underflow* ( $dX_U$ ) pela corrente de alimentação ( $dX_A$ ), assim como mostrado na Equação 2.7.

$$G = \eta \frac{dX_u}{dX_A} \quad (2.7)$$



Assim como as outras variáveis reduzidas, a Eficiência Granulométrica Reduzida ( $G'$ ) contabiliza apenas as partículas coletadas devido à ação do campo centrífugo, excluindo o “efeito T”. A Equação 2.8 representa o cálculo da eficiência Granulométrica Reduzida.

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (2.8)$$

#### 2.4.6. Diâmetro de Corte e Diâmetro de Corte Reduzido

Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) é o diâmetro da partícula ( $d_p$ ) que é coletada com eficiência granulométrica ( $G$ ) de 50% (SVAROVSKY, 2000). Ele determina o poder de classificação do hidrociclone através da atuação da força centrífuga e do arraste de partículas. Partículas maiores que o diâmetro de corte têm mais probabilidade de serem coletadas com eficiência granulométrica maior que 50%.

Diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) é o diâmetro da partícula que é coletada com eficiência reduzida ( $G'$ ) de 50%, ou seja, apenas considera o efeito centrífugo na separação de partículas.

#### 2.4.7. Consumo energético

O número de Euler ( $Eu$ ) tem uma relação direta com o consumo energético deste equipamento através da razão entre a queda de pressão e a energia cinética por unidade de volume. Dessa maneira, quanto menor o valor do número de Euler, menor a perda de carga para uma mesma vazão, o que leva a um menor consumo energético (SILVA, 2012). Para o cálculo desse adimensional, de acordo com Equação 2.9, devem ser conhecidas a queda de pressão ( $-\Delta P$ ), a densidade do fluido de trabalho ( $\rho$ ) na temperatura de operação e a velocidade na seção cilíndrica, calculada pela razão entre a vazão volumétrica de alimentação ( $Q_A$ ) e a área da seção cilíndrica (Equação 2.10).

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (2.9)$$

$$u_c = \frac{4Q_A}{\pi D_C^2} \quad (2.10)$$

## 2.5. TEORIA CLÁSSICA DE SEPARAÇÃO

No âmbito dos fenômenos de transporte, a descrição matemática do escoamento de fluidos é feita através das Equações da Continuidade e do Movimento. A resolução analítica destas equações para o processo de hidrociclonagem é complexa, e mesmo com auxílio de técnicas numéricas, por vezes será grande o esforço computacional. Dessa forma, a abordagem clássica através de números adimensionais foi usada em muitos trabalhos de maneira a simplificar o projeto e a previsão do desempenho de hidrociclones. Além disso, modelos empíricos e semi-empíricos têm sido desenvolvidos para descrever a classificação nos hidrociclones. Este tópico abordará os principais grupos adimensionais relacionados à hidrociclonagem e o Modelo do Tempo de Residência, um dos clássicos modelos de separação, para a previsão da eficiência de separação dos hidrociclones.

### 2.5.1. Grupos Adimensionais

Os grupos adimensionais relevantes ao processo de hidrociclonagem são os números de Euler ( $Eu$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Stokes ( $Stk_{50}$ ). O número de Euler, representa o gasto energético (Equação 2.9), o adimensional de Reynolds, Equação 2.11, é usado pra definir o tipo de escoamento, e o número de Stokes, representado pela Equação 2.12, relaciona o poder de classificação do equipamento.

$$Re = \frac{\rho D_C u_C}{\mu} \quad (2.11)$$

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho) u_C (d'_{50})^2}{18 \mu D_C} \quad (2.12)$$

Os adimensionais descritos também podem ser correlacionados com os parâmetros de concentração volumétrica da alimentação ( $C_{VA}$ ) e razão de líquido ( $R_L$ ) a depender da influência que desempenham no hidrociclone. Esta correlação pode ser ilustrada conforme Equação 2.13 (SILVA e MEDRONHO, 1988).

$$Stk_{50} Eu = f(Re, C_{VA}, R_L) \quad (2.13)$$

### 2.5.2. Modelo do Tempo de Residência

De acordo com RIETEMA (1961), o Modelo do Tempo de Residência pressupõe que a coleta de determinada partícula acontecerá se a mesma deslocar radialmente da entrada até à parede do hidrociclone num tempo menor ou igual a sua permanência no interior do equipamento, ou seja, em seu tempo de residência disponível. Portanto, o diâmetro de corte seria o tamanho de partícula que ao entrar precisamente no centro do duto de alimentação, atinge a parede do equipamento no exato tempo de residência do hidrociclone (SVAROVSKY, 2000).

Para validação do Modelo do Tempo de Residência, são consideradas as hipóteses de distribuição homogênea de partículas no duto de alimentação e instituição do regime de Stokes para a velocidade terminal. Contudo os efeitos de turbulência e de concentração são negligenciados no processo de separação.

RIETEMA (1961) propôs uma expressão que relaciona a velocidade radial da partícula com seu tamanho, viscosidade do meio e força centrífuga, de acordo com a Equação 2.14.

$$\frac{-\Delta P(\rho_s - \rho)}{\mu \rho Q} L d'_{50} = \frac{18}{\pi} \frac{v_z}{v_i} \frac{D_c}{D_i} \quad (2.14)$$

Conforme as Equações 2.15 e 2.16, as variáveis pertinentes ao processo de separação em hidrociclones foram relacionadas por MASSARANI (1989) a partir da modificação da metodologia de RIETEMA (1961) e de estudos experimentais. Além de incorporar efeitos de concentração de sólidos e de razão de líquido na predição do diâmetro de corte reduzido, estabelecem uma relação direta entre as propriedades físico químicas do sistema com características geométricas e operacionais do equipamento.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = K \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \frac{1}{1 + 1,73 R_L} \exp(4,5 C_{VA}) \quad (2.15)$$

$$R_L = B \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^C \quad (2.16)$$

Para cada família de hidrociclones os parâmetros  $K$ ,  $B$  e  $C$  têm valor específico, já que dependem da configuração do equipamento. O fato de que parte das partículas é coletada no *underflow* sem a ação do campo centrífugo está correlacionado com o fator de correção para a razão de líquido. Do mesmo modo, o fator de correção para a concentração existe para acompanhar as modificações na alimentação.

## 2.6. HISTÓRICO DE PESQUISA – FEQUI/UFU

A demanda por melhoria nos processos e redução de custos na indústria tem impulsionado diversos estudos de otimização de equipamentos. De igual maneira, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de aperfeiçoar o desempenho de hidrociclones. A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, por estar localizada numa região próxima a importantes mineradoras e indústrias alimentícias, tem somado esforços, ao longo dos anos, no estudo e aprimoramento das técnicas de separação de partículas por hidrociclonagem.

DAMASCENO e MASSARANI (1986) estudaram um sedimentador de fundo filtrante e concluíram que a filtração neste equipamento contribuiu significativamente para a operação de espessamento. Segundo estudo experimental, a área requerida para sedimentação do equipamento não-convencional era até 50% menor que a área de um sedimentador tradicional. Mediante tais resultados inspiradores, a operação de filtração foi incorporada à hidrociclonagem na tentativa de melhorar a eficiência de coleta de sólidos.

Em face disto, o Hidrociclone Filtrante foi idealizado pelos pesquisadores da FEQUI/UFU (HENRIQUE *et al.*, 1987), tornando-se objeto de pedido de patente (INPI, patente n. 9001889). Desde então, diversos estudos foram conduzidos com a modalidade filtrante.

Os primeiros experimentos com a configuração filtrante foram conduzidos por LANNA *et al.* (1992) na geometria Bradley, usando tecido de nylon como meio filtrante. Na sequência, VIEIRA (1997) estudou a mesma geometria, porém com a região cônica filtrante constituída de tecido de polipropileno. Ambos verificaram o mesmo comportamento, ou seja, aumento da capacidade de processamento e da concentração de sólidos no *underflow* após a inserção do tronco de cone poroso, bem como reduções nos números de Euler.

Com o intuito de avaliar o efeito da resistência do meio filtrante, SOUZA (1999) estudou diferentes permeabilidades de meio filtrante para geometria Bradley com seção cônica de bronze sinterizado. Concluiu que quanto maior fosse a permeabilidade do cone, maior seria a vazão alcançada, haja vista que uma saída adicional de filtrado demandava uma maior entrada de suspensão. Todavia, a presença do meio filtrante reduziu a eficiência total quando comparada ao hidrociclone convencional (não poroso) Bradley nas mesmas condições operacionais.

A troca do material da seção cônica foi uma contribuição positiva, pois o bronze sinterizado permitiu rigidez mecânica em relação aos tecidos empregados nos trabalhos anteriores. SOUZA (1999) verificou ainda que não havia formação de torta nos equipamentos filtrantes devido às altas forças cisalhantes sobre as paredes do equipamento.

Na sucessão de investigações com hidrociclones filtrantes, VIEIRA (2001) estudou experimentalmente a geometria filtrante segundo a família Rietema usando novamente a seção cônica de bronze sinterizado. Os resultados para esta geometria revelaram que o equipamento filtrante apresentou maior consumo energético, contrário aos experimentos conduzidos com os hidrociclone Bradley, e maior eficiência total, devido ao aumento da razão de líquido, em relação ao mesmo equipamento convencional. Dessa forma, o hidrociclone Rietema na modalidade filtrante seria indicado para processos em que o maior interesse fosse a coleta de sólidos no *underflow*.

Por sua vez, o estudo de ARRUDA *et al.* (2002), mostrou que, para a família Krebs, a inserção do cone poroso manufaturado de bronze sinterizado não alterava as principais respostas (diâmetro de corte reduzido, número de Euler e razão de líquido).

Da mesma forma, ARRUDA (2003) continuou os estudos com hidrociclones filtrantes, porém utilizando a geometria Demco. Novamente, o bronze sinterizado foi usado na confecção do cone poroso. Assim como na geometria Krebs, a filtração não apresentou efeitos significativos no desempenho do hidrociclone de geometria Demco. Entretanto, comparando o desempenho das outras famílias estudadas (Bradley, Rietema e Krebs), os hidrociclones de geometria Demco apresentaram baixa razão de líquido e baixo número de Euler, o que classifica os hidrociclones filtrantes de Demco como equipamentos concentradores. Nesta oportunidade, ARRUDA (2003) observou que havia uma tendência em relação ao efeito da filtração nas geometrias já estudadas (Bradley, Rietema, Krebs e Demco). Quando a relação entre a área lateral da seção cônica e a da seção cilíndrica era maior que 1 (um) ocorria uma diminuição da eficiência com a inserção da parede filtrante. Da mesma maneira, para esta relação menor que 1 (um) havia aumento da eficiência com a incorporação do meio filtrante. Para os equipamentos que tinham áreas laterais do cone e do cilindro semelhantes, ou seja, onde a relação foi próxima de 1 (um) (famílias Demco e Krebs), a eficiência praticamente não se alterava. A razão entre as áreas laterais do tronco de cone e do cilindro fornecida pelo autor para as famílias Bradley, Rietema, Krebs e Demco foram iguais a 1,99; 0,52; 1,03 e 0,90, respectivamente.

Com o objetivo de estudar a influência da filtração e otimizar uma geometria para maximização da coleta de sólidos e minimização do gasto energético, VIEIRA (2006) confeccionou 25 novas geometrias de hidrociclones filtrantes e convencionais. Um Planejamento Composto Central (PCC) foi proposto para estudar o efeito das variáveis:  $D_i/D_c$ ,  $D_o/D_c$ ,  $L/D_c$  e  $\theta$  nos hidrociclones. Além do estudo experimental, foram utilizadas técnicas de CFD (simulação numérica bidimensional) para compreender o movimento do fluido no interior do equipamento. A melhor configuração filtrante obtida foi denominada de HF11 (referente à

11ª linha da matriz de planejamento) porque apresentava as maiores eficiências e os menores Números de Euler.

VIEIRA (2006) observou que, para a modalidade filtrante, havia menor efeito de mistura, ausência de mudança na vazão de líquido descarregada no concentrado e menor velocidade radial próxima à parede cônica do equipamento. Estas características, juntamente com a alta vazão apresentada, contribuíram para um maior arraste de partículas para o *underflow* nos equipamentos filtrantes.

À medida que o líquido se aproximava da parede e saía como filtrado, mais alimentação de suspensão era requerida. Nestes equipamentos, a aceleração centrífuga diminuiu e, como consequência, menor foi a mistura na base do cone e menos partículas foram arrastadas para vórtice interno. Outro fator que inibiu o arraste de partículas para o centro do hidrociclone foi a saída de filtrado através da superfície porosa, pois diminuiu os gradientes de velocidade radial próximo a parede (VIEIRA, 2006).

Os excelentes resultados obtidos para a geometria filtrante HF11, cujas dimensões características foram  $D_i/D_c = 0,26$ ;  $D_o/D_c = 0,22$ ;  $L/D_c = 6,9$  e  $\theta = 11,2^\circ$  (VIEIRA, 2006), despertaram o interesse de estudo desta configuração por outros pesquisadores.

ALMEIDA (2008) analisou a influência do diâmetro do orifício de *underflow* ( $D_U$ ) e do comprimento do *vortex finder* ( $\ell$ ) no hidrociclone HF11 com o objetivo de encontrar valores adequados para as variáveis estudadas. Foram realizados testes experimentais e numéricos com uso de técnicas de CFD. O autor constatou que a filtração foi benéfica para a separação e consumo energético e que valores ideais de  $D_U$  e  $\ell$  dependiam da função específica do equipamento (classificação ou concentração). O gasto energético aumentou com o aumento do comprimento de *vortex finder* e a coleta de sólidos foi máxima nos níveis intermediários para essa variável. Já os maiores valores de diâmetro de *underflow* alcançaram baixo número de Euler e menor diâmetro de corte.

Ainda como objeto de estudo o hidrociclone HF11 desenvolvido por VIEIRA (2006), FAÇANHA (2012) propôs a incorporação da filtração na parte cilíndrica deste separador como forma de avaliar o efeito da posição do meio filtrante, denominando-o de HCiF. O desempenho do hidrociclone cilíndrico-filtrante (HCiF) foi comparado a modalidade cônico-filtrante (HCoF) e convencional (HCon). Em relação ao consumo energético a filtração foi benéfica para a hidrociclonagem pois, independentemente do local de aplicação da filtração houve decréscimo no número de Euler. A eficiência total do HCoF foi superior à eficiência do HCon, enquanto o HCiF apresentou resultados inferiores de eficiência total em relação ao equipamento convencional (FAÇANHA, 2012).

Surgiu então o interesse de gerar uma geometria totalmente filtrante. Para tanto, SALVADOR (2013), acoplou uma parte cilíndrica e cônica permeável em um mesmo equipamento, chamado de Hidrociclone Totalmente Filtrante (HCiCoF). Seu desempenho foi comparado com as modalidades convencional (HCon), cilíndrico-filtrante (HCiF) e cônico-filtrante (HCoF) através da variação do diâmetro de *underflow* e da permeabilidade do meio filtrante. Independente do equipamento, o número de Euler diminuiu com aumento no diâmetro de *underflow*. A diminuição da permeabilidade também foi uma vantagem energética. Para o Hidrociclone Totalmente Filtrante de menor permeabilidade a capacidade de processamento foi cerca de 40% maior que a do Hidrociclone Convencional (HCon); no entanto, não houve diferença significativa na eficiência em relação à posição/adição do meio filtrante.

Segundo SALVADOR (2013), não era aconselhável empregar meios filtrantes com o valor de permeabilidade maior do que aproximadamente  $2,2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . O consumo de energia seria superior ao consumo da geometria convencional (totalmente impermeável) e a separação praticamente seria a mesma. Pôde-se afirmar que a separação de partículas estava mais relacionada à geometria do equipamento do que ao efeito da filtração.

O abrangente trabalho de VIEIRA (2006) também foi fonte de inspiração para outros trabalhos de otimização utilizando algoritmos específicos de resolução. SILVA (2012) utilizou por sua vez o Algoritmo de Evolução Diferencial para otimizar as variáveis  $D_i/D_c$ ,  $D_o/D_c$ ,  $L/D_c$  e  $\theta$  para hidrociclones convencionais. Foram propostos três estudos de caso com objetivos diferentes de otimização: o Caso 1 era destinado a encontrar um hidrociclone classificador de alta eficiência (HCOT1); o Caso 2 tinha a finalidade de minimizar a razão de líquido (HCOT2); e ainda o Caso 3 foi destinado a geração de uma terceira geometria destinada à minimização dos custos energéticos (HCOT3).

A fim de potencializar as geometrias HCOT1 e HCOT3, KYRIAKIDIS (2014) estudou a influência do diâmetro do orifício de *underflow* ( $D_U$ ) e comprimento de *vortex finder* ( $\ell$ ) nestas geometrias. Neste trabalho, foi verificado que quanto maior era o diâmetro de *underflow* maior foi a capacidade de processamento obtida. Vale colocar em destaque a característica concentradora do hidrociclone HCOT3, como confirmado pela razão de líquido sempre abaixo de 8%. A concentração volumétrica da corrente de alimentação (1%), inicialmente diluída, foi drasticamente majorada no *underflow* para 11,3%, 21,2% e 42,9% com o uso dos diâmetros de orifício de *underflow* de 5, 4 e 3 mm, respectivamente. Além de característica concentradora o HCOT3 apresentou baixo gasto energético, apresentando número de Euler entre 779 e 877 para as condições estudadas pelo autor.

SILVA (2014), inspirado no estudo de SILVA (2012), realizou um estudo de otimização da configuração cônico-filtrante combinando técnicas de Superfície de Resposta e Algoritmo de Evolução Diferencial. Três geometrias foram encontradas através da otimização das variáveis  $Di/Dc$ ,  $Do/Dc$ ,  $L/Dc$  e  $\theta$ . O autor ainda avaliou a influência das variáveis geométricas  $D_U$  e  $\ell$  (*vortex finder*). O primeiro equipamento, HFOT1, deveria fornecer alta eficiência para que a operação de clarificação fosse aprimorada; o segundo equipamento, HFOT2, forneceria baixa razão de líquido para espessamento da corrente de *underflow*; e o terceiro, HFOT3, teria o objetivo principal de minimização dos custos energéticos através da alta capacidade de processamento. SILVA (2014) observou que o HFOT1 foi o hidrociclone de maior eficiência total ( $\eta = 89,11\%$ ), enquanto o HFOT3 apresentou o menor gasto energético ( $E_u = 753$ ).

Adicionalmente, os hidrociclones filtrantes otimizados foram analisados de forma comparativa aos hidrociclones convencionais otimizados por SILVA (2012). Os resultados de SILVA (2014) apontaram que o HFOT1 tinha eficiência superior à do HCOT1, assim como gasto energético. A comparação dos hidrociclones do Caso 2 de otimização permitiu observar que para fins de espessamento, o hidrociclone HCOT2 se mostrava superior (menor  $R_L$ , embora menor eficiência); entretanto, ambos os hidrociclones eram adequados para fornecer correntes de *underflow* concentradas. Os hidrociclones do Caso 3 chegaram ao mesmo patamar de baixo gasto energético, enquanto a razão de líquido do hidrociclone HCOT3 ( $R_L = 5,78\%$ ), foi menor que para o HFOT3. Todavia o HFOT3 apresentou eficiência superior ao HCOT3, cerca de 67% e alto poder de concentração aliado a baixo consumo de energia em um patamar de eficiência razoável.

A geometria encontrada para minimizar os gastos energéticos, HFOT3, mostrou-se pouco afetada pelas variáveis geométricas estudadas diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e *vortex finder* ( $\ell$ ). Os resultados experimentais de SILVA (2014) e SILVA (2012) podem ser visualizados com maiores detalhes no Anexo 1.

Concomitantemente aos estudos relacionados à modalidade de hidrociclones filtrantes, a Faculdade de Engenharia Química da UFU desenvolveu estudos relacionados à otimização da separação de emulsões óleo-água em hidrociclones (GOMES, 2002, PETRI JUNIOR *et al.*, 2010a, NASCIMENTO *et al.*, 2012) além de estudos fluidodinâmicos para descrição do escoamento em hidrociclones (PETRI JUNIOR *et al.*, 2009; PETRI JUNIOR *et al.*, 2010b; BICALHO *et al.*, 2012). Também foram desenvolvidos estudos relacionados a otimização da separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo e gás (PANISSET, 2014).



BICALHO (2011) estudou a separação por hidrociclonagem de leveduras utilizadas no processo de fermentação alcoólica através de testes experimentais e técnicas de CFD. Sabe-se que as leveduras possuem pequeno tamanho e baixa densidade de modo que a separação das mesmas representa um desafio. O autor avaliou a influência de variáveis operacionais e geométricas sobre o desempenho de hidrociclones com o objetivo de determinar modelos matemáticos empíricos para previsão das principais respostas relacionadas a hidrociclonagem. Observou-se que a diminuição da concentração de leveduras juntamente com acréscimos na queda de pressão favoreceram a eficiência de separação. Além disso, foi encontrada uma geometria ótima destinada a maximização da eficiência.

Através da avaliação dos trabalhos anteriores e sabendo que a configuração filtrante de diferentes geometrias de hidrociclones responde de maneira distinta à modificação no seu tronco de cone, o presente estudo foi proposto a fim de explorar ainda mais a geometria do HFOT3 por ser uma configuração concentradora e economicamente proveitosa.

Cabe ressaltar, que a maioria dos trabalhos mencionados anteriormente foram conduzidos com suspensões diluídas (concentração de aproximadamente 1%), o que fomentou a investigação do efeito da concentração de sólidos para esta dissertação no hidrociclone HFOT3, tanto na modalidade filtrante quanto convencional.

## **2.7. TRABALHOS CORRELATOS**

Nos últimos anos, diversas universidades pelo mundo têm investido em pesquisa e desenvolvimento de hidrociclones através de estudos experimentais, em alguns casos validados com uso de técnicas de fluidodinâmica computacional. As dimensões e formas geométricas dos hidrociclones, além das características do material particulado e da concentração da suspensão, são alguns dos segmentos de pesquisa. Em seguida, encontra-se uma síntese dos principais trabalhos experimentais e numéricos executados nos últimos três anos com seus resultados mais relevantes.

### **2.7.1. Alterações na alimentação**

HWANG *et al.* (2013) desenvolveram, através de técnicas de CFD, um novo hidrociclone destinado a separação de finos. Os autores propuseram alterações no tamanho e no número de alimentações do equipamento, conforme Figura 2.4

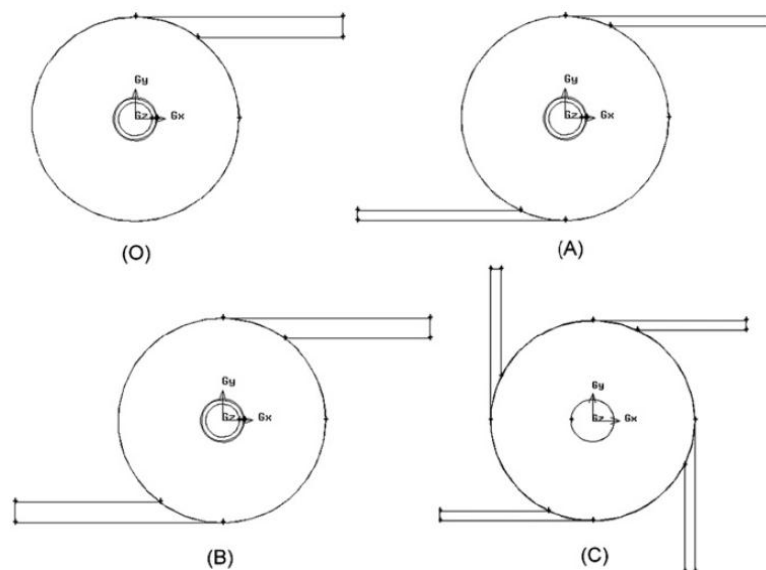


Figura 2.4 – Diferentes configurações da alimentação: (O) original, (A) duas entradas com metade do diâmetro original, (B) duas entradas com diâmetro original, (C) quatro entradas com metade do diâmetro original (Adaptado: HWANG *et al.*, 2013).

HWANG *et al.* (2013) também estudaram mudanças na geometria da alimentação com a projeção de um cone interno na parte superior do equipamento e da inserção de um canal guia na entrada retangular da alimentação como mostrado na Figura 2.5.

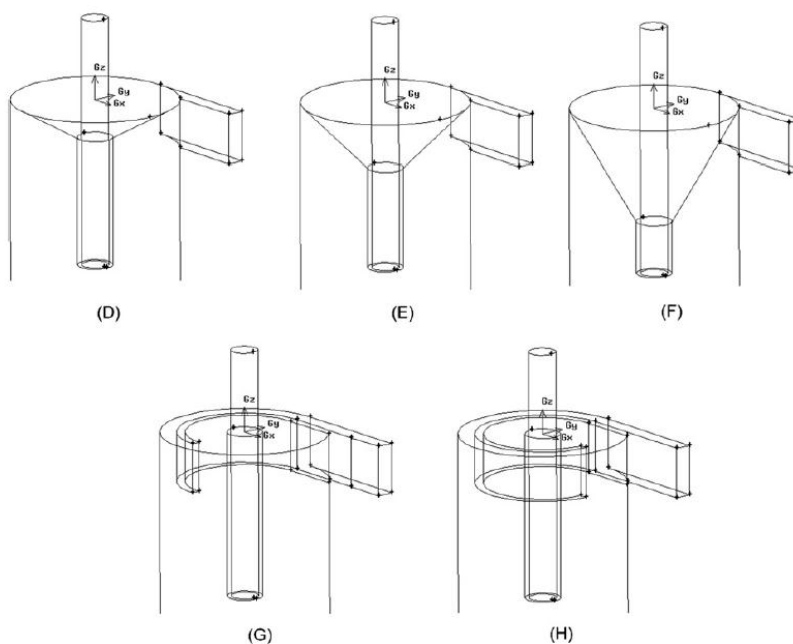


Figura 2.5 – Diferentes modificações de entrada: (D) cone superior 30°, (E) cone superior 45°, (F) cone superior 60°, (G) caminho-guia 180°, (H) caminho-guia 270° (Adaptado: HWANG *et al.*, 2013).

O aumento do número de entradas de alimentação e seu estreitamento favoreceu a eficiência de separação de partículas devido ao acréscimo da velocidade do fluido na parte cilíndrica. (HWANG *et al.*, 2013). Todavia, múltiplas entradas numa bateria de hidrociclones poderia acarretar dificuldades em seu arranjo e operação.

Segundo HWANG *et al.* (2013) o uso da parte superior em forma de cone reduziu a circulação de partículas finas perto do duto de *overflow* melhorando a coleta de finos, entretanto, o aumento do ângulo do cone interno de alimentação diminuiu o tempo de residência das partículas e por consequência prejudicou a eficiência de separação.

### 2.7.2. Alterações no *vortex finder*

Com o intuito de gerar novas geometrias, GHODRAT *et al.* (2014a) estudaram o desempenho de hidrociclones com diferentes configurações de *vortex finder* e analisaram, através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), o efeito da concentração de sólidos na alimentação do equipamento. Os autores variaram a concentração da alimentação de 4 a 30% em volume e fizeram alterações no diâmetro, comprimento e forma (tradicional, cone e cone invertido) do *vortex finder*. A Figura 2.6 mostra as diferentes configurações de forma propostas para o *vortex finder* e a malha computacional usada no caso tradicional. As respostas diâmetro de corte, razão de líquido e queda de pressão foram analisadas numericamente e determinadas as velocidades tangencial, axial e fração volumétrica de sólidos ao longo do equipamento.

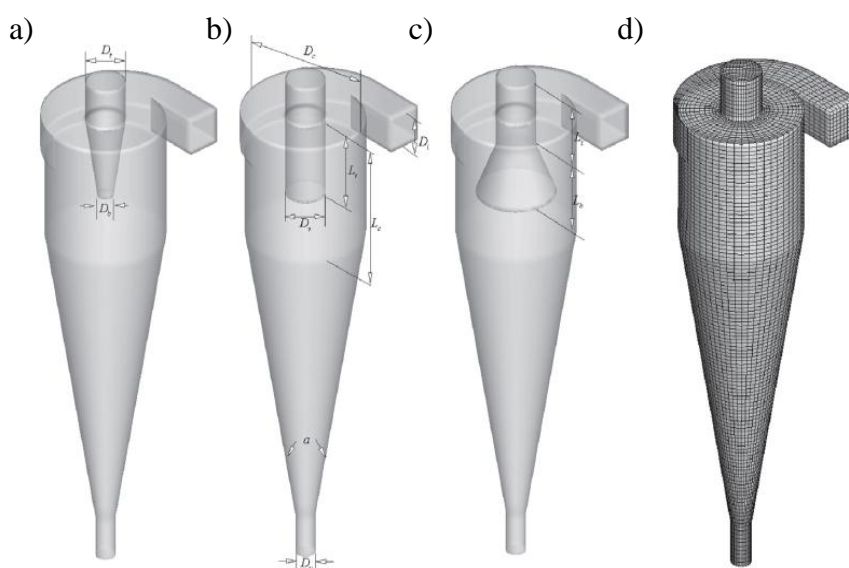


Figura 2.6 – Diferentes formas de *vortex finder*: a) cone, b) tradicional cilíndrico, c) cone invertido, d) malha computacional usada para o caso tradicional (Adaptado: GHODRAT *et al.*, 2014a).

Considerando o escoamento multifásico, o movimento do fluido no interior do hidrociclone e seu desempenho foram previstos levando em consideração as interações partícula-partícula e partícula-fluido. Através do modelo numérico de Dois Fluidos e do modelo de Mistura foi possível estudar a variação da concentração de sólidos na alimentação. Visando a estabilidade numérica foram usadas células de arranjo hexaédrico na criação da malha computacional. Sabe-se que quanto menor o tamanho das células maior é o esforço computacional e maior tempo destinado a simulação, todavia, melhores são os resultados simulados (GHODRAT *et al.*, 2014a).

Através dos resultados simulados, observou-se que o acréscimo da concentração de sólidos na alimentação reduziu a área de alta velocidade tangencial e então a região caracterizada por ser responsável pela separação de partículas. Além disso, o aumento do percentual de sólidos suavizou a magnitude da velocidade tangencial que culminou no acréscimo pronunciado do diâmetro de corte. (GHODRAT *et al.*, 2014a).

Segundo GHODRAT *et al.* (2014a), nos testes conduzidos no menor nível de concentração alimentada, a região de alta velocidade tangencial esteve localizada abaixo do *vortex finder* e diminuiu com o acréscimo do comprimento de *vortex finder*, resultando no decréscimo da eficiência total do hidrociclone. Nos testes conduzidos com maior quantidade de sólidos em suspensão, a separação foi favorecida pelo aumento do comprimento de *vortex finder* pois a região de maior velocidade tangencial ocorreu numa região limitada e não permitiu o arraste de partículas para o vórtice central ascendente e a saída de finos pelo *overflow*.

Contudo, alterações no diâmetro e na forma do *vortex finder* foram mais significativos no desempenho do hidrociclone. Independente da concentração de sólidos na alimentação, a redução do diâmetro de *overflow* foi benéfica para separação em virtude do aumento da velocidade tangencial próximo a parte inferior do *vortex finder* (região de separação de partículas). Quanto à forma, a diminuição do ângulo de abertura da parte inferior do duto de *vortex finder* também aumentou a eficiência, e então a configuração de cone invertido foi eleita a melhor em termos de separação de finos (GHODRAT *et al.*, 2014a).

A perda de partículas grossas para o *overflow* e a coleta de partículas finas no *underflow* caracteriza a baixa nitidez de separação. Em alguns casos é necessário o subsequente tratamento da suspensão que gera custos adicionais por vezes perda de material. Com objetivo de melhorar a nitidez de separação, TANG *et al.* (2015) estudaram, numericamente, os efeitos de diferentes configurações de *vortex finder*, e executaram um Planejamento Composto Central com as variáveis: comprimento, diâmetro e espessura de *vortex finder*. Também foi proposto um novo parâmetro para avaliar a nitidez de separação que é calculado através da relação entre

áreas específicas do gráfico de eficiência de separação. De acordo com os autores este parâmetro contabiliza a média do montante de partículas separadas no *overflow* e das partículas separadas no *underflow*. Quanto maior a nitidez de separação, melhor é a separação de partículas (TANG *et al.*, 2015).

A espessura do *vortex finder* influenciou de maneira menos pronunciada o desempenho do hidrociclone em relação ao diâmetro de *overflow* e o comprimento do *vortex finder*. Os autores verificaram que para o comprimento de *vortex finder* igual a zero houve formação de uma região de intenso curto circuito de partículas na parte superior e, como consequência a nitidez de separação foi mínima devido ao intenso escape de partículas grandes no *overflow* sem passar pelo processo de separação. Com o aumento do *vortex finder*, a queda de pressão cresceu gradualmente, e, a razão de líquido diminuiu devido ao acréscimo da velocidade axial ascendente. Entretanto, a majoração do comprimento de *vortex finder* após determinado limite, como por exemplo adentrar a região cônica, provocou o decréscimo da eficiência de separação de partículas finas e grossas (TANG *et al.*, 2015).

Assim como o estudo de GHODRAT *et al.* (2014a), TANG *et al.* (2015) verificaram que o diâmetro de *vortex finder* afetou de forma significativa a hidrociclonagem. A distribuição de velocidades axial revelou que o vórtice ascendente foi gradualmente estabilizado com o aumento do diâmetro de *overflow*, o que levou à diminuição da queda de pressão, decréscimos na razão de líquido e variações no parâmetro de nitidez de separação. Entretanto, há de se considerar que o aumento exacerbado no diâmetro de *vortex finder* induziu a saída indesejada de grande parte de partículas grossas pelo *overflow* (TANG *et al.*, 2015).

Dados experimentais foram ajustados num modelo de regressão numérica e, a partir de técnicas de superfície de resposta, um ponto ótimo de maximização da separação foi localizado usando o novo parâmetro de nitidez de separação. Através da otimização das variáveis diâmetro e comprimento de *vortex finder*, a maximização do parâmetro proposto por TANG *et al.*, (2015) ocorreu no patamar intermediário das variáveis estudadas ( $D_o = 29,1mm$ ,  $\ell = 50mm$ ) (TANG *et al.*, 2015).

### 2.7.3. Alterações na parte cônica

Ainda no ensejo de estudar o efeito da alteração da configuração da seção cônica no desempenho de hidrociclones, GHODRAT *et al.* (2014b) propuseram alterações no tamanho e na forma da parte cônica conforme Figura 2.7. O estudo foi conduzido através de técnicas de

fluidodinâmica computacional (CFD) com diferentes concentrações da alimentação, de até 30% em volume.

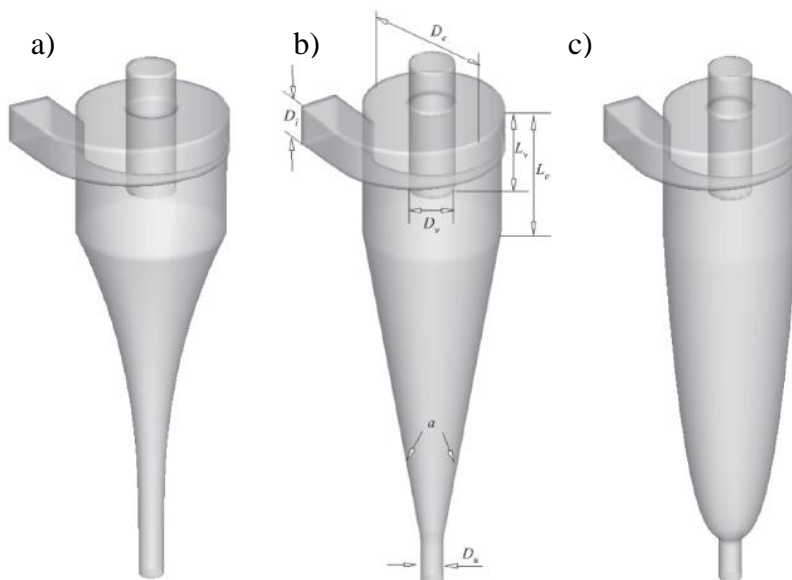


Figura 2.7 – Diferentes formas de seção cônica: a) côncava, b) tradicional, c) convexa (Adaptado: GHODRAT *et al.*, 2014b).

Os resultados mostraram que o desempenho do equipamento foi afetado pelo comprimento e a forma da seção cônica e também pela concentração da alimentação. Notou-se que nas configurações estudadas houve formação de *air core* apenas nos equipamentos operados com concentração diluída. Observou-se que a queda de pressão e o diâmetro de corte sofreram decréscimos com o aumento do comprimento do cone, ao passo que a razão de líquido foi majorada. Todavia, ao alimentar com uma maior concentração de sólidos nos equipamentos estes efeitos foram mais pronunciados (GHODRAT *et al.*, 2014b).

Por meio da simulação numérica pôde-se verificar que as partículas se acumularam próximo à saída de *underflow* independente da concentração de sólidos alimentada. Desse modo, ocorre o rápido decréscimo da velocidade tangencial e a redução drástica da região de separação de partículas, principalmente nos testes com alta concentração de sólidos suspensos. Portanto, em relação à forma do cone, côncavo ou convexo, o ponto ótimo de maximização da eficiência de separação se deu na configuração com cone convexo e longo. Devido ao maior comprimento do cone, a região de separação de alta velocidade tangencial é maior de modo que a passagem de finos para o *overflow* é impedida e o requerimento de energia baixo (GHODRAT *et al.*, 2014b).

#### 2.7.4. Alterações operacionais

Outra variante forma de operação de hidrociclones relatada é a inclinada. Hidrociclones inclinados são encontrados em plantas específicas de tratamento de minérios como nos chamados Ciclones de Meio Denso usados na separação de carvão. No passado, o uso do equipamento de forma horizontal, ao invés da usual posição vertical aumentou a eficiência devido à redução do curto circuito de partículas finas (HOCHSHEID, 1987). JOHNSTONE e RAIS (1988) observaram o mesmo usando inclinação de 45°. VAKAMALLA *et al.* (2014) estudaram por meio de métodos numéricos e experimentais, o efeito da inclinação do equipamento na performance de hidrociclones. Os autores averiguaram numericamente que a razão de líquido diminuiu e o diâmetro de corte aumentou com o aumento da inclinação, além disso, a queda de pressão e o *air core* diminuíram (VAKAMALLA *et al.*, 2014).

#### 2.7.5. Mini-hidrociclones

É possível incrementar a precisão de separação de partículas finas através da miniaturização de hidrociclones. Considerando que o diâmetro de corte diminui com a diminuição do diâmetro do equipamento, devido às maiores velocidades internas, os mini-hidrociclones são indicados para melhora da separação de partículas finas. São considerados mini-hidrociclones os que possuem diâmetro da parte cilíndrica menor ou igual a 10 mm (ZHU *et al.*, 2012). Como seu tamanho é reduzido, usualmente mini hidrociclones são conectados em paralelo para aumentar a capacidade de tratamento em unidades industriais, entretanto, encontrar o design ótimo é um dos desafios (HUANG *et al.*, 2013).

Para avaliar as características do fluxo e a eficiência de separação em mini-hidrociclones, ZHU *et al.* (2012) modelaram o escoamento do fluido em diferentes regimes (laminar, transiente e turbulento) num hidrociclone de 5 mm. A simulação numérica direta foi usada para investigar o fluxo no interior do equipamento para diferentes velocidades de entrada (0,1 – 0,4 m/s). Para altas velocidades de entrada houve diminuição do diâmetro de corte, resultando na melhora da separação de partículas. O acréscimo na velocidade de entrada forneceu altas velocidades tangenciais, e como consequência, aumentou a força centrífuga, viabilizando o transporte de uma grande quantidade de partículas para a parede do hidrociclone. A geração de um grande número de vórtices, estruturas típicas do escoamento turbulento, promoveu a recirculação de partículas próximo à parede do hidrociclone e ao *vortex finder*, contribuindo para a eficiência de coleta de finos (ZHU *et al.*, 2012).

HUANG *et al.*, (2013) propuseram um modelo matemático para prever a queda de pressão e a distribuição de fluxo em mini-hidrociclones. Os equipamentos foram construídos com diâmetro na parte cilíndrica de 5 mm e conectados em paralelo conforme Figura 2.8. Os resultados mostram que a pressão na entrada pode ser ajustada para garantir a distribuição uniforme do fluxo. Para validar o modelo matemático foram realizados testes experimentais (HUANG *et al.*, 2013).

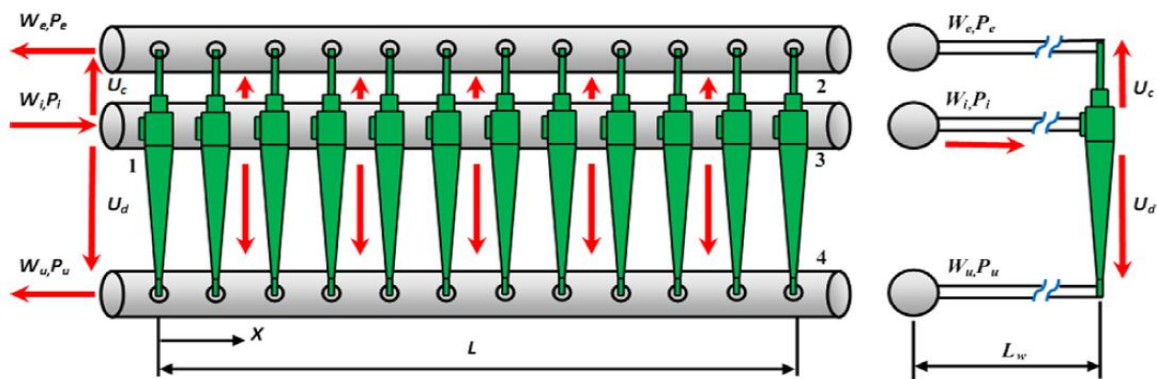


Figura 2.8 – Diagrama de um grupo de mini hidrociclones arranjados em paralelo: 1) mini hidrociclone; 2) saída de *overflow*; 3) alimentação; 4) saída de *underflow* (Adaptado: HUANG *et al.*, 2013).

YANG *et al.* (2013) propuseram um estudo fluidodinâmico (CFD) do aprimoramento da separação em mini-hidrociclones. Diferentes sentidos de alimentação foram avaliados de modo que a distribuição de tamanhos de partículas, ao longo da área transversal retangular de entrada de fluido, fosse alterada. A alimentação rotacional direita (PRM – *Positive Rotation Mini-hydrocyclone*) distribuiu as partículas do maior tamanho para o menor da parede externa do duto de alimentação para a interna, enquanto a alimentação rotacional reversa (RRM – *Reverse Rotation Mini-hydrocyclone*) estabeleceu a distribuição de partículas contrária à anterior. A Figura 2.9 ilustra o arranjo das partículas na entrada do hidrociclone para as diferentes rotações propostas por YANG *et al.* (2013).

Os resultados mostraram que as partículas próximas da parede e da parte inferior da entrada tenderam a seguir para o *underflow*, enquanto as partículas que entraram pela parte superior da entrada foram arrastadas para o fluxo de curto-circuito. Os autores concluíram que a área de melhor separação no mini-hidrociclone está localizada entre o *vortex finder* e a quarta parte superior do cone. A alimentação rotacional reversa (RRM), cuja distribuição de partículas cresce da parede para o interior, apresentou melhor eficiência (YANG *et al.*, 2013).



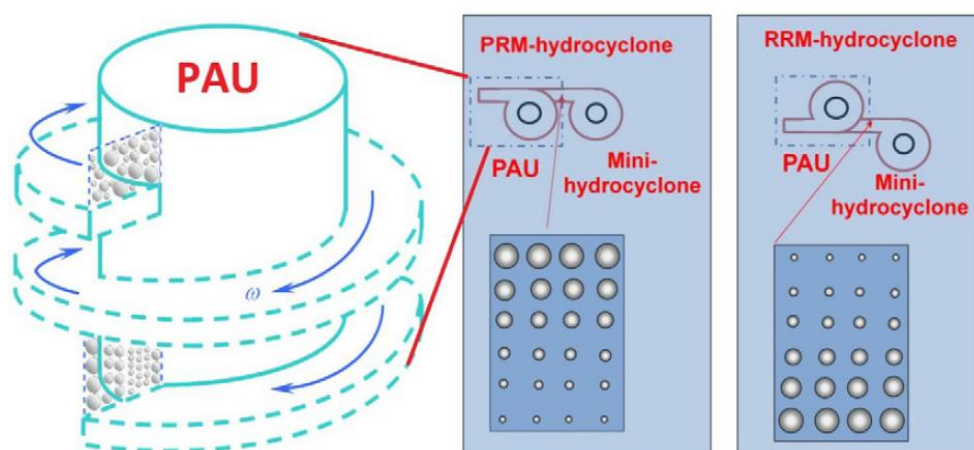


Figura 2.9 – Diagrama esquemático do arranjo de partículas (Adaptado: YANG *et al.*, 2013)

#### 2.7.6. Fenômenos inerentes ao escoamento

Com o intento de investigar o efeito da razão entre os diâmetros de *vortex finder* e de *underflow* no fenômeno de *air core*, XU *et al.* (2013) propuseram um estudo com uso de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para descrever o fluxo turbulento em hidrociclones. Os autores observaram que diferentes razões entre o diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ) e *underflow* ( $D_u$ ) levaram a diferentes estados estacionários do *air core*. Verificou-se que para a razão  $D_o/D_u$  maior que 1,8 o *air core* foi contínuo, entretanto, para esta razão igual a 1,2 não houve formação da coluna de ar.

Observando características inerentes ao escoamento em hidrociclones, CUI *et al.* (2014) estudaram o processo de formação do *air core* a partir de simulações numéricas (CFD) e experimentos. Os autores verificaram que nos estágios iniciais, a interface ar-líquido é muito instável até a instauração de um estado pseudo-estacionário. Notou-se que as velocidades tangencial e axial cresceram com o aumento da taxa de alimentação, e, devido à alta velocidade de rotação formou-se uma região de pressão negativa que caracteriza o *air core*. Pôde-se observar que o aumento do diâmetro de *overflow* reforçou a intensidade das velocidades ascendentes, portanto, segundo CUI *et al.* (2014), uma forma de prevenir a formação de *air core* está no uso de pequenos diâmetros de *underflow* e *overflow*.

WANG *et al.* (2015) estudaram numericamente os comportamentos de transição do escoamento em hidrociclones. A evolução do fluido e o movimento das partículas ao entrar no hidrociclone foram investigados através de experimentos e simulações multifásicas. Primeiramente, através da entrada superior, ocorreu o enchimento do equipamento com fluido.

De maneira simultânea, o ar existente saiu pelas extremidades até o completo enchimento de fluido. Devido ao efeito de sucção do fluido pelo *vortex* interno, novamente surgiu ar pelas extremidades de *overflow* e *underflow*, e então, formou-se um núcleo de ar através da união das duas extremidades até a completa estabilização do *air core*. Segundo os autores o impacto do fluido na região abaixo do *vortex finder* induziu a perda de energia neste local, que por sua vez possibilitou a formação do núcleo de ar.

Ainda estudando o desempenho de hidrociclones em relação às modificações no escoamento interior, ZHU e LIOW (2014) estudaram os efeitos: velocidade, forma e distribuição do tamanho de partículas e concentração da alimentação na resposta eficiência total em um mini-hidrociclone de 5 mm de diâmetro.

ZHU e LIOW (2014) verificaram que, para o mini-hidrociclone estudado, a eficiência total aumentou com a diminuição do tamanho de partículas, característica do efeito *fish hook*. Os autores observaram que o acréscimo da velocidade de entrada aumentou a velocidade das partículas maiores, as quais arrastaram as partículas pequenas para o *underflow*, aumentando a eficiência de finos. Surgiu então a hipótese de que a principal origem do *fish hook* esteve relacionada ao arraste de partículas pequenas pelas grandes, pois a presença de partículas grossas interferiu de forma intensa no escoamento das partículas finas. Quanto à esfericidade, as partículas esféricas apresentaram eficiência superior as não esféricas devido à simetria do escoamento ao redor da partícula que proporcionou maior força de arraste. Ainda foi possível observar que para suspensão com maior percentual de sólidos foram alcançados níveis inferiores de eficiência, pois como a distância entre partículas é menor a força de arraste também é reduzida (ZHU e LIOW, 2014).

Aprofundando os estudos sobre o efeito *fish hook*, ABDOLLAHZADEH *et al.* (2015) estudaram a influência do fator de forma, velocidade de entrada e da concentração da alimentação na classificação de partículas e no *fish hook* num mini-hidrociclone. A eficiência máxima ocorreu na maior velocidade de entrada, maior esfericidade e baixa concentração alimentada (ABDOLLAHZADEH *et al.*, 2015). Os autores desta pesquisa verificaram, assim como ZHU e LIOW (2014), que o *fish hook* é mais explícito em partículas esféricas.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAL PARTICULADO

O material utilizado nos experimentos foi o mineral “quartzito”. A amostra utilizada foi cedida pela ANEX Mineração S.A., sediada em Itabirito – MG, a qual determinou sua composição química através de análise em espectrômetro de raios X. Este material particulado é composto por aproximadamente 95% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 4% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e 1% de impurezas diversas. O quartzito é uma rocha ornamental metamórfica de estrutura cristalina densa e organizada. Foi escolhido neste trabalho por ser um material duro que apresenta resistência e estabilidade à quebra. Devido sua composição e arranjo interno pode ser usado como rocha estrutural na construção civil, no embasamento de aterros, como agregado para o concreto e composição de argamassas (SANTOS *et al.*, 2014). Além disso, a sílica, seu principal componente, é empregada como material básico na indústria de vidro, cerâmicas e refratários. Pode ser ainda aplicada como dessecante, absorventes, componentes catalisadores e componentes ópticos.

Com auxílio do densímetro *AccuPyc 1330* da *Micromeritics®*, a densidade do material foi determinada por meio da técnica de picnometria por deslocamento de gás hélio. O valor encontrado para a densidade real do quartzito foi de  $2690,0 \pm 0,5 \text{ kg/m}^3$ . Segundo testes preliminares realizados em peneiras da série Tyler (KYRIAKIDIS, 2014), a distribuição de tamanho de partículas do material *in natura* cobria uma extensa faixa (30  $\mu\text{m}$  a 1 mm).

Sabe-se que, a eficiência granulométrica aumenta com o tamanho de partícula (SVAROVSKY, 2000). Portanto, para que a eficiência dos hidrociclones não alcançasse valores sempre próximos a 100% e prejudicasse a análise do desempenho dos equipamentos, o material recebido teve que ser cominuído. Para tanto, foram realizadas bateladas de aproximadamente 3 kg de material em um moinho de bolas da FEQUI/UFU por cerca de 55 h, até que 63,2% das partículas estivessem com tamanho menor ou igual a 15  $\mu\text{m}$ . Vale mencionar que o moinho de bolas era dotado de um vaso cerâmico de 20 cm de diâmetro interno e 30 cm de altura, submetido a uma rotação de 23 rpm, fazendo uso de 75 bolas de cerâmica, cada qual com aproximadamente 4 cm de diâmetro.

Ao fim da etapa de moagem, o material particulado de todas as bateladas foi devidamente quarterado, homogeneizado e amostrado, cuja distribuição granulométrica característica do quartzito moído está representado pela Figura 3.1. A distribuição granulométrica foi determinada por meio de técnicas de difração a *laser* no equipamento *Mastersizer Microplus* da *Malvern*.

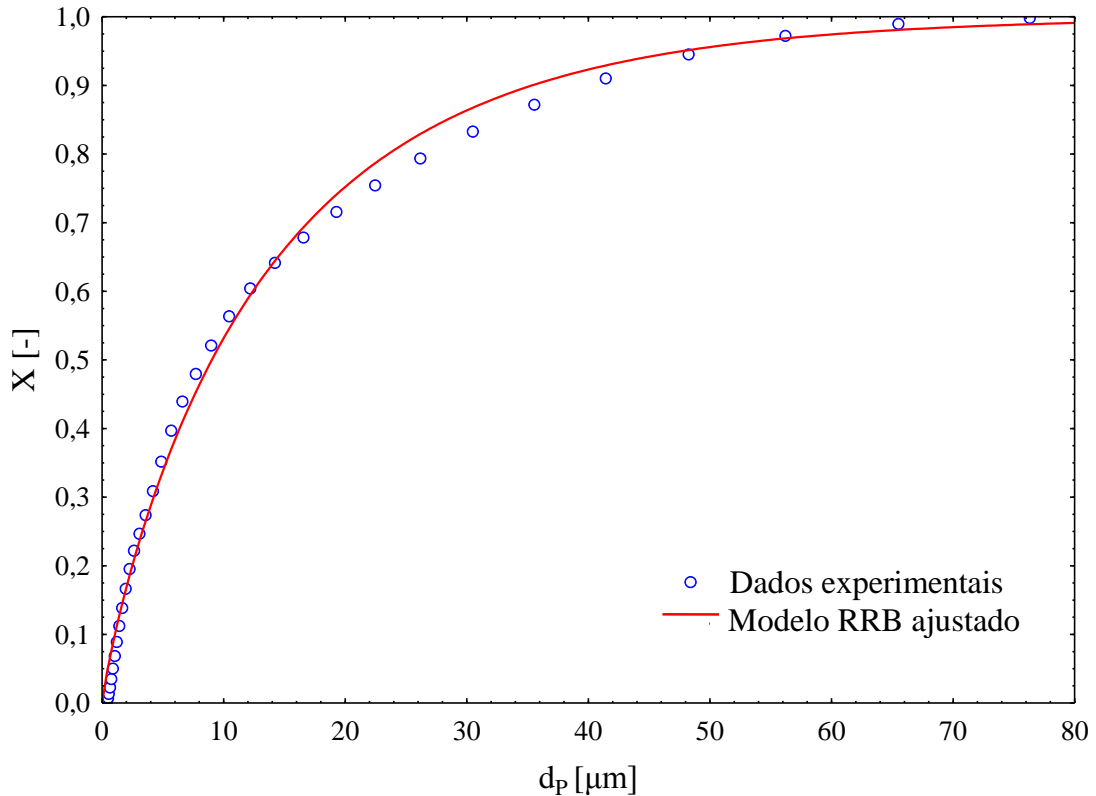


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica do quartzito moído.

O ajuste dos dados experimentais foi realizado com a ajuda do *software Statistica®*. A distribuição granulométrica do material moído enquadrou-se satisfatoriamente ao modelo de distribuição granulométrica RRB (*Rosin-Rammler-Bennet*) com parâmetros ajustados ao modelo  $d_{63,2}$  e  $n$  iguais a 13,70  $\mu\text{m}$  e 0,88, respectivamente, apresentando  $R^2$  de 0,99.

$$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{13,70} \right)^{0,88} \right] \quad (3.1)$$

### 3.2. UNIDADE EXPERIMENTAL

Previamente adquirida e montada, a unidade experimental empregada para realização dos experimentos está localizada no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI-UFU). A unidade era constituída de um reservatório (1) de aproximadamente 250 L com agitador mecânico (2) para garantir a homogeneidade da suspensão, uma bomba centrífuga (3) para fornecer energia de pressão ao sistema, um medidor eletromagnético de vazão (4) e um manômetro de *Bourdon* digital (5). Válvulas globo (g1) e gaveta (g2), usadas para ajustar a queda de pressão no hidrociclone foram instaladas nas linhas de *bypass* (B) e alimentação (A). O hidrociclone (6) era instalado logo após o manômetro, ao fim da linha de alimentação, conforme Figura 3.2. A descrição detalhada dos principais constituintes da unidade experimental encontra-se a seguir.

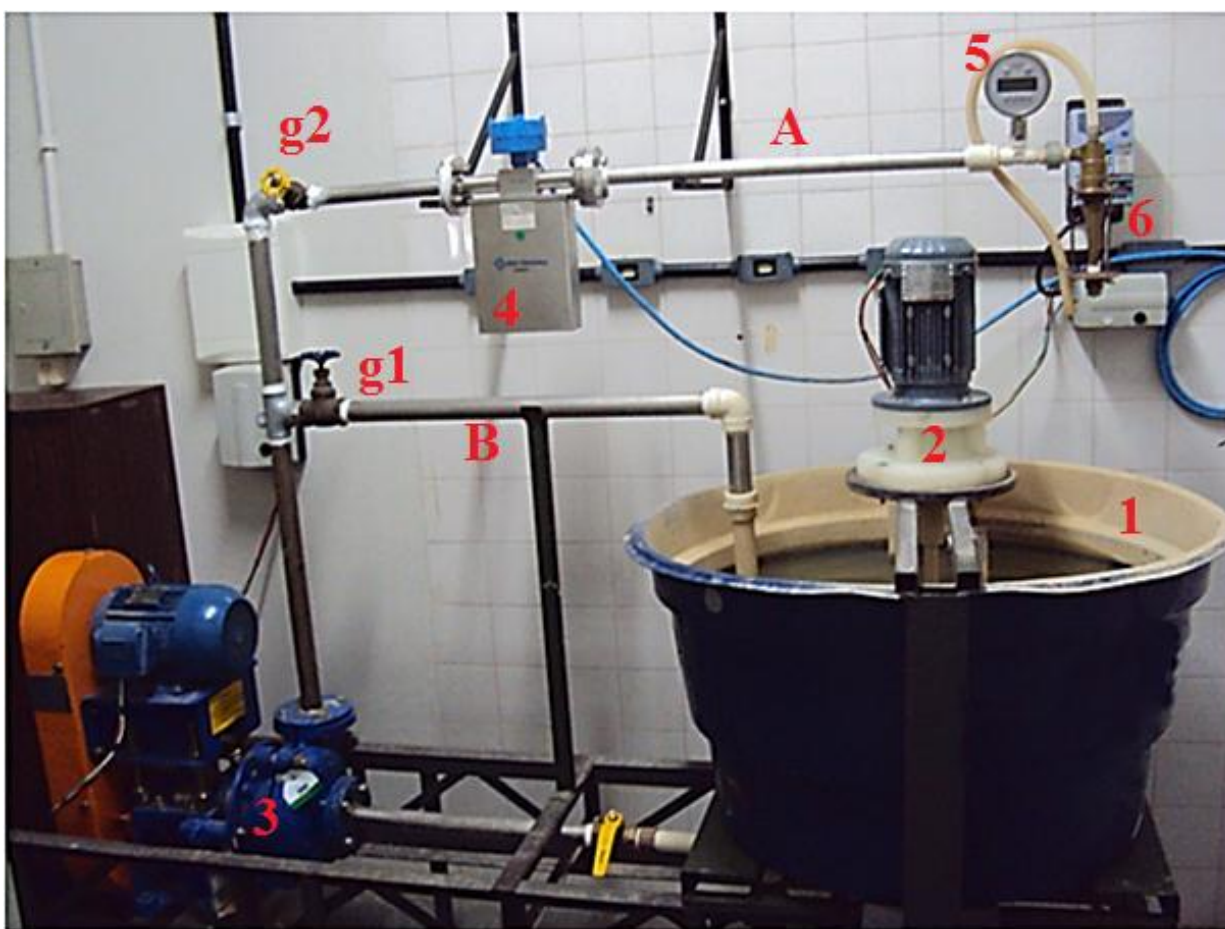


Figura 3.2 – Unidade experimental (Adaptado: SALVADOR, 2013)

### 3.2.1. Reservatório

A suspensão era armazenada em um tanque de polipropileno de 250 L, com volume útil de aproximadamente 90% de sua capacidade total. O circuito era fechado, o material que passava pelo processo de hidrociclonagem voltava para o reservatório e seguia novamente ao processo. Para que não houvesse depósito de material no fundo do tanque e a suspensão se mantivesse homogênea, um agitador mecânico de 1,5 cv, com inversor de frequência, operava entre 1600 e 2000 rpm. Além disso, um par de chicanas foi instalado para evitar a formação de vórtices.

### 3.2.2. Bomba Centrífuga

Para prover o adequado bombeamento da suspensão do tanque para o hidrociclone, uma bomba centrífuga de 5 cv da *Weir Minerals* com revestimento especial (modelo 1,5/1B-AH) foi instalada na unidade experimental para suportar a abrasividade da suspensão e garantir a faixa adequada de queda de pressão (0,88-1,77 bar) requerida durante o processo de hidrociclonagem.

### 3.2.3. Medidor de Vazão

A aferição da vazão mássica de suspensão na entrada do equipamento foi realizada através de um sensor de medição de vazão (*flowmeter*) do tipo Coriolis da *Metroval*, modelo RHM08-3FS1PN, conforme Figura 3.3. O equipamento de medição foi instalado na linha de alimentação e tinha um totalizador para leitura das vazões mássicas. A faixa operacional determinada era de 300 a 1800 kg/h e pressão suportada de até 15,5 bar.



Figura 3.3 – Medidor de vazão tipo Coriolis – (I) sensor instalado na linha de alimentação e (II) totalizador com *display* de dados. (Adaptado: SALVADOR, 2013)

### 3.2.4. Manômetro Digital

A queda de pressão do hidrociclone foi determinada por um manômetro de Bourdon Digital da marca *Zürich®*, instalado à montante do duto de alimentação do separador, com faixa operacional de 0 a 7 bar. As correntes de *overflow* e *underflow* eram descarregadas à pressão atmosférica.

## 3.3. HIDROCICLONES

Os dois equipamentos estudados neste trabalho - Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) e Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado (HCOF) - possuíam as mesmas dimensões geométricas do hidrociclone HFOT3 estudado por SILVA (2014), cuja finalidade era de minimizar os gastos energéticos. A Tabela 3.1 mostra as dimensões geométricas dos hidrociclones HCO e HCOF utilizadas no presente estudo.

Tabela 3.1 – Dimensões geométricas do hidrociclone HFOT3 otimizadas por SILVA (2014)

Dimensão geométrica	
Diâmetro da alimentação ( $D_i$ ) [mm]	7,8
Diâmetro de <i>overflow</i> ( $D_o$ ) [mm]	9,6
Diâmetro da parte cilíndrica ( $D_c$ ) [mm]	30
Comprimento da seção cilíndrica ( $h$ ) [mm]	157
Comprimento do tronco de cone ( $H$ ) [mm]	71
Comprimento de <i>vortex finder</i> ( $\ell$ ) [mm]	12
Ângulo do tronco de cone ( $\theta$ )	20°

Os hidrociclones foram montados de forma modular com auxílio de travas mecânicas e roscas. O formato intercambiável das peças do equipamento: alimentação, parte cilíndrica, parte cônica, alimentação, duto de *overflow* e *underflow*, possibilitou sua fácil montagem e rápida troca das partes variáveis de diâmetro de *underflow* e tronco de cone (parede filtrante e maciça).

O hidrociclone convencional (HCO) foi constituído de material impermeável enquanto o equipamento filtrante (HCOF) possuía parede cônica porosa de bronze sinterizado. Excluindo o cone filtrante, as partes de tamanho fixo dos hidrociclones foram manufaturadas de latão. Já os orifícios de *underflow* foram feitos de teflon, de modo a resistir à excessiva abrasão. O cone filtrante de bronze sinterizado passou previamente por processo de colmatação, e então foram



determinadas suas propriedades: permeabilidade ( $k$ ) e porosidade ( $\epsilon$ ) iguais a  $9,97 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  e 12,68%, respectivamente. Com a estrutura montada, as duas modalidades de equipamentos podem ser visualizadas através da Figura 3.4.



Figura 3.4 – (I) HCO, (II) HCOF.

### 3.4. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Foi proposto um planejamento experimental fatorial do tipo  $3^K$  com dois fatores para cada uma das modalidades de hidrociclone (HCO e HCOF). As duas variáveis, concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $C_{VA}$ ) e diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ), foram estudadas em três níveis igualmente espaçados:  $D_U$  nos níveis 3, 4 e 5 mm e  $C_{VA}$  nos níveis 1,0, 5,5 e 10,0%. As equações de codificação para concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $X1$ ) e para o diâmetro de *underflow* ( $X2$ ) estão apresentadas nas Equações 3.4.1 e 3.4.2 respectivamente.

$$X1 = \frac{(C_{VA}[\%v.] - 5,5)}{4,5} \quad (3.4.1)$$

$$X2 = \frac{(D_U[mm] - 4)}{1} \quad (3.4.2)$$



Os acessórios de teflon para o orifício de *underflow* utilizados nos experimentos estão mostrados na Figura 3.5.

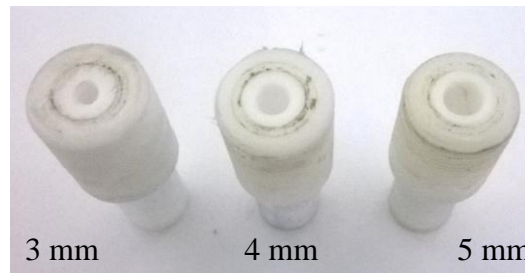


Figura 3.5 – Dutos de *underflow*. (Adaptado: KYRIAKIDIS, 2014)

Foram efetuados nove experimentos com combinações diferentes dos fatores  $C_{VA}$  e  $D_U$  para cada equipamento (HCO e HCOF). A Matriz de Planejamento experimental codificada, apresentada na Tabela 3.2, foi usada para execução dos experimentos. Os níveis codificados, -1, 0 e 1, foram usados para representar o menor, intermediário e o maior nível da variável a ser estudada, respectivamente.

Tabela 3.2 – Matriz de Planejamento para estudo dos efeitos de  $C_{VA}$  e  $D_U$  sobre o desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF

Experimento	$X1$	$X2$
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	0
6	0	+1
7	+1	-1
8	+1	0
9	+1	+1

### 3.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram conduzidos para quatro valores de queda de pressão absoluta: 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar. Tais níveis foram escolhidos devido ao histórico de experimentos desenvolvidos na FEQUI/UFU, realizados desde VIEIRA (2006) no estudo com hidrociclones filtrantes, seguido por SILVA (2012), SALVADOR (2013) e KYRIAKIDIS (2014).

Primeiramente foram efetuados os testes com a menor concentração de quartzito, a de 1,0% variando os dutos de *underflow*, para as duas modalidades de hidrociclones. Em seguida, foi acrescentado material ao tanque e realizados os testes para a concentração intermediária ( $C_{VA} = 5,5\% v.$ ). Ao final, foram adicionados aproximadamente 63 kg de quartzito moído ao tanque de suspensão aquosa para alcançar a concentração volumétrica de 10,0%. Destarte, os passos a seguir descrevem a rotina de testes para as quatro quedas de pressão em cada uma das nove combinações diferentes da Matriz de Planejamento, aplicada às duas modalidades de hidrociclones (HCO e HCOF).

Para realização dos experimentos, a suspensão era homogeneizada com auxílio do agitador mecânico. Antes do sistema ser colocado em funcionamento, o medidor de vazão eletromagnético e o manômetro digital eram ligados e certificados de que estavam no nível zero, ou seja, calibrados corretamente. Todavia, devida atenção era necessária para acionamento da bomba: certificar a abertura da válvula de saída de material do tanque de modo que a mesma se mantivesse afogada. Antes de ligar o sistema, a válvula de *by-pass* era totalmente aberta e a da alimentação mantida fechada. Após o cuidadoso acionamento da bomba, a alimentação era aberta gradativamente até que se fosse alcançada a queda de pressão pré-determinada. O controle da vazão era feito através da abertura/fechamento das válvulas de alimentação e *by-pass*.

Fixada a queda de pressão, iniciava-se o experimento com a aferição da temperatura da suspensão. Este procedimento era necessário para posterior determinação da viscosidade e densidade da mesma. As vazões de *underflow* eram tomadas através da pesagem de amostras e aferição do tempo de coleta das mesmas com auxílio de uma balança semi-analítica ( $\pm 0,01g$ ) e de um cronômetro digital ( $\pm 0,01s$ ); o mesmo procedimento era realizado para medir a vazão de filtrado quando os experimentos eram realizados com o HCOF. A vazão mássica alimentada era lida no *display* do medidor eletromagnético do tipo Coriolis.

Para análise gravimétrica, eram coletadas três amostras da corrente de *underflow* e duas da alimentação. Estas eram pesadas antes e depois de serem conduzidas à estufa por 24 h na temperatura de 105°C. Dessa forma, a massa de sólidos secos era determinada e então calculadas as concentrações mássica e volumétrica das correntes.

Previamente, foram feitos testes de calibração no medidor de vazão eletromagnético para verificar que a vazão alimentada lida no *display* era a soma das vazões do *underflow* e *overflow* aferidas por técnicas de gravimetria, o que garante o fechamento do balanço de massa. Eram coletadas alíquotas, em triplicata, da corrente de *underflow* e da alimentação para determinação das respectivas distribuições granulométricas. A análise do tamanho de partículas

foi feita através de técnicas de difração a *laser*, no equipamento *Mastersizer* da *Malvern*. Primeiramente, era realizada a leitura de uma amostra contendo apenas água destilada e dispersante (Calgon na concentração de 1 g/L), usado como referencial e comumente denominado de “branco”.

Para realização da análise, a alíquota coletada era adicionada ao béquer contendo o “branco”. A amostra era submetida ao banho ultrassônico para dispersão de possíveis aglomerados durante 30 s e então submetida à análise e posterior aquisição de dados pelo *Mastersizer*. Os dados obtidos eram enviados a uma planilha em que os diâmetros volumétricos das partículas eram relacionados às respectivas frações mássicas cumulativas.

Em seguida, os dados de distribuição granulométrica foram tratados no *software Statistica®* de modo que os parâmetros do modelo RRB,  $n$  e  $d_{63,2}$ , para as correntes de alimentação e *underflow*, foram estimados através de regressão não-linear.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A obtenção das principais informações experimentais para execução do planejamento experimental proposto para esta Dissertação possibilitou o cálculo das respostas relacionadas à hidrociclonagem expostas no Capítulo 2. Para determinação do desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF, os resultados experimentais obtidos foram analisados através de gráficos e de Técnicas de Superfície de Resposta.

Para avaliar os efeitos de concentração e diâmetro de *underflow* do planejamento fatorial a três níveis, foram consideradas as respostas médias calculadas para as quatro quedas de pressão utilizadas. Este procedimento foi adotado porque o comportamento fluidodinâmico dos equipamentos distinguia-se apenas quantitativamente em relação às variáveis calculadas. Assim, foi possível comparar de forma qualitativa o desempenho médio dos hidrociclones. Porém, os resultados experimentais para todas as quedas de pressão estão apresentados detalhadamente nos Apêndices A e B para os hidrociclones HCO e HCOF, respectivamente.

As Superfícies de Respostas para número de Euler, eficiência total e razão de líquido contribuíram para avaliar o desempenho dos hidrociclones e, enfim, para sugerir uma condição ótima de operação. Tais Superfícies foram construídas com auxílio do *software Statistica®*, considerando significativos apenas os efeitos com nível de significância menor ou igual a 10%.

A fim de avaliar o efeito da filtração, foi proposto um teste de hipóteses para comparar estatisticamente o desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF em relação ao gasto energético, classificação de partículas e eficiência de separação. Além disso, foi possível propor as equações de projeto e curvas de eficiência para os hidrociclones estudados neste trabalho, segundo a metodologia de MASSARANI (1989). Por fim, uma sucinta comparação entre os hidrociclones desta Dissertação e um hidrociclone Rietema foi realizada, exatamente por estes últimos serem tradicionalmente conhecidos como bons concentradores e com Números de Euler relativamente baixos.

## 4.1. DESEMPENHO DO HIDROCICLONE CONCENTRADOR OTIMIZADO

A avaliação do desempenho do Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) foi realizada através da determinação experimental das respostas número de Euler ( $Eu$ ), eficiência total ( $\eta$ ), diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ), razão de líquido ( $R_L$ ) e concentração volumétrica de sólidos no *underflow* ( $C_{vu}$ ), registradas no Apêndice A, frente aos fatores concentração da alimentação ( $C_{VA}$ ) e diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ). Foram construídas Superfícies de Resposta de modo a estudar os efeitos lineares, quadráticos e de interação dos fatores: diâmetro do orifício de *underflow*, de 3 a 5 mm, e concentração de material particulado, de 1,0 a 10,0% v. Dessa forma, foi possível estimar o desempenho do HCO em relação ao gasto energético, eficiência de separação e concentração da corrente de *underflow*.

### 4.1.1. Capacidade de Processamento

A vazão volumétrica de alimentação é uma variável importante no processo de hidrociclonagem, pois quantifica a capacidade de processamento do equipamento. É de se esperar que, quanto maior a queda de pressão no hidrociclone maior é também a entrada de suspensão devido ao aumento no fornecimento de energia sob a forma de pressão. A Figura 4.1 ilustra este comportamento através dos resultados obtidos de vazão de alimentação ( $Q$ ) nas condições de queda de pressão ( $-\Delta P$ ) estudadas frente às variações do diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ), para o nível de concentração de alimentação intermediário ( $C_{VA} = 5,5\%$  v.).

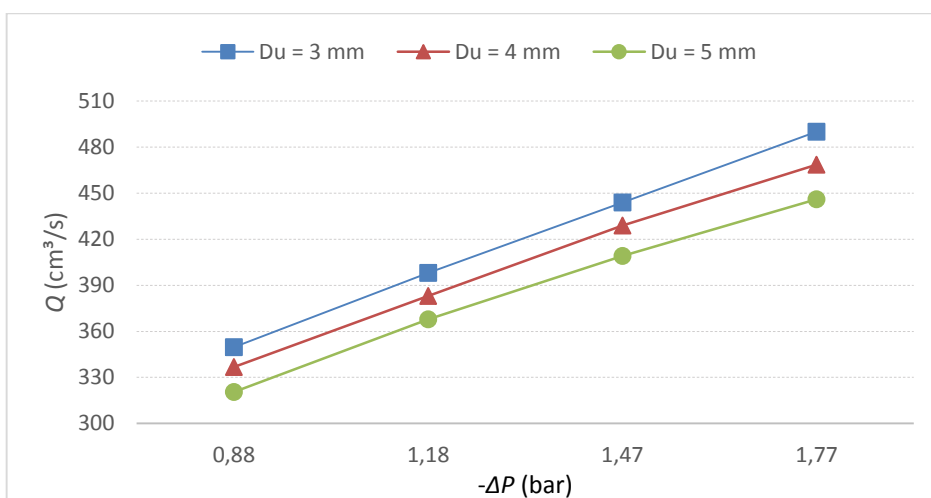


Figura 4.1 – Capacidade de processamento ( $Q$ ) do HCO em função do diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e da queda de pressão ( $-\Delta P$ ).

Observa-se na Figura 4.1 que incrementos na queda de pressão contribuíram para o aumento da vazão alimentada, assim como esperado. É interessante observar que, para a condição de maior restrição ao escoamento, quando usado diâmetro de *underflow* de 3 mm, a capacidade de operação do equipamento foi maior que nas outras condições. Ao se passar da condição de 3 mm de *underflow* para 4 mm, houve um decréscimo de aproximadamente 5% na vazão alimentada, assim como quando o orifício de *underflow* foi alterado de 4 para 5 mm. Era de se esperar que a imposição de restrição ao escoamento na base do troco de cone (menor orifício de *underflow*) diminuísse a capacidade de processamento do equipamento devido à maior perda de carga, entretanto o oposto foi observado. Este comportamento anômalo pode ser justificado devido à combinação de efeitos relacionados à diferente ordem de grandeza do *vortex finder* ( $\ell = 12$  mm) e do comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone ( $L = 157$  mm) e da geometria otimizada do equipamento, entretanto, uma melhor investigação da origem deste efeito pode ser realizada com o uso de técnicas de fluidodinâmica computacional.

Na Figura 4.2 é mostrada a capacidade de processamento do hidrociclone HCO frente a variação da concentração da alimentação ( $C_{VA}$ ) fixado o nível intermediário da variável diâmetro de *underflow* igual a 4 mm.

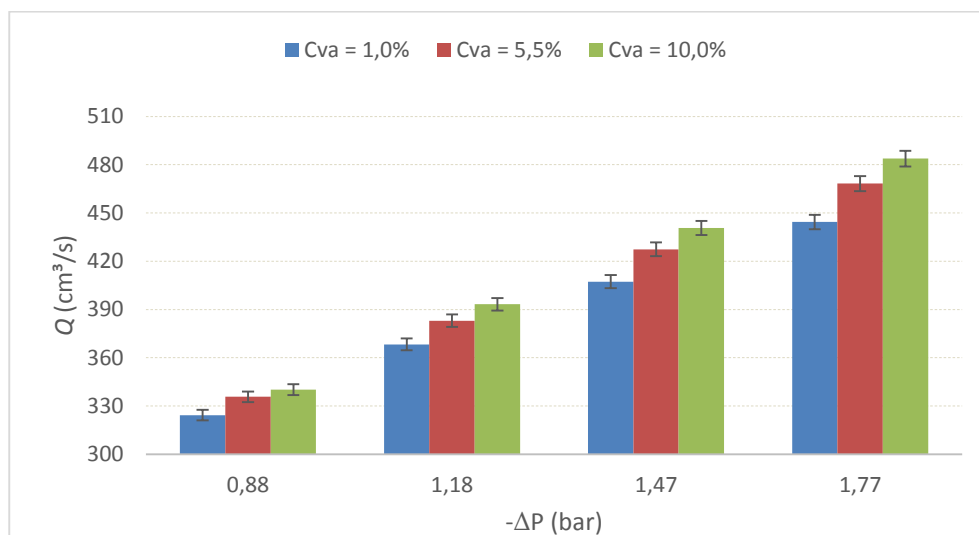


Figura 4.2 – Capacidade de processamento ( $Q$ ) do HCO em função da concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ) e da queda de pressão ( $-\Delta P$ ).

Novamente, através da Figura 4.2, pode-se observar que a capacidade de processamento do hidrociclone aumentou com o incremento da queda de pressão. Ao se passar da condição de 0,88 para 1,77 bar, verificou-se aumento médio de 40% na vazão alimentada,

para todas as concentrações avaliadas, ou seja, independentemente da quantidade de sólidos na alimentação.

Em relação à variação da concentração de alimentação do hidrociclone, incrementos na concentração volumétrica de sólidos aumentaram a vazão volumétrica alimentada. Ao se passar da condição de concentração de sólidos de 1,0 para 10,0% em volume, no nível de queda de pressão de 0,88 bar, houve acréscimo de aproximadamente 6% na vazão alimentada, enquanto no nível de 1,77 bar o acréscimo foi maior, na ordem de 11%.

Estudos numéricos anteriores comprovam que aumento da concentração de partículas aumenta a queda de pressão nos hidrociclones, e este efeito é mais intenso quanto menor a parte cônica do equipamento (GHODRAT *et al.*, 2014b). Também foi observado em estudos experimentais com ciclones a gás, conduzidos com concentração de sólidos de até 4 Kg de sólidos por Kg de gás, que acima de um valor crítico para a concentração de sólidos a queda de pressão aumenta linearmente com o aumento da quantidade de partículas pois elas se agrupam ao longo da parede do equipamento e sua interação com o fluido diminui; abaixo deste valor crítico o aumento da concentração de sólidos aumenta o choque das partículas com a parede do equipamento e o movimento rotacional do fluido se apassiva resultando na diminuição da queda de pressão (BAKASKOV *et al.*, 1990; LI *et al.*, 2007).

Pode-se dizer que, a capacidade de processamento do hidrociclone HCO foi favorecida através do aumento da concentração de sólidos na alimentação, da diminuição do orifício de *underflow* e acréscimos na queda de pressão. Portanto, no maior nível de queda de pressão estudado (1,77 bar), concentração de 10,0% de sólidos em volume e diâmetro de *underflow* de 3 mm a vazão volumétrica do hidrociclone HCO chegou a aproximadamente 500 cm<sup>3</sup>/s.

#### 4.1.2. Número de Euler

Destaca-se que a geometria selecionada neste estudo foi resultado da otimização realizada por SILVA (2014) para minimização do número de Euler. Portanto, baixos níveis dessa resposta foram alcançados, confirmando seu caráter de mínimo consumo energético e alta capacidade de operação.

O número de Euler do HCO foi calculado experimentalmente para as quedas de pressão de 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar. Para avaliar apenas os efeitos das variáveis diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ) no consumo energético, foi calculada a média dos valores de Euler segundo as quatro quedas de pressão, cujos valores podem ser vistos na Figura 4.3.

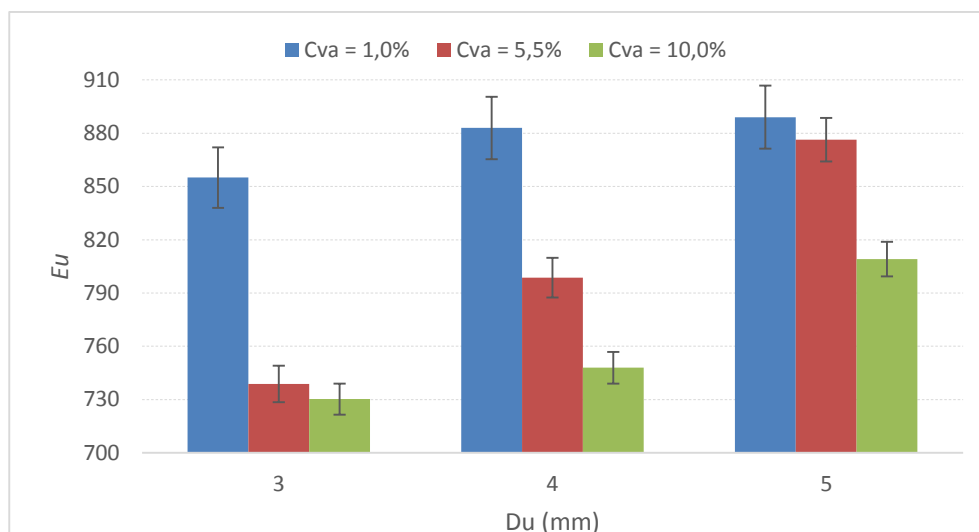


Figura 4.3 – Número de Euler ( $Eu$ ) do HCO em função do diâmetro de underflow ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ).

De acordo com a Figura 4.3, os resultados experimentais médios para o número de Euler estiveram entre 730 e 889, o que comprova seu caráter de baixo gasto energético, independente das condições das variáveis estudadas. A título de comparação, o hidrociclone Rietema, conhecido por apresentar baixo gasto energético, possui número de Euler de 1200.

Notou-se que a diminuição do orifício de *underflow* proporcionou decréscimos no número de Euler em todas as concentrações estudadas. De igual maneira o acréscimo do percentual de sólidos alimentado diminuiu o consumo energético. Resultados condizentes com a resposta capacidade de processamento (seção 4.1.1) que é inversamente proporcional ao número de Euler.

Através da Figura 4.3, observou-se que ao se passar do menor nível de concentração de sólidos para o maior nível foram observados decréscimos do número de Euler de até 15%. O mínimo gasto energético ocorreu no menor nível de  $D_U$  e máxima  $C_{VA}$ , ou seja, na maior restrição ao escoamento (3 mm) a partir da maior quantidade de sólidos alimentada (10,0% v.).

ALMEIDA (2008), SALVADOR (2013) e KYRIAKIDIS (2014) verificaram nas geometrias estudadas pelos respectivos autores que decréscimos no diâmetro de *underflow* contribuíram para o aumento do número de Euler em virtude da perda de carga associada a restrição ao escoamento da corrente de *underflow*. Todavia, observou-se que o HCO apresentou comportamento diferente, de modo que o aumento da restrição ao escoamento reduziu o gasto energético. Acredita-se que este resultado inesperado tenha procedência a partir da geometria distinta do equipamento otimizado.



A Figura 4.4 representa a superfície de resposta para o número de Euler, gerada a partir da Equação de Regressão – Equação (4.1).

$$Eu = 716,47 - 12,59 C_{VA} + 41,74 D_U \quad (4.1)$$

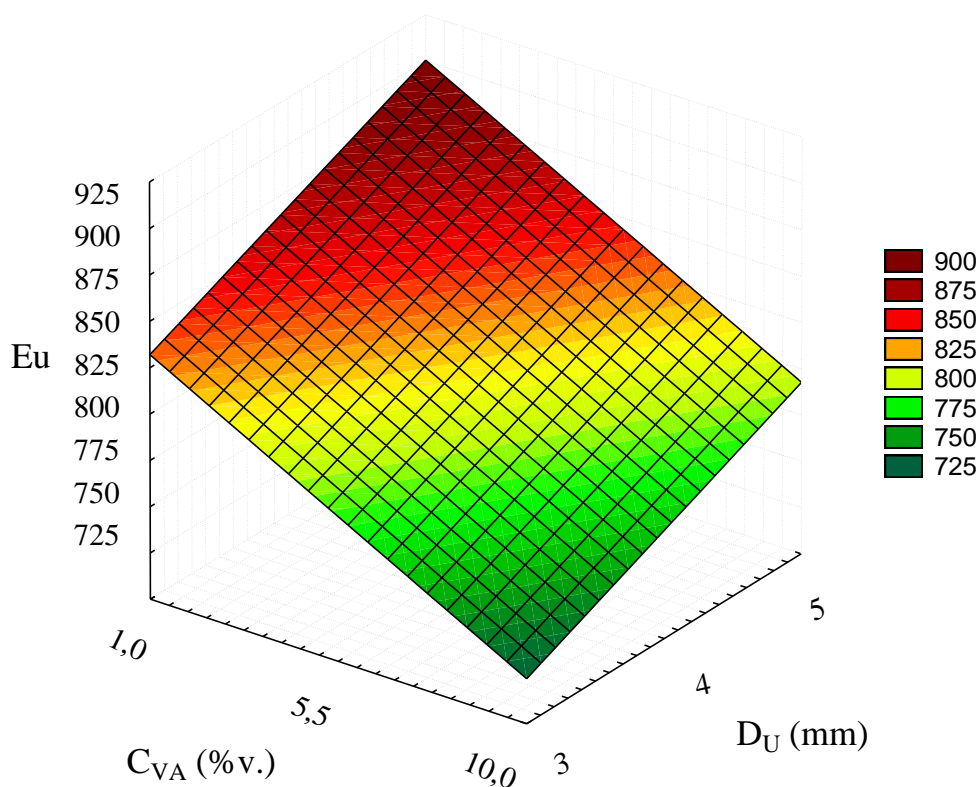


Figura 4.4 – Superfície de Resposta para o número de Euler do hidrociclone HCO.

Para este ajuste, o coeficiente de correlação linear ajustado (R) foi de 0,93. Observa-se, através da Equação 4.1, que não houve interação entre fatores, a concentração volumétrica apresentou efeito negativo enquanto o diâmetro de *underflow* efeito positivo no número de Euler. Este comportamento é melhor visualizado através da Figura 4.4, de modo que é possível concluir que o aumento da concentração da alimentação e a diminuição do orifício de *underflow* provocam o decréscimo do número de Euler. Portanto, a região de mínimo gasto energético se deu na maior concentração alimentada de 10,0%v. e no menor diâmetro de *underflow*, 3 mm.

### 4.1.3. Eficiência Total

Para expor com clareza a influência dos fatores estudados na eficiência do HCO, apenas a média dos valores encontrados, para cada uma das quedas de pressão, será apresentada. Assim, para avaliar o efeito das variáveis, diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração da alimentação ( $C_{VA}$ ) na separação de sólidos no hidrociclone, os resultados experimentais médios para a Eficiência Total estão mostrados na Figura 4.5.

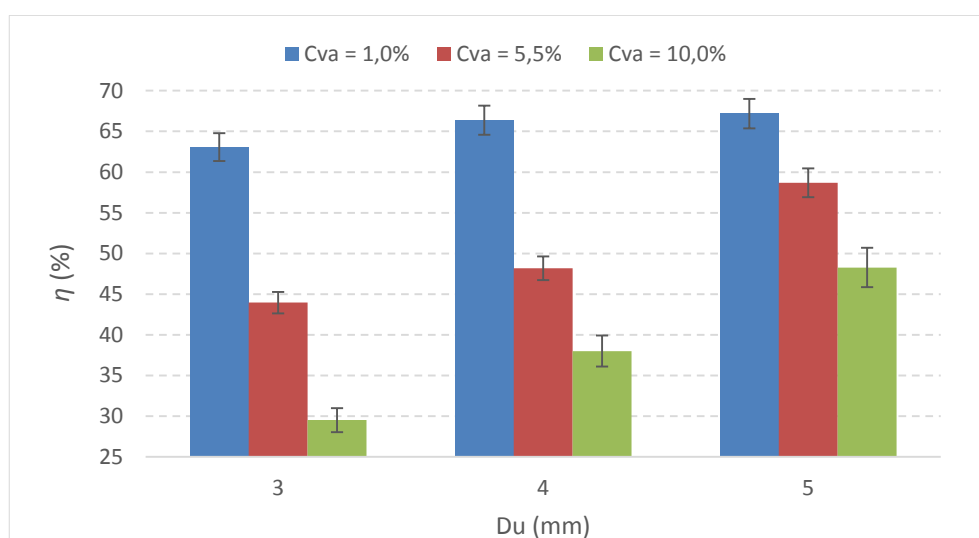


Figura 4.5 – Eficiência Total ( $\eta$ ) do HCO em função do diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ).

De acordo com os resultados experimentais, foi possível verificar que o aumento do percentual de sólidos na alimentação diminuiu a eficiência de separação, assim como evidenciado na literatura (SVAROVSKY, 2000). Para o diâmetro de *underflow* de 3 mm, houve um decréscimo médio de cerca de 53% na eficiência ao se passar da menor concentração (1,0%v.) para a máxima concentração estudada (10,0%v.). Este decréscimo percentual foi menor para o diâmetro de *underflow* de 5 mm, porém ainda pronunciado, de aproximadamente 28%.

Sabe-se que para alcançar melhor separação de sólidos é preferível trabalhar com suspensões diluídas (SVAROVSKY, 2000). O HCO quando operado com suspensão de quartzito a 1,0%v. apresentou valores de eficiência razoáveis, entre 63 e 67%. Nos experimentos conduzidos com  $C_{VA}$  igual a 10,0%v., a eficiência alcançou valor máximo na condição de menor restrição ao escoamento no *underflow* ( $D_U = 5$  mm), cerca de 48%. Vale

ressaltar que para este trabalho foram utilizadas partículas finas, para que a eficiência ficasse em menores valores e fosse assim possível evidenciar melhor o efeito das variáveis estudadas.

Para cada concentração estudada, menores níveis de eficiência foram alcançados nos testes realizados com o menor orifício de *underflow*, já que uma menor quantidade de fluido, responsável pela separação, é descarregada na corrente de *underflow*. Portanto, se for necessário trabalhar com suspensões concentradas e, porventura, sua diluição não for viável, é preferível utilizar o maior nível da variável diâmetro de *underflow* (5 mm) para se obter valores razoáveis para eficiência total.

A Superfície de Resposta para a eficiência total está mostrada na Figura 4.6 e a Equação de Regressão que define as interações entre fatores está expressa na Equação 4.2, cujo coeficiente de correlação linear (R) foi de 0,98. Para esta resposta, existiu um efeito de interação entre as variáveis concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ) e diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ).

$$\eta = 61,08 - 3,28 C_{VA} - 1,73 D_U + 0,82 C_{VA}D_U \quad (4.2)$$

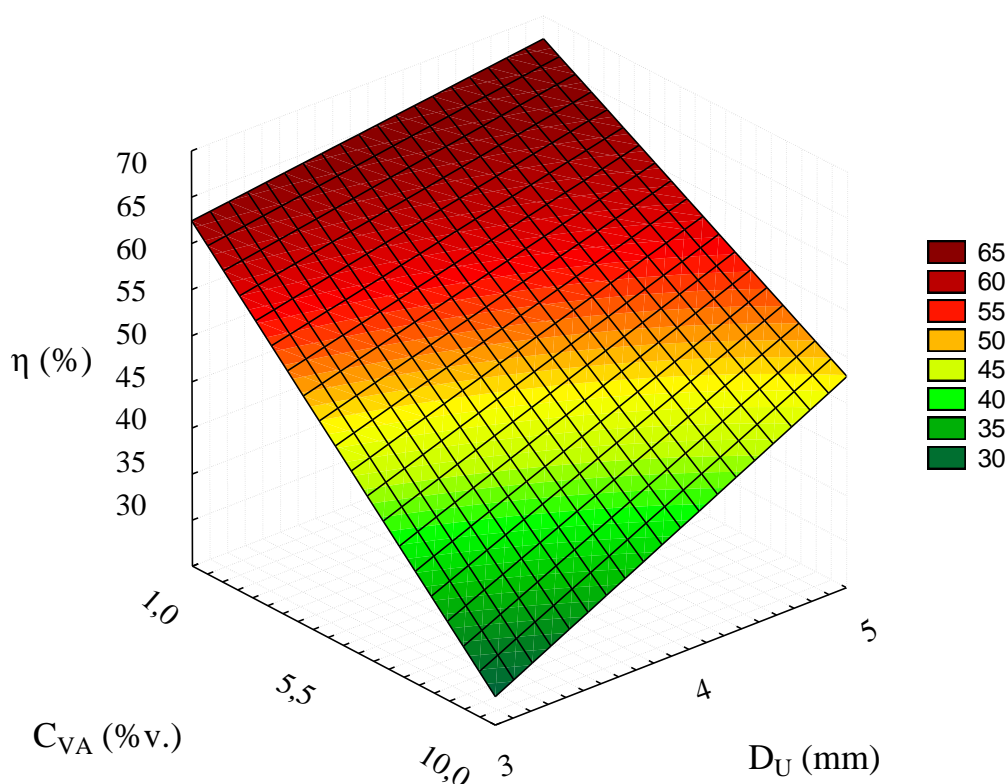


Figura 4.6 – Superfície de Resposta para a Eficiência Total ( $\eta$ ) do hidrociclone HCO.

Neste caso, foram significativos os efeitos lineares e de interação entre os fatores  $D_U$  e  $C_{VA}$ . A máxima eficiência alcançada deu-se na condição de maior diâmetro de *underflow* combinada com a alimentação mais diluída em sólidos (1,0% v.).

Observa-se na menor concentração alimentada que a restrição ao escoamento diminuiu suavemente a eficiência em aproximadamente 6%. Por sua vez, na condição de concentração maior ( $C_{VA} = 10,0\%$  v.) esse decréscimo da eficiência foi mais pronunciado (39%). A presença de muitas partículas na suspensão reduz substancialmente a velocidade terminal uma das outras, como salientado por MASSARANI (2001) e (SVAROVSKY, 2000), levando ao rápido decréscimo na eficiência total.

#### 4.1.4. Diâmetro de corte

Ainda para avaliar o poder de classificação do hidrociclone HCO, o diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e o diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) foram calculados através de uma rotina de cálculo no *software Excel®*. Na Figura 4.7 são apresentados os valores de diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) médio em relação às quatro quedas de pressão, em função das variáveis diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração da alimentação ( $C_{VA}$ ).

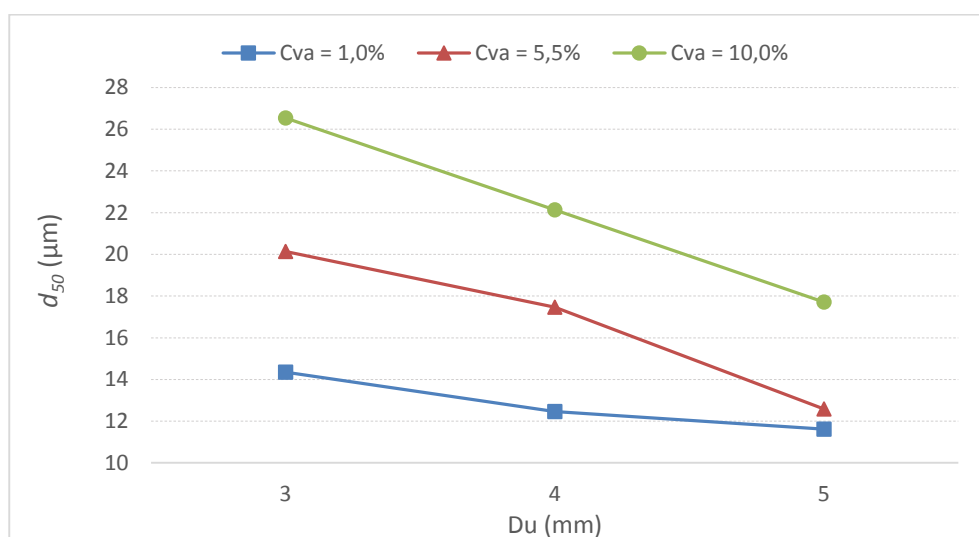


Figura 4.7 – Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do HCO em função do diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ).

De acordo com os resultados para a eficiência total (Figura 4.5), era de se esperar que nos ensaios com suspensão aquosa a 10,0% v., o diâmetro de corte fosse superior em relação às outras condições da alimentação, como foi observado na Figura 4.7, haja vista que a eficiência

é inversamente proporcional ao diâmetro de corte. Quando a eficiência diminui, significa que uma maior parcela de partículas finas foi arrastada para a corrente de *overflow*.

Conforme a Figura 4.7, notou-se que o acréscimo da variável diâmetro de *underflow* e a diminuição da concentração de sólidos proporcionaram a diminuição na resposta diâmetro de corte ( $d_{50}$ ), assim como o aumento da eficiência do separador indicado na seção anterior.

Os resultados experimentais de diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) seguem a mesma tendência dos diâmetros de corte ( $d_{50}$ ), porém são maiores porque contabilizam apenas o efeito centrífugo do separador. Estão apresentados no Apêndice B apenas para fins de registro.

O diâmetro de corte do HCO foi influenciado linearmente pelos fatores  $D_U$  e  $C_{VA}$  e também pela interação dos mesmos conforme a Equação 4.3, cujo coeficiente de correlação linear ajustado foi igual a 0,97. Na Figura 4.8 está ilustrada a superfície de resposta para o diâmetro de corte.

$$d_{50} = 15,45 + 1,56 C_{VA} - 0,97 D_U - 0,39 C_{VA} D_U \quad (4.3)$$

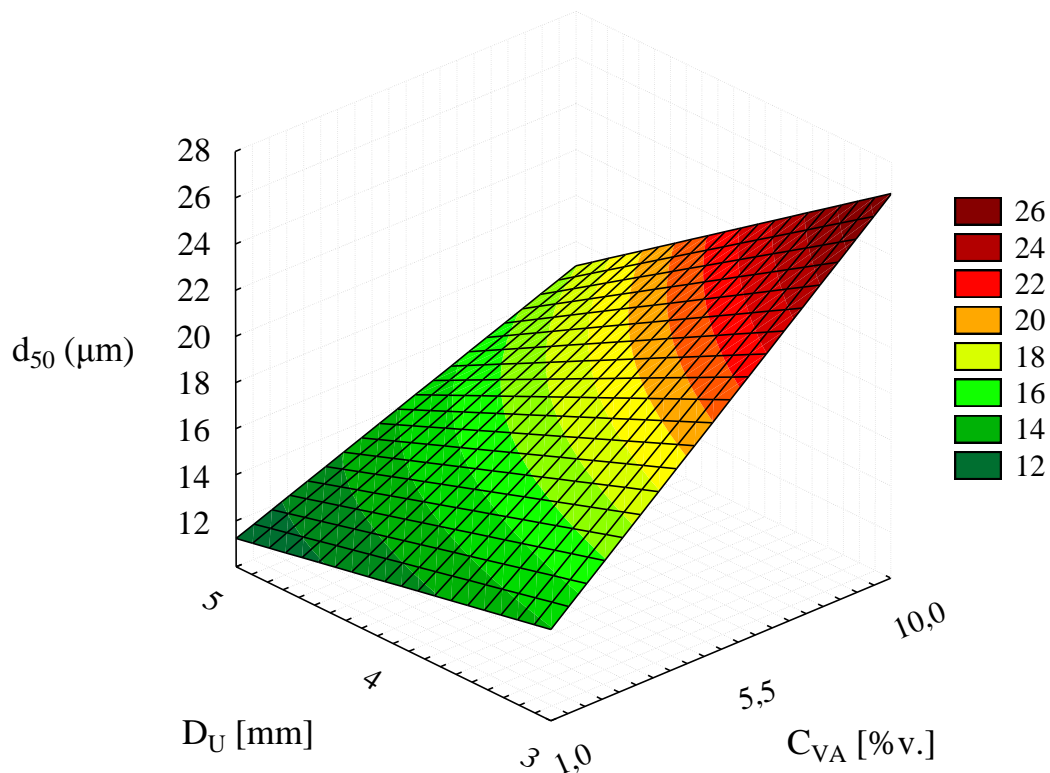


Figura 4.8 - Superfície de Resposta para o Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do hidrociclone HCO.

Menores valores para o diâmetro de corte são almejados, pois aumentam a probabilidade de partículas finas serem coletadas no *underflow*. A diminuição do percentual volumétrico de sólidos alimentado provocou decréscimo acentuado do diâmetro de corte. Através da Figura 4.8, pode-se afirmar que o mínimo diâmetro de corte obtido se deu na configuração com  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

#### 4.1.5. Razão de Líquido

Por meio da razão de líquido é possível avaliar o potencial de separação do hidrociclone. Esta variável é quantificada pela razão entre o volume de líquido que é descarregado na corrente de *underflow* e o montante alimentado. Quando são desejadas correntes de *underflow* concentradas, a razão de líquido deve ser mínima. A Figura 4.9 representa a resposta média de razão de líquido do HCO, considerando os dados experimentais médios das quatro quedas de pressão.

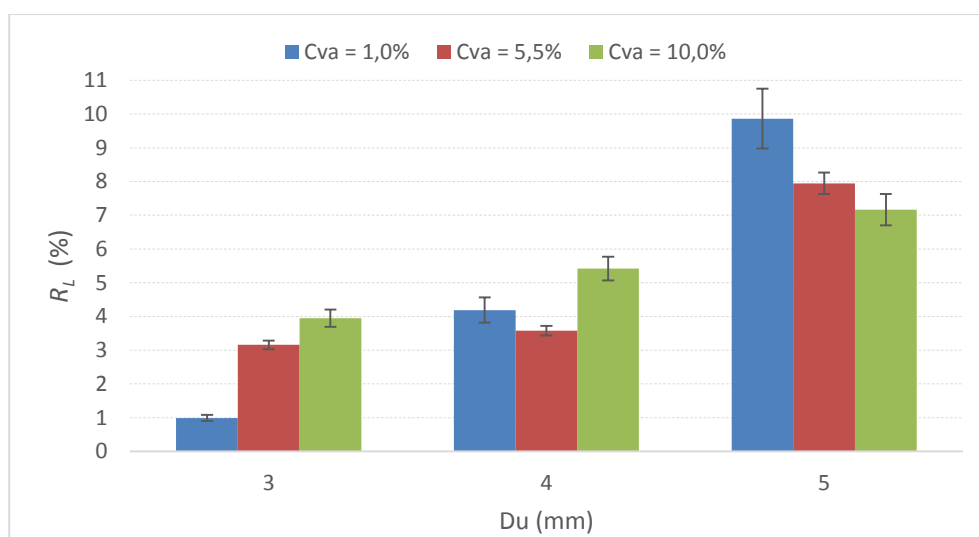


Figura 4.9 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) do HCO em função do diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ).

Em geral, conforme Figura 4.9, todas as configurações testadas retornaram baixos valores da razão de líquido que estiveram entre o mínimo de 0,9% para  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v., e o máximo de 9,9%, para  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v. Observa-se que o aumento do diâmetro de *underflow* aumentou a razão de líquido, pois o incremento da abertura contribuiu para a saída de líquido pelo duto de *underflow*.

Em relação à concentração da alimentação, o comportamento foi variável: para o diâmetro de *underflow* de 3 mm o acréscimo do percentual de sólidos na alimentação aumentou a razão de líquido; para o nível intermediário de  $D_U$ , a razão de líquido esteve num patamar entre 4 e 5,5%; e no maior orifício de *underflow* estudado,  $D_U = 5$  mm, a razão de líquido diminuiu com o acréscimo na concentração da alimentação. Existiu, portanto, um efeito combinado entre os fatores  $D_U$  e  $C_{VA}$ .

Para avaliar os efeitos lineares, quadráticos e de interação entre os fatores  $D_U$  e  $C_{VA}$  tem-se a Equação 4.4, cujo coeficiente de correlação linear (R) foi de 0,97. Na Figura 4.10 é exibido o comportamento da superfície de resposta para a razão de líquido do HCO.

$$R_L = 3,92 + 1,26C_{VA} - 4,32D_U + 1,11D_U^2 - 0,32C_{VA}D_U \quad (4.4)$$

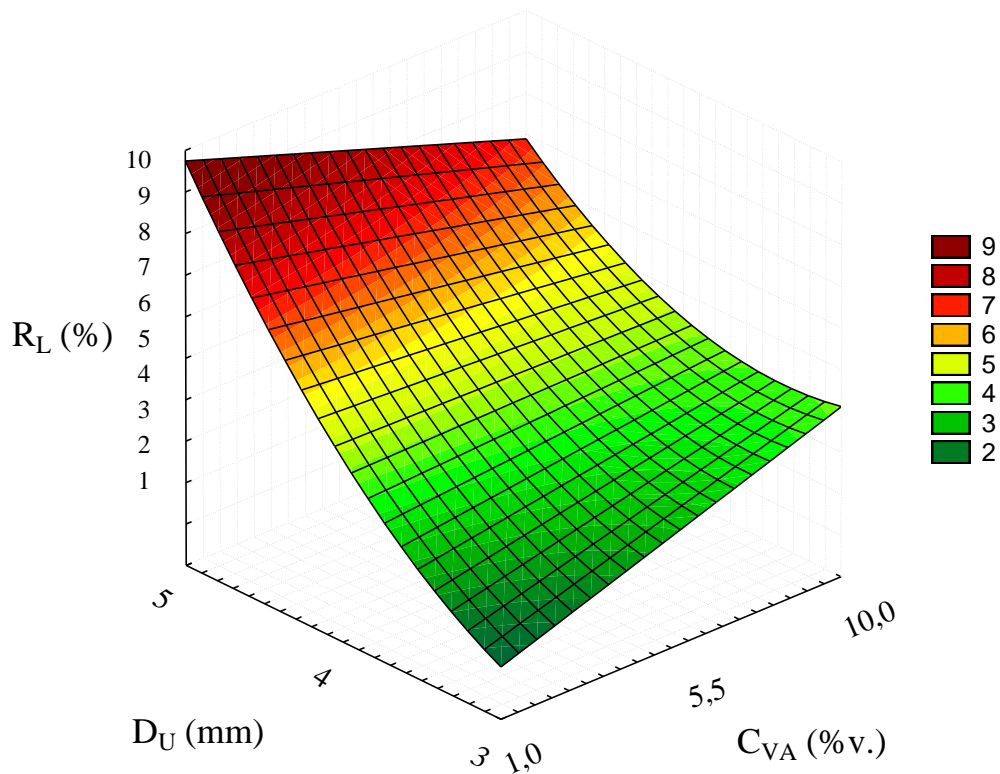


Figura 4.10 – Superfície de Resposta para o Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do hidrociclone HCO.

Ainda, pode-se afirmar que a razão de líquido esteve diretamente ligada ao diâmetro do orifício de *underflow*, em virtude do maior valor associado à variável  $D_U$  na Equação 4.6. De acordo com a Figura 4.10, em decorrência do aumento de  $C_{VA}$ , a razão de líquido é crescente no menor nível de  $D_U$ , passando de 0,9% para 3,9%, e é decrescente no maior nível de  $D_U$ ,

passando de 9,9% para 7,2%. Os efeitos quadráticos e de interação entre os fatores justificam esse comportamento.

Nos menores níveis de diâmetro de *underflow* e de concentração da alimentação foram alcançadas menores razões de líquido, e por consequência, a corrente de *underflow* foi mais concentrada. Todavia, em virtude da diminuição do orifício de *underflow*, a recuperação de sólidos alimentados é sacrificada, pois parte dos sólidos é perdida no *overflow*, característica observada anteriormente nos tópicos 4.1.3 e 4.1.4. Por esse motivo, na hidrociclonagem as operações unitárias de clarificação e espessamento não ocorrem ao mesmo tempo (SVAROVSKY, 2000).

#### 4.1.6. Concentração da corrente de *underflow*

A partir dos dados experimentais da concentração da corrente de *underflow*, pôde-se avaliar o poder de espessamento do hidrociclone HCO. Na Figura 4.11 são transcritos os resultados médios para as concentrações volumétricas de sólidos na corrente de *underflow*.

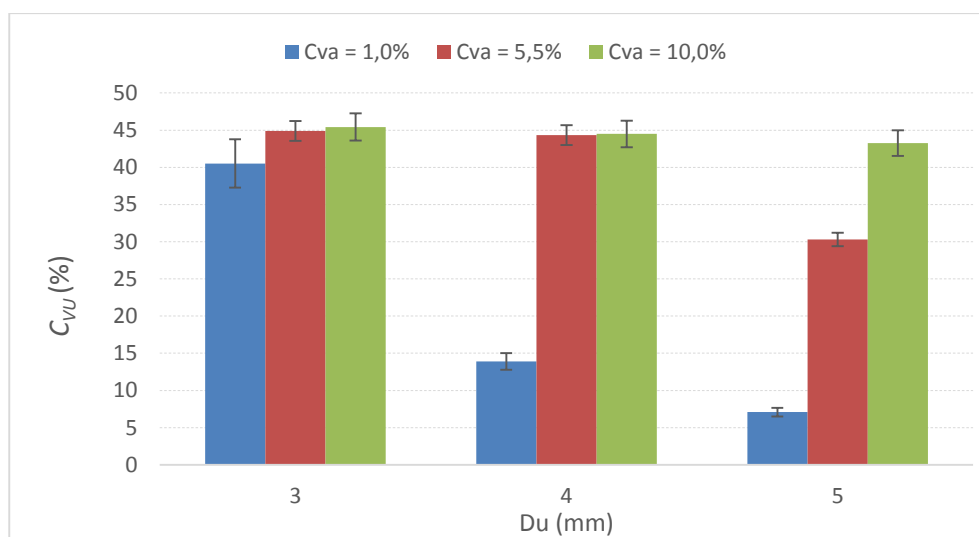


Figura 4.11 – Concentração volumétrica da corrente de *underflow* ( $C_{vu}$ ) do HCO em função do diâmetro de *underflow* ( $D_u$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{va}$ ).

Os resultados confirmam o poder concentrador do HCO. Na condição de maior restrição ao escoamento (3 mm), pôde-se concentrar a suspensão de quartzito em 42 vezes ao trabalhar com suspensão a 1,0% em volume de sólidos. Nesta condição de alimentação diluída, o decréscimo do orifício de *underflow* aumentou o poder concentrador do equipamento, comportamento já observado anteriormente quando analisada a resposta razão de líquido.



A concentração inicialmente diluída contendo 1,0% de sólidos suspensos foi, sobremaneira, majorada para 7,1%, 13,9% e 41,5% com o uso dos diâmetros de orifício de *underflow* de 5, 4 e 3 mm, respectivamente. Entretanto, observa-se a partir da Figura 4.11, que os testes conduzidos com a concentração da suspensão alimentada de 10,0% v. alcançaram os maiores percentuais de sólido no *underflow*, permanecendo num patamar médio de aproximadamente 44%, independentemente do tamanho do orifício de *underflow*.

Para avaliar os efeitos dos fatores  $D_U$  e  $C_{VA}$  e a interação entre eles, os dados experimentais para a concentração de *underflow* foram ajustados conforme a Equação 4.5. O coeficiente de correlação linear ajustado (R) foi de 0,90. Na Figura 4.12 é ilustrado o comportamento do percentual volumétrico de sólidos na corrente de *underflow* frente à variação do percentual de sólidos alimentado e da variável diâmetro de *underflow* através da superfície de resposta.

$$C_{VU} = 94,15 - 7,17 C_{VA} - 18,39 D_U + 1,79 C_{VA}D_U \quad (4.5)$$

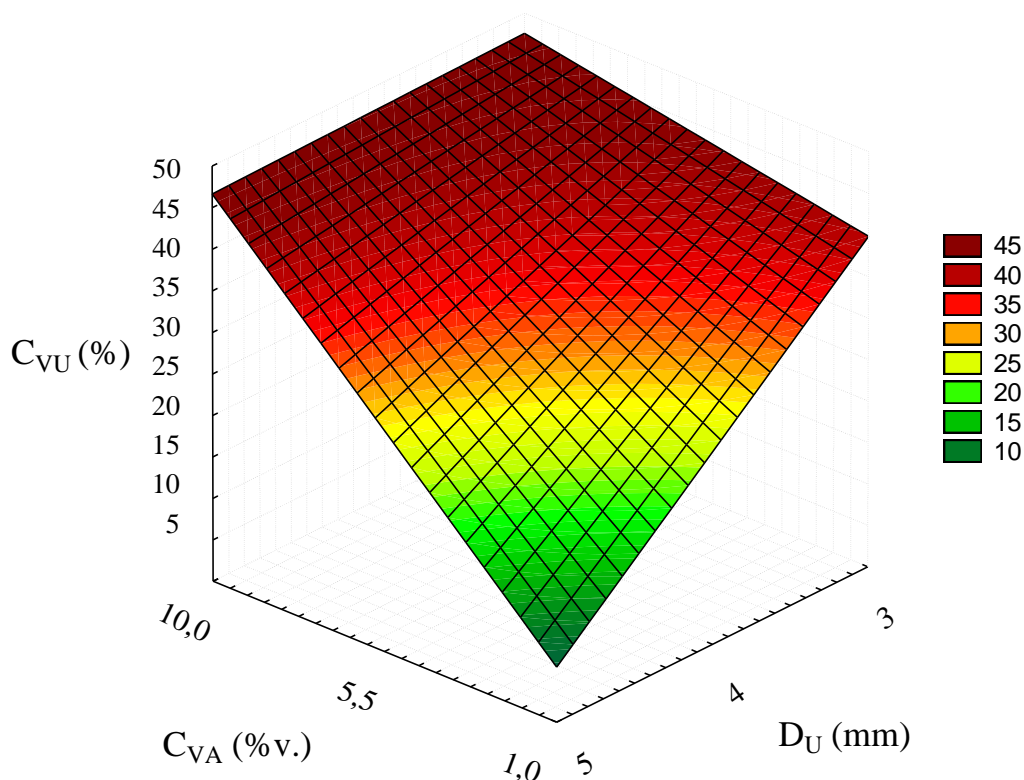


Figura 4.12 – Superfície de Resposta para a concentração volumétrica da corrente de *underflow* ( $C_{VU}$ ) do hidrociclone HCO.

A área vermelha da Figura 4.12 representa a condição que permite a máxima capacidade de espessamento do equipamento. Para suspensão diluída (1,0% v.) a diminuição do diâmetro de *underflow* produziu um aumento acentuado no percentual de sólidos da corrente de *underflow*.

É interessante observar que, alimentando o hidrociclone com suspensão aquosa a 10,0% em volume, para todos os diâmetros de *underflow* estudados, a corrente de *underflow* também alcançou concentrações volumétricas de sólidos de 45% v., mas com a ressalva de que, em contrapartida, diminuiu a eficiência total.

## 4.2. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE HCO E HCOF

Esta seção teve como objetivo comparar o desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF. Os hidrociclones concentrador otimizado (HCO) e cônico-filtrante otimizado (HCOF) diferem-se apenas quanto à natureza da parte cônica, impermeável para o primeiro e poroso para o segundo. Segundo o planejamento fatorial, os efeitos do diâmetro de *underflow* e concentração da suspensão alimentada também foram avaliados para determinação do desempenho do hidrociclone cônico-filtrante (HCOF). E assim como na seção anterior para o hidrociclone concentrador otimizado, HCO, as respostas relacionadas à hidrociclonagem foram calculadas a partir dos dados experimentais coletados nas quatro quedas de pressão: 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar.

Para comparar de maneira clara os hidrociclones, a média dos valores encontrados experimentalmente nas quatro quedas de pressão foi usada para ilustrar o comportamento das respostas relacionadas à hidrociclonagem. Os hidrociclones foram comparados em relação ao consumo energético, à eficiência de separação, à classificação de partículas, além de verificar estatisticamente o efeito da filtração no processo de hidrociclonagem.

### 4.2.1. Influência da filtração nas respostas relacionadas a hidrociclonagem

É de se esperar que o número de Euler do hidrociclone HCOF seja pequeno, assim como foi verificado para o HCO, pois sua geometria foi condicionada ao mínimo consumo de energia. A Figura 4.13 mostra os resultados experimentais para a resposta número de Euler dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes condições de alimentação ( $C_{VA}$ ) e diâmetros de *underflow* ( $D_U$ ) conforme a ordem expressa na matriz de planejamento (Tabela 3.2).

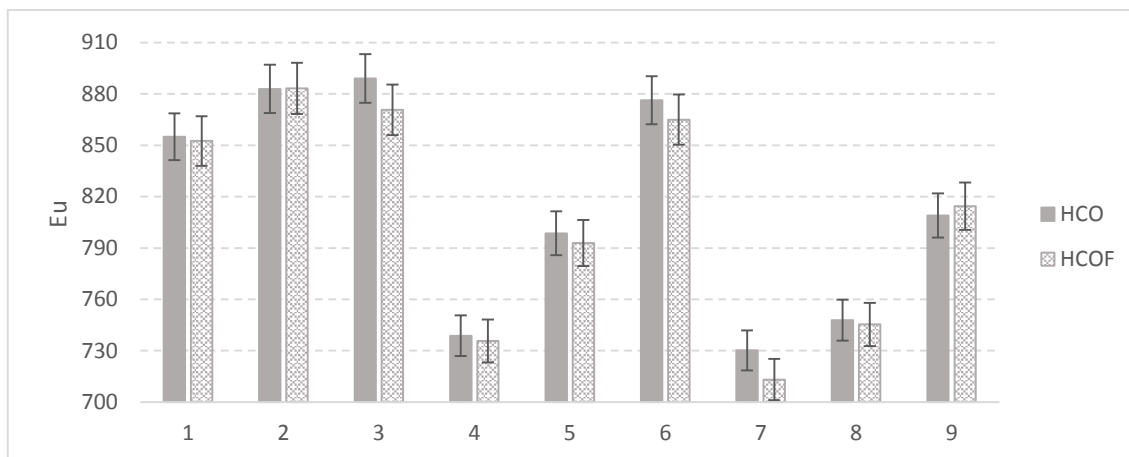


Figura 4.13 – Número de Euler ( $Eu$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental

Os valores médios obtidos da resposta número de Euler estiveram entre 713 e 889 para os dois equipamentos. Com base na Figura 4.13, a mesma tendência observada no equipamento convencional (HCO) foi reproduzida pelo equipamento filtrante (HCOF). Considerando a flutuação dos resultados, os valores estiveram no mesmo patamar de baixo gasto energético.

Para comparar a eficiência de separação dos hidrociclones na presença e ausência da parede cônica porosa, tem-se a Figura 4.14 que representa a eficiência total média dos hidrociclones HCO e HCOF, segundo as diferentes combinações de diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e percentual de sólidos na alimentação ( $C_{VA}$ ).

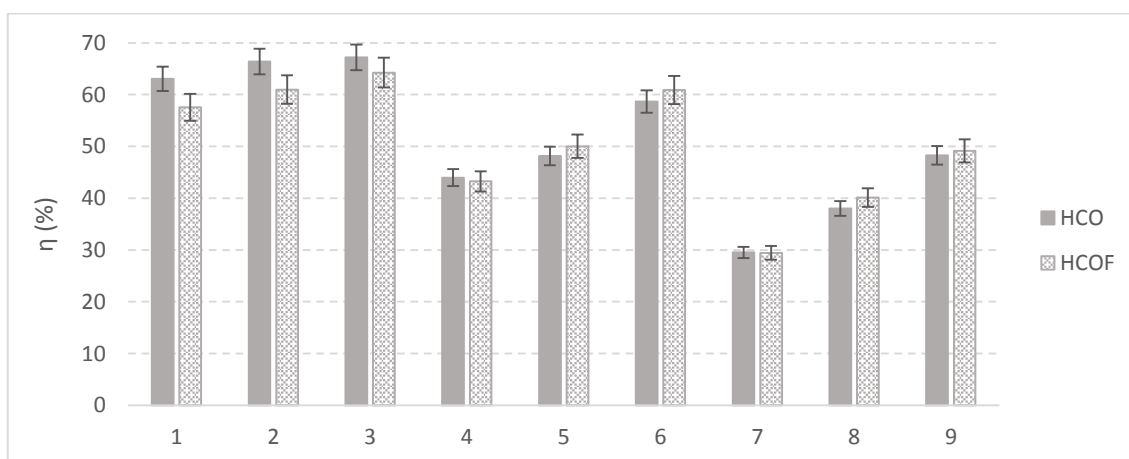


Figura 4.14 – Eficiência Total ( $\eta$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental.

É possível verificar, através da Figura 4.14, que a eficiência total do HCOF é muito próxima à eficiência do HCO, de modo que, aleatoriamente os valores flutuaram num percentual de aproximadamente 4% para cima e para baixo. A eficiência do HCOF se manteve

entre 66%, para os testes conduzidos com suspensão diluída a 1,0% de sólidos em volume, e chegou no mínimo de eficiência de 28%, quando alimentado com suspensão a 10,0% v. e  $D_U = 3$  mm.

Para complementar a análise comparativa da eficiência de separação nos hidrociclones, tem-se a resposta diâmetro de corte. A Figura 4.15 mostra os resultados experimentais médios da resposta diâmetro de corte, os hidrociclones HCO e HCOF.

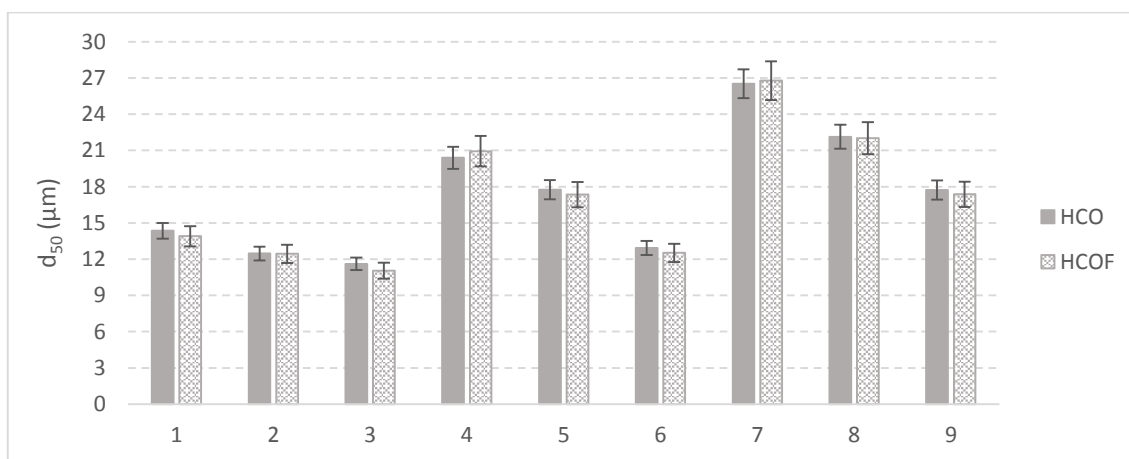


Figura 4.15 – Diâmetro de Corte ( $d_{50}$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental.

Conforme Figura 4.15 os equipamentos desempenharam o mesmo comportamento quanto a coleta de partículas. Caráter confirmado pelos valores próximos de eficiência.

A Figura 4.16 foi usada para comparar a resposta razão de líquido dos hidrociclones HCO e HCOF para as combinações de  $D_U$  e  $C_{VA}$  abordadas neste trabalho.

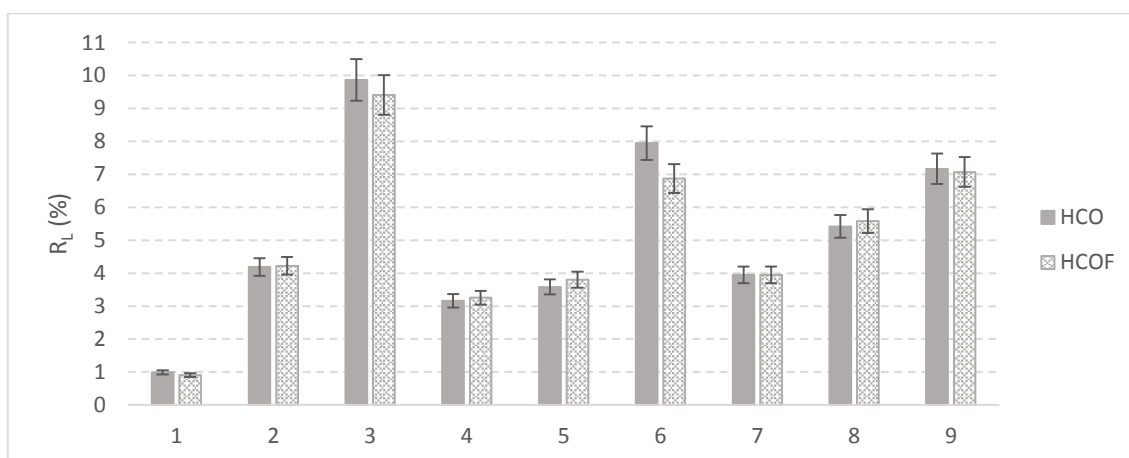


Figura 4.16 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental.

O comportamento da razão de líquido do equipamento filtrante, HCOF, acompanhou o desempenho do HCO descrito na seção 4.1. Existiu apenas uma flutuação percentual em torno de 4% para mais ou para menos nos valores experimentais de razão de líquido.

Ainda, para comparar os hidrociclones em relação à concentração da suspensão, a Figura 4.17 mostra os resultados experimentais médios da concentração de *underflow* ( $C_{vu}$ ) dos equipamentos HCO e HCOF para os diferentes níveis de  $D_U$  e  $C_{VA}$  estudados.

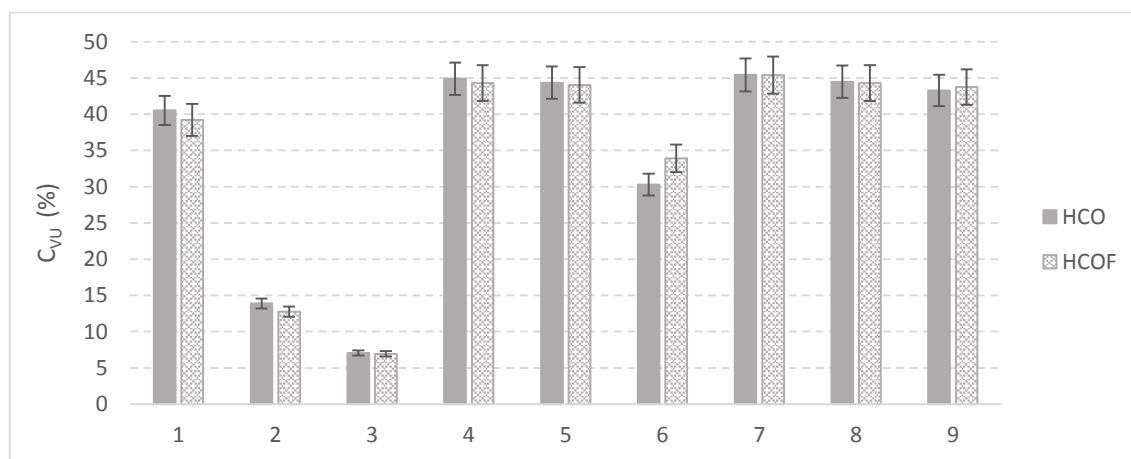


Figura 4.17 – Concentração volumétrica do *underflow* ( $C_{vu}$ ) dos hidrociclones HCO e HCOF para as diferentes combinações de fatores da matriz de planejamento experimental.

De acordo com a Figura 4.17, assim como a resposta razão de líquido, os resultados experimentais para a concentração volumétrica da corrente de *underflow* do hidrociclone HCOF seguiram o mesmo comportamento do hidrociclone HCO.

#### 4.2.2. Avaliação estatística da Filtração

Considerando a variabilidade dos dados experimentais, observou-se que os resultados obtidos para as respostas  $Eu$ ,  $\eta$ ,  $d_{50}$ ,  $R_L$  e  $C_{vu}$  para o Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado (HCOF) permaneciam muito próximos dos resultados obtidos para o Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO).

As flutuações dos dados experimentais podem ter sido responsáveis pelo aumento/diminuição das respostas relacionadas à hidrociclonação apresentadas na seção anterior (4.2.1) e não estarem relacionadas diretamente ao efeito da filtração.

Para verificar se havia diferença significativa entre as respostas médias dos hidrociclones HCO e HCOF, um teste estatístico foi proposto. Uma hipótese estatística é uma afirmação sobre uma população a partir de uma informação obtida de uma amostragem. No

presente estudo, o fato baseado na amostra a ser investigado foi se existia diferença significativa no desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF, ou seja, avaliar se a filtração desempenhou papel significativo na separação.

Considerando um nível de significância de 5%, foi proposto um teste de hipótese que tem por base a formulação de duas hipóteses opostas. A hipótese de nulidade, representada por  $H_0$ , nega a afirmação baseada na amostra, neste caso, afirma que os hidrociclones HCO e HCOF são iguais. A hipótese alternativa, representada por  $H_1$ , representa o fato a ser comprovado pelos dados experimentais, ou seja, se os hidrociclones são realmente diferentes. Para que a hipótese alternativa seja verdadeira, o nível de significância (*p value*) de um teste usando uma distribuição *t de Student* deve ser menor que 0,05.

A título de exemplo, na Tabela 4.1 são mostrados os resultados experimentais  $Eu$ ,  $\eta$ ,  $d_{50}$ ,  $R_L$  e  $C_{VU}$  para os ensaios conduzidos com concentração de 1,0% em volume e diâmetro de *underflow* de 5 mm. Também estão apresentados os valores médios e os desvios padrões usados no cálculo do *p value* através do *software Statistica®*.

Tabela 4.1 – Resultados experimentais para as respostas número de Euler, eficiência total, diâmetro de corte, razão de líquido e concentração de sólidos no *underflow* para os hidrociclones HCO e HCOF a 1,0%v e  $D_U = 5$  mm.

Resposta / Equipamento		$-\Delta P$ (bar)				Média	Desvio padrão	<i>p value</i>
		0,88	1,18	1,47	1,77			
$Eu$	HCO	858,04	878,32	908,02	911,66	889,02	25,49	0,2945
	HCOF	847,78	864,06	878,57	892,43	870,71	19,18	
$\eta$ (%)	HCO	65,60	66,86	68,62	67,66	67,18	1,28	0,0821
	HCOF	61,11	63,43	66,42	66,07	64,26	2,49	
$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	HCO	12,52	12,17	11,20	10,56	11,61	0,89	0,4489
	HCOF	12,36	11,37	10,63	9,81	11,04	1,08	
$R_L$ (%)	HCO	11,00	10,15	9,44	8,86	9,86	0,92	0,4460
	HCOF	10,22	9,50	9,08	8,84	9,41	0,61	
$C_{VU}$ (%v.)	HCO	6,21	6,82	7,46	7,82	7,08	0,71	0,7809
	HCOF	6,11	6,77	7,37	7,52	6,94	0,65	

Observa-se, através da Tabela 4.1 que nas condições predeterminadas o *p value* das respostas  $Eu$ ,  $\eta$ ,  $d_{50}$ ,  $R_L$  e  $C_{VU}$  foi maior que 0,05, ou seja, a hipótese alternativa deve ser rejeitada para todas respostas analisadas, de modo que a hipótese de nulidade se torna verdadeira. Portanto, segundo a hipótese de nulidade, pode-se afirmar que os hidrociclones HCO e HCOF

são estatisticamente iguais para as condições pré-estabelecidas de diâmetro de *underflow* igual a 5 mm e percentual volumétrico de sólidos na alimentação de 1,0%.

O mesmo teste de hipóteses foi efetuado para as outras condições operacionais de  $D_U$  e  $C_{VA}$  propostas pelo planejamento experimental fatorial do presente estudo. Os demais valores encontrados para a probabilidade normal para as respostas  $Eu$ ,  $\eta$ ,  $d_{50}$ ,  $R_L$  e  $C_{VU}$  foram todos maiores que 0,05. Deste modo, a hipótese de nulidade também foi aceita e, então, pode-se dizer que os hidrociclones HCO e HCOF foram idênticos sob o ponto de vista estatístico.

Assim, diferentemente do que ocorre para outras famílias de separadores (Rietema, Bradley), a filtração não desempenhou papel significativo no desempenho dos hidrociclones HCO e HCOF. Acredita-se que este efeito não foi pronunciado devido ao tamanho relativamente reduzido da parte cônica filtrante do equipamento em relação ao tamanho da parte cilíndrica do separador e em virtude da permeabilidade disponível para execução dos testes exceder o limite aconselhado por SALVADOR (2013).

### 4.3. COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO HCO COM A FAMÍLIA RIETEMA

O Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) destacou-se neste estudo por apresentar vantagens relacionadas à eficiência de separação e capacidade de processamento. Além disso, foi possível majorar a concentração da corrente de *underflow* em até 45 vezes.

O estudo comparativo do Hidrociclone Concentrador Otimizado com uma tradicional família teve por objetivo ressaltar as vantagens da nova geometria em estudo. A família Rietema foi escolhida por reproduzir resultados de alta capacidade de operação aliado ao espessamento da corrente, semelhantemente ao que fora proposto para o hidrociclone HCO.

O estudo de VIEIRA (2006) foi conduzido com suspensão diluída de rocha fosfática, de granulometria próxima à utilizada no presente estudo. Portanto, selecionadas as mesmas condições operacionais, foi possível comparar o desempenho dos dois hidrociclones (HCO e Rietema) para o diâmetro de *underflow* de 3, 4 e 5 mm, nos níveis de queda de pressão de 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar. Os resultados experimentais levantados por VIEIRA (2006) para o hidrociclone Rietema estão apresentados no Anexo 2.

As figuras a seguir ilustram desempenho dos equipamentos: Rietema, em azul, e HCO, em vermelho, para as 12 combinações de  $D_U$  e  $-\Delta P$ . As 12 combinações estão codificadas de

modo que P1, P2, P3 e P4 correspondem às quedas de pressão de 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar e d3, d4 e d5 correspondem aos diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm.

A capacidade de processamento de um equipamento, representada pela vazão de alimentação, configura uma variável muito importante ao projeto e execução de um processo. Na Figura 4.18 são mostradas a vazão alimentada requerida no hidrociclone Rietema e HCO.

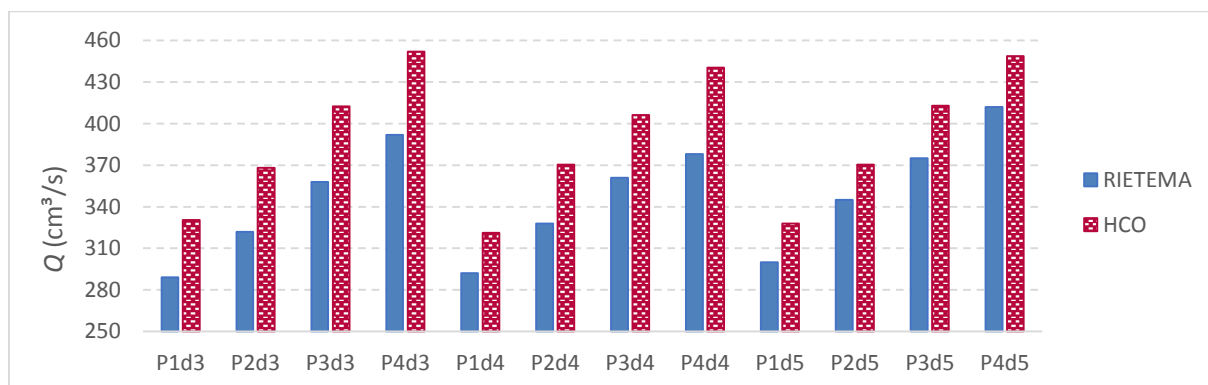


Figura 4.18 – Capacidade de processamento ( $Q$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais.

Observa-se através da Figura 4.18 que a capacidade de processamento do equipamento HCO foi superior à do hidrociclone Rietema em todas as condições estudadas. Ao trabalhar com o equipamento HCO, houve um acréscimo médio da vazão alimentada de aproximadamente 12%, em relação ao hidrociclone de Rietema.

Ainda, quanto ao consumo energético, a resposta número de Euler é um importante instrumento de comparação entre os equipamentos Rietema e HCO. Na Figura 4.19 é ilustrado o comportamento da variável número de Euler dos hidrociclones ao se passar da configuração Rietema para o HCO, para as diferentes condições operacionais experimentadas.

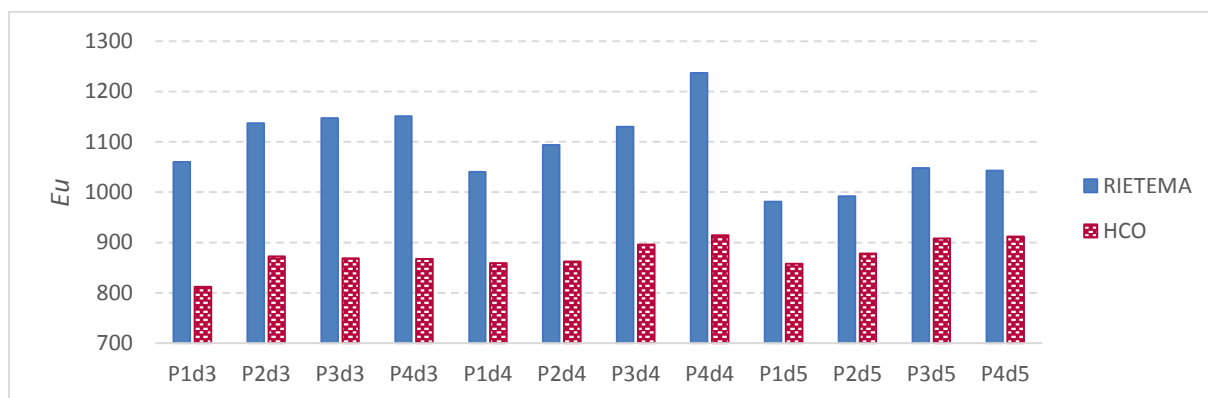


Figura 4.19 – Número de Euler ( $Eu$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais.



Em conformidade com a Figura 4.19, pôde-se afirmar que o consumo energético do hidrociclone HCO foi menor que o consumo da tradicional família de hidrociclones Rietema. O número de Euler experimental médio da geometria Rietema esteve na ordem de 1088 (VIEIRA, 2006) e da geometria HCO em aproximadamente 814. Foram observados decréscimos de aproximadamente 20% na variável número de Euler ao passar da geometria Rietema para HCO. Considerando os gastos de uma indústria de processamento, um decréscimo no consumo energético nessa ordem de grandeza representa uma grande economia no montante final.

Como explanado nas seções anteriores, a eficiência total está relacionada ao poder de coleta de partículas na corrente de *underflow*, dessa forma, para avaliar a capacidade de separação dos hidrociclones, a Figura 4.20 compara a resposta eficiência total do hidrociclone Rietema em relação ao hidrociclone HCO.

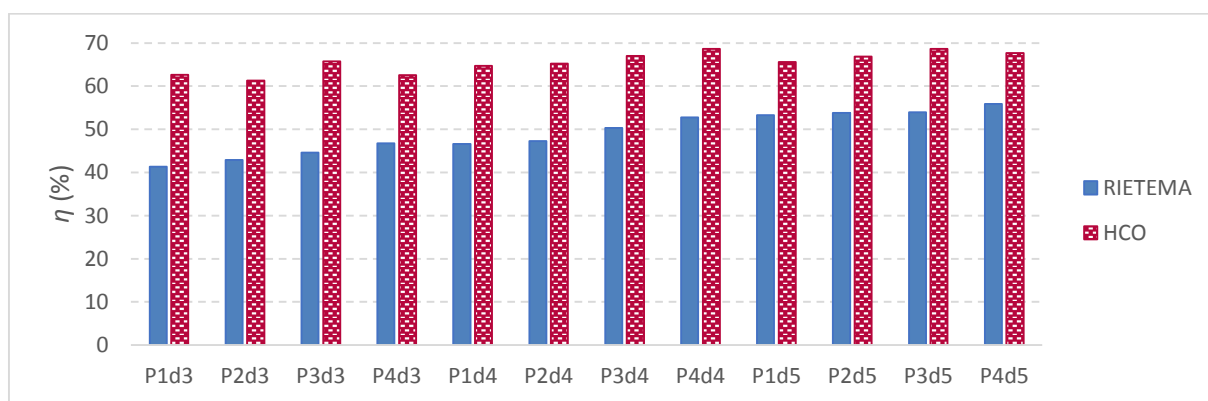


Figura 4.20 – Eficiência Total ( $\eta$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais.

Ao observar os dados levantados por VIEIRA (2006), a eficiência total do hidrociclone Rietema esteve entre 41 e 56% e do hidrociclone HCO entre 59 e 69%. Foi observado através da Figura 4.20 que a eficiência total do hidrociclone HCO foi, em média, 34% maior que a eficiência da família de hidrociclones Rietema. Na condição de queda de pressão intermediária de 1,47 bar e diâmetro de *underflow* de 3 mm, a eficiência foi majorada de 44,6% para 65,7%, acréscimo de aproximadamente 47%. Conclui-se que uma parcela maior de partículas foi direcionada para a corrente de *underflow* no equipamento HCO. Juntamente com os sólidos coletados uma parcela de líquido é descarregada na corrente de *underflow*, então partindo deste princípio, tem-se a necessidade de estimar a resposta razão de líquido para avaliar se a alta eficiência observada no hidrociclone HCO será acompanhada da diminuição do poder de concentração do equipamento.

Para avaliar a capacidade de espessamento da corrente de *underflow*, na Figura 4.21 está apresentado o comportamento da resposta razão de líquido dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes níveis de queda de pressão e diâmetro de *underflow*.

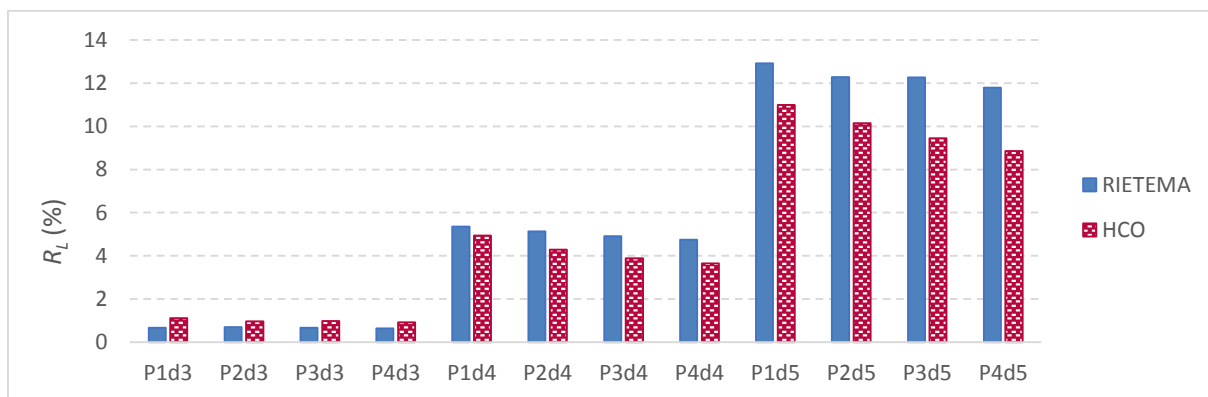


Figura 4.21 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais.

De acordo com a Figura 4.21, observa-se que a razão de líquido média do hidrociclone Rietema para o diâmetro de *underflow* de 3 mm foi de aproximadamente 0,67%, enquanto que para o hidrociclone HCO foi de 0,98%. Ambos os separadores apresentaram valores de razão de líquido extremamente baixos que comprovam a capacidade de espessamento. Todavia, para as outras dimensões de orifício de *underflow*, verificou-se que houve um decréscimo médio de 19% na razão de líquido ao se passar da configuração Rietema para o HCO.

Com o objetivo de comparar de maneira quantitativa o percentual de sólidos coletado na corrente de *underflow* dos hidrociclones Rietema e HCO tem-se a Figura 4.22.

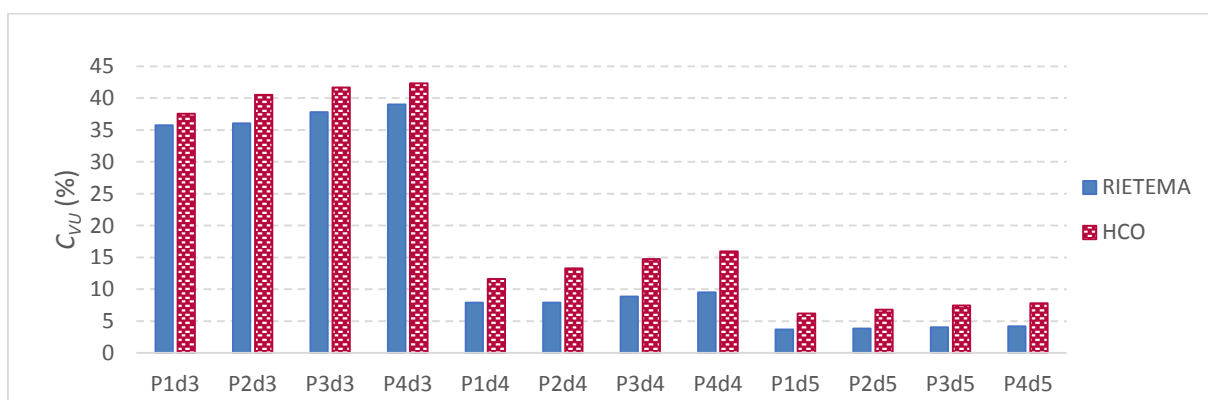


Figura 4.22 – Concentração volumétrica do *underflow* ( $C_{VU}$ ) dos hidrociclones Rietema e HCO para diferentes condições operacionais.

A partir da Figura 4.22 observou-se que, nas mesmas condições operacionais o hidrociclone HCO conseguiu coletar uma maior quantidade de sólidos na corrente de *underflow* que o hidrociclone Rietema. Nos experimentos conduzidos com diâmetro de *underflow* de 3, 4 e 5 mm o hidrociclone HCO majorou a concentração da alimentação inicialmente a 1,0% v. para aproximadamente 41%, 14% e 7% respectivamente (valores médios para as quatro quedas de pressão experimentadas). Para as mesmas condições, a família Rietema alcançou valores de 37%, 8% e 4% em volume de sólidos respectivamente.

Portanto, os resultados de concentração volumétrica do *underflow* da Figura 4.22 juntamente com os resultados de razão de líquido da Figura 4.21 confirmam que o HCO tem maior capacidade de espessamento que o hidrociclone Rietema.

Por fim, o hidrociclone HCO apresentou vantagens em todos quesitos quando comparados ao seu “concorrente” Rietema, pois teve sua capacidade e eficiência majoradas, sem prejuízo da concentração de sólidos na corrente de *underflow*.

#### **4.4. PREVISÃO DE DESEMPENHO DO HCO**

O desempenho de hidrociclones pode ser determinado experimentalmente ou então, ser estimado através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). Entretanto, existem correlações que são capazes de prever o desempenho de separação, a partir de características geométricas do hidrociclone e de condições operacionais. Todavia, a prévia coleta e determinação de dados experimentais do equipamento é realizada para enfim, encontrar equações ou diagramas que possam prever o desempenho do hidrociclone sem a necessidade de extensos testes experimentais ou esforço computacional.

Em virtude de o efeito da filtração não ter sido significativo sob o hidrociclone HCOF nas condições estudadas, tão somente o hidrociclone concentrador otimizado (HCO) foi caracterizado nesta seção. A partir dos dados experimentais coletados, foi possível caracterizar o hidrociclone HCO e determinar sua Equação de Projeto para posterior uso em outras condições operacionais, segundo o interesse de cada usuário. Também foram levantadas as curvas de eficiência para que pudessem ser utilizadas frente a outras eventuais distribuições granulométricas.

##### **4.4.1. Equação de Projeto**

Segundo MASSARANI (1989), é possível prever o do diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) de uma determinada família de hidrociclones através de sua Equação de Projeto. A partir da abordagem clássica de separação em hidrociclones é estabelecida uma relação direta entre as propriedades físico-químicas do sistema com as características geométricas e operacionais do equipamento. O efeito de arraste de partículas para o *underflow* sem ação do campo centrífugo é computado pelo fator de correção da razão de líquido. Do mesmo modo, os efeitos de concentração de sólidos na alimentação são captados pelo fator de correção da concentração. De acordo com o procedimento descrito, uma variante da equação proposta por MASSARANI (1989) foi usada no presente estudo, representada pelas Equações 4.8 e 4.9.

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = K \left[ \frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{(1 + AR_L)} \exp(DC_{VA}) \quad (4.8)$$

$$R_L = B \left( \frac{D_U}{D_c} \right)^C \quad (4.9)$$

Os parâmetros  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  estão ligados especificamente às particularidades de cada hidrociclone. Para determinação dos parâmetros das Equações 4.8 e 4.9 é necessário um levantamento de dados experimentais de razão de líquido ( $R_L$ ), capacidade de operação ( $Q$ ), diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ), concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $C_{VA}$ ), além de propriedades do fluido e do sólido.

Os resultados experimentais do hidrociclone HCO, explicitados no Apêndice A, foram correlacionados com nível de significância de 5% através de regressão não-linear feita no *software* Statistica®. Na Tabela 4.2 são mostrados os parâmetros  $K$ ,  $A$ , e  $D$  obtidos na formulação da Equação 4.8, enquanto a Tabela 4.3 mostra os parâmetros  $B$  e  $C$  das Equações 4.9, com seus respectivos coeficientes de correlação linear ajustados.

Tabela 4.2 – Parâmetros  $K$ ,  $A$  e  $D$  da Equação 4.8 para o hidrociclone HCO, juntamente com seus desvios padrões

Parâmetro	$K$	$A$	$D$	$R$
Valor estimado	$0,093 \pm 0,005$	$14,33 \pm 2,77$	$8,69 \pm 0,63$	0,94

Tabela 4.3 – Parâmetros  $B$  e  $C$  da Equação 4.9 para o hidrociclone HCO, juntamente com seus desvios padrões

Parâmetro	$B$	$C$	$R$
Valor estimado	$7,16 \pm 3,33$	$2,53 \pm 0,25$	0,92

A substituição dos parâmetros  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  nas Equações 4.8 e 4.9 caracteriza a família de hidrociclones HCO. Embora o desvio padrão de alguns parâmetros tenha se mostrado relevante, todos parâmetros foram significativos com  $\alpha = 5\%$ , retornando razoável coeficiente de correlação ao quadrado para os dois ajustes.

#### 4.4.2. Curvas de Eficiência

As curvas de eficiência de um hidrociclone são informações práticas capazes de efetuar uma rápida estimativa da eficiência total do equipamento frente às condições operacionais nas quais o separador será submetido (concentração de sólidos, vazão volumétrica da alimentação, diâmetro de *underflow* e distribuição granulométrica do material particulado). Maiores detalhes desta metodologia podem ser obtidos no Apêndice C.

A curva de Eficiência Total do Hidrociclone Concentrador Otimizado para o diâmetro de *underflow* de 3 mm e concentração de 1,0% de sólidos está ilustrada na Figura 4.23.

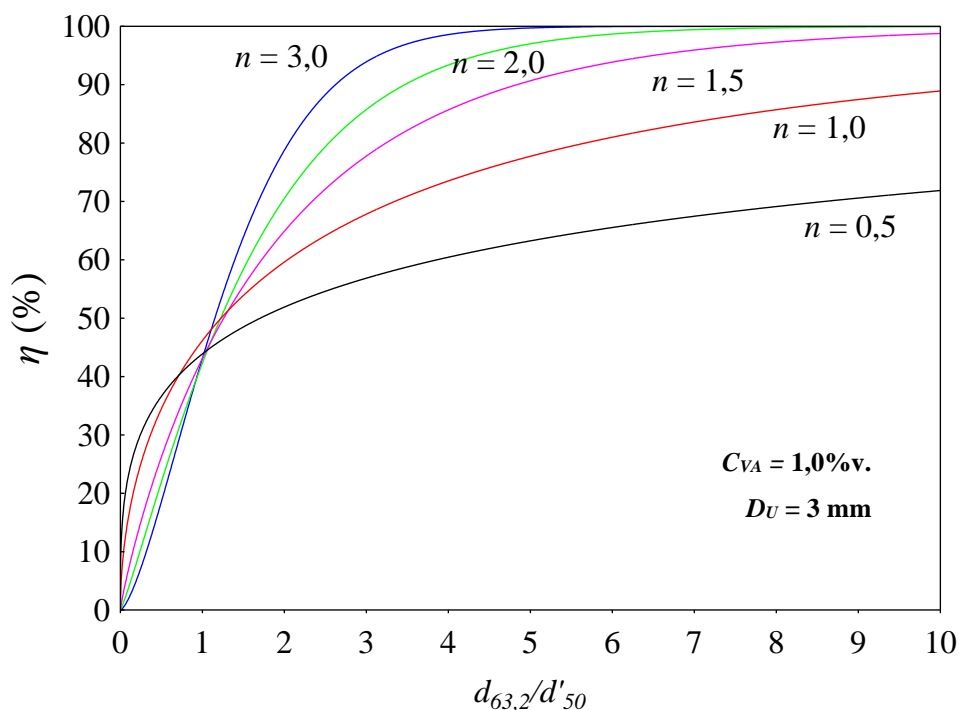


Figura 4.23 – Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 1,0%.

As demais curvas de eficiência total do hidrociclone HCO, para as outras condições de  $D_U$  e  $C_{VA}$ , estão apresentadas nas Figuras de 4.24 a 4.31. Pode-se observar que, quando usados materiais de distribuição granulométrica relativamente grossos o hidrociclone apresenta

níveis de eficiência total próximos a 100%. Neste trabalho o material utilizado era fino, o que desfavoreceu a obtenção de altas eficiências, entretanto este procedimento era necessário para adequada caracterização do equipamento.

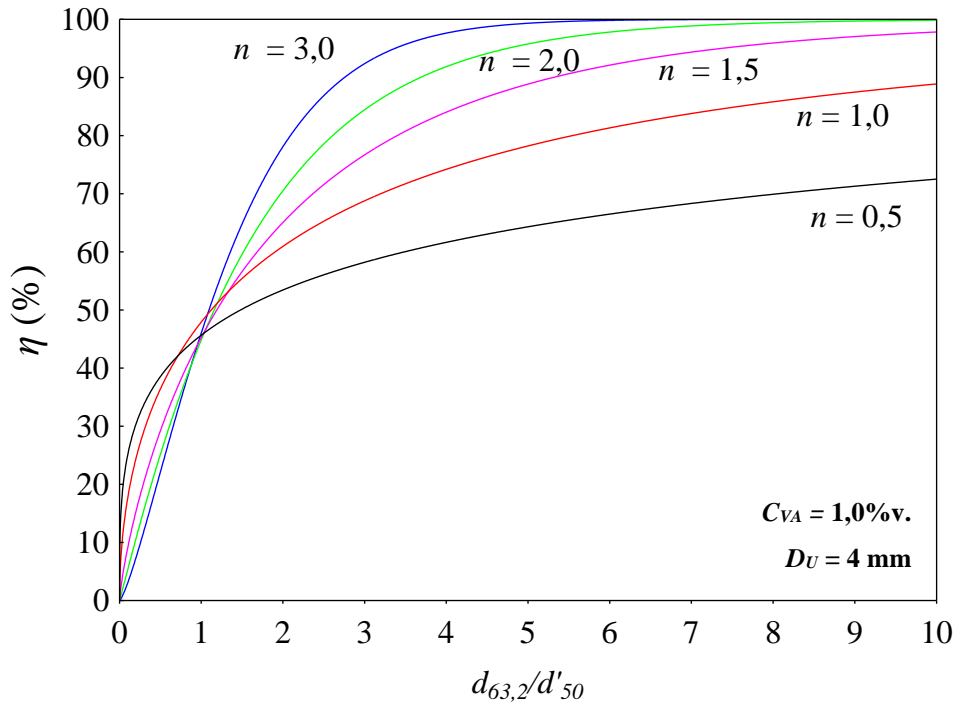


Figura 4.24 – Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 1,0%.

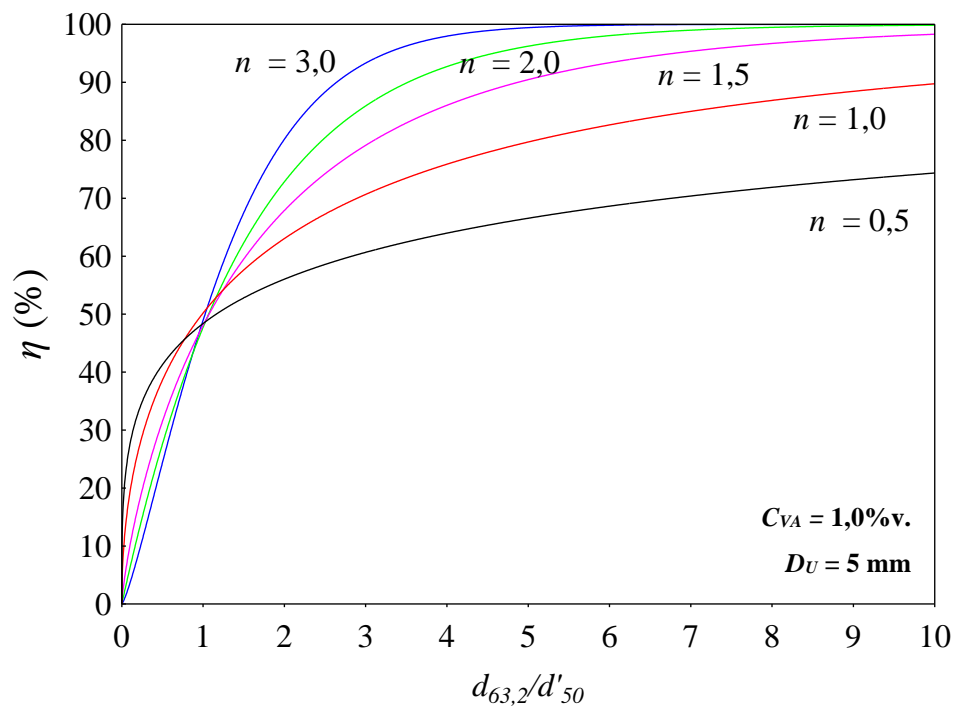


Figura 4.25 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 1,0%.

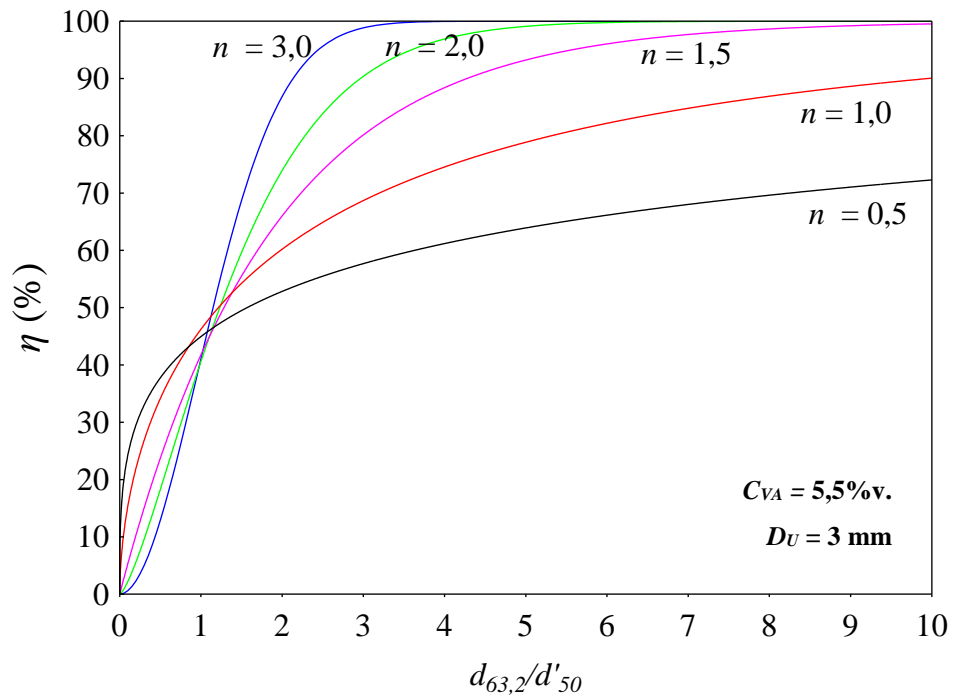


Figura 4.26 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 5,5%.

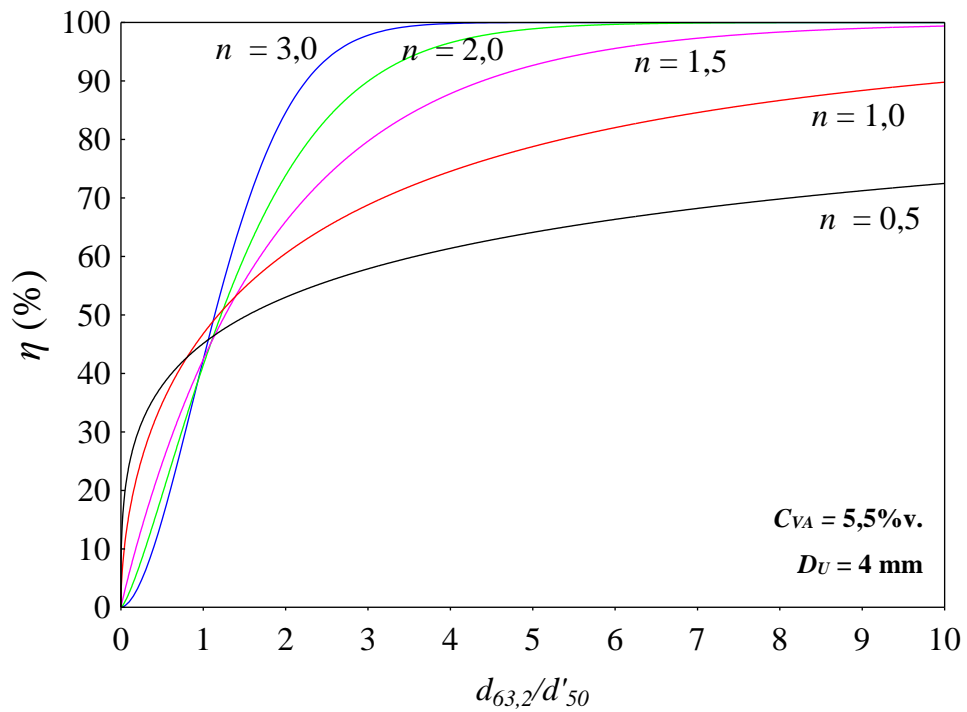


Figura 4.27 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 5,5%.

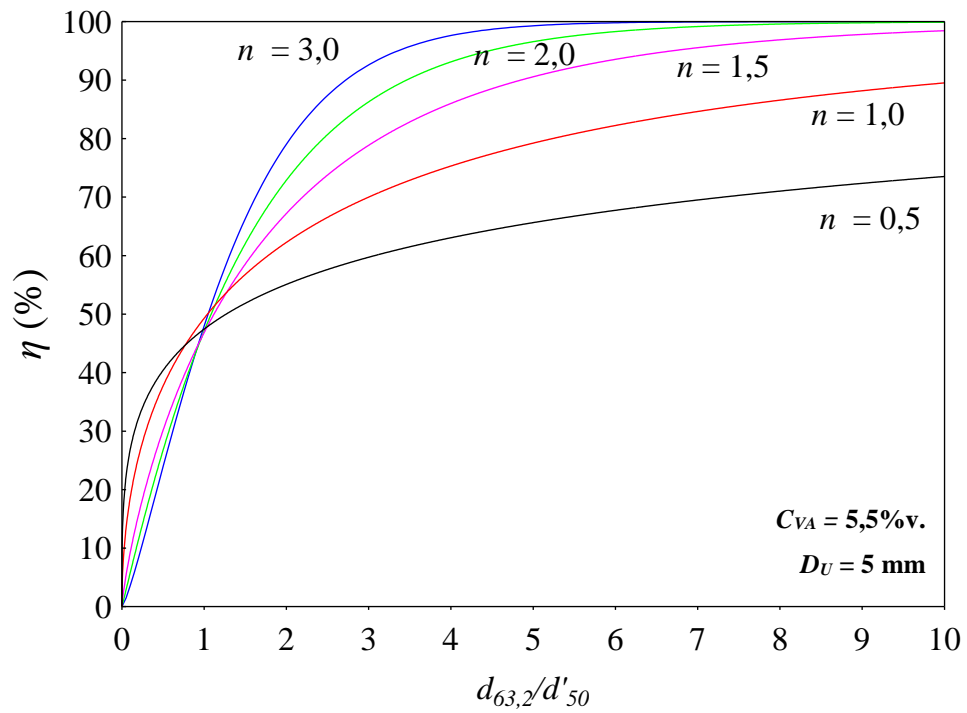


Figura 4.28 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 5,5%.

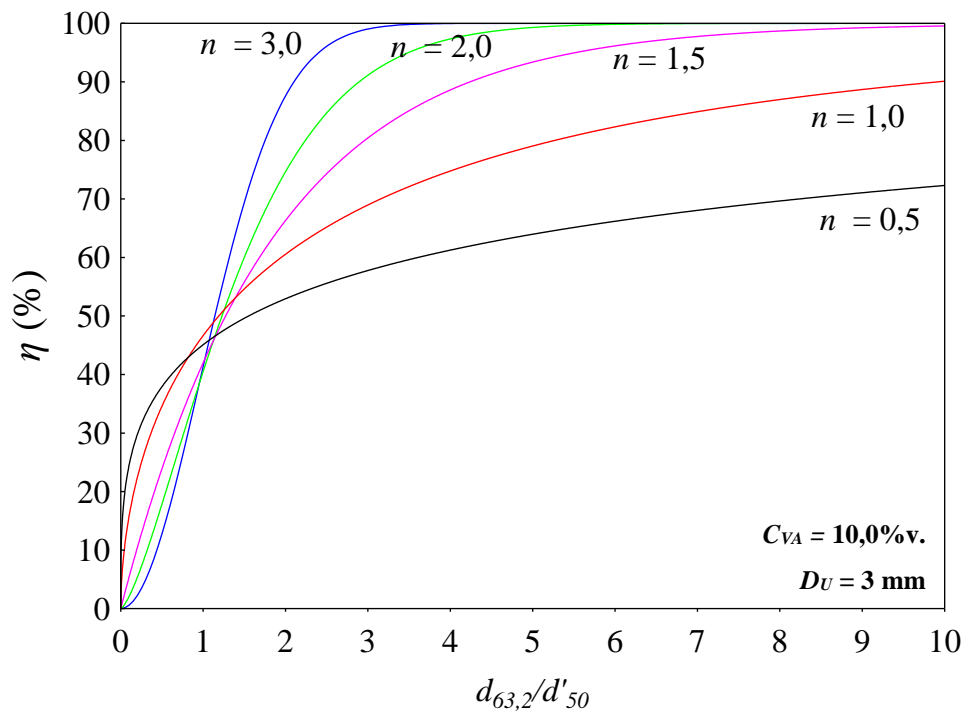


Figura 4.29 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 10,0%



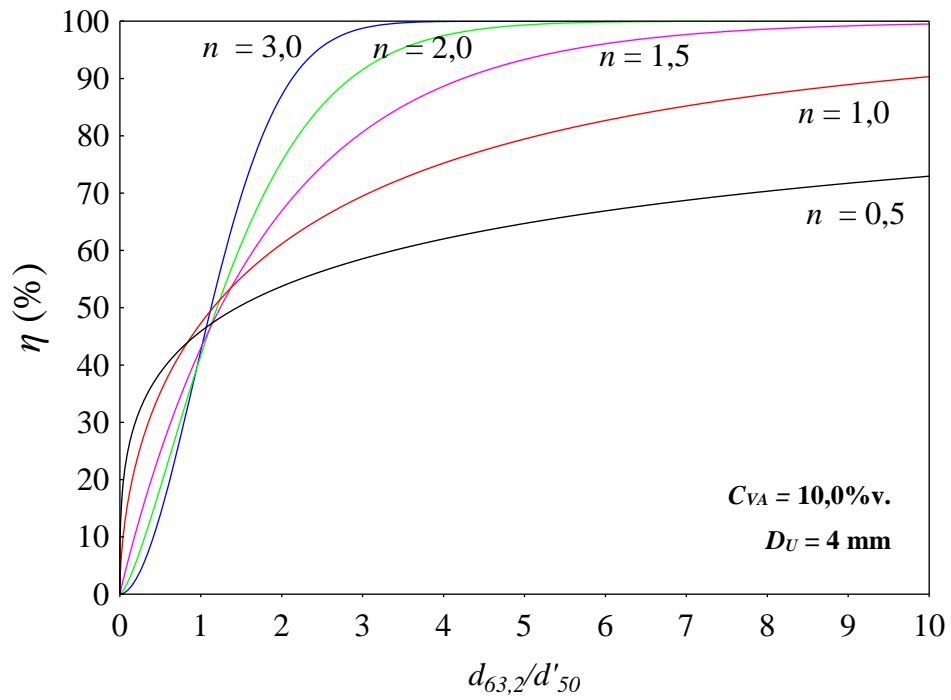


Figura 4.30 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 10,0%.

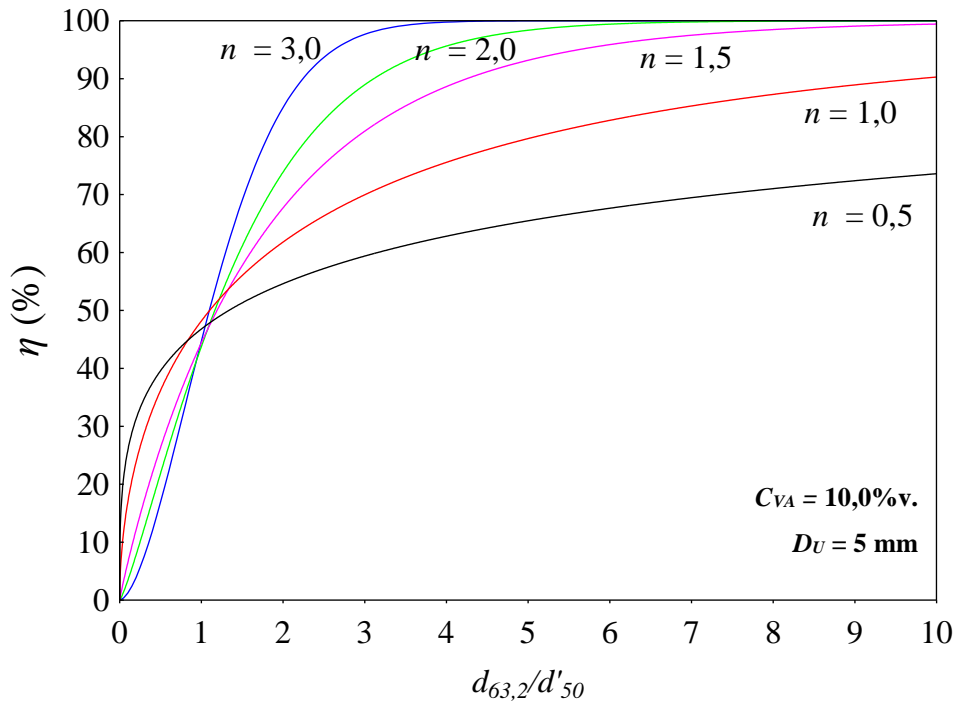


Figura 4.31 - Curva de Eficiência Total do HCO para diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos ( $C_{VA}$ ) de 10,0%.

### 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As principais conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas em síntese no presente capítulo.

#### 5.1. CONCLUSÕES

Os hidrociclones HCO e HCOF alcançaram, independente das condições operacionais, altas capacidades de processamento e baixa razão de líquido. A vazão alimentada esteve entre 320 e 500 cm<sup>3</sup>/s e a razão de líquido entre 0,9 e 11,0%. Todavia, os dois equipamentos apresentaram o mesmo comportamento quanto à variação dos fatores estudados no planejamento fatorial. Por causa disso, a influência do diâmetro de *underflow* e concentração alimentada foi percorrida apenas para o equipamento convencional (HCO).

Ao avaliar o efeito do diâmetro de *underflow* no desempenho do Hidrociclone Concentrador Otimizado, conclui-se que o aumento da restrição ao escoamento foi benéfico para a capacidade de processamento do hidrociclone, e como consequência, foi observada a diminuição do número de Euler. Desse modo, a restrição de escoamento foi compensada de alguma forma pelo requerimento de uma maior quantidade de fluido no hidrociclone. Tal comportamento foi justificado pela geometria distinta do equipamento, em que a parte cônica era relativamente menor que a parte cilíndrica do mesmo.

Além de possibilitar o processamento de grande quantidade de fluido, a concentração da suspensão contendo 1,0% de sólidos em volume foi majorada em aproximadamente 42 vezes ao utilizar o diâmetro de *underflow* de 3 mm. Nos diâmetros de 4 e 5 mm, o aumento foi de cerca de 14 e 7 vezes, respectivamente.

Do mesmo modo, a resposta razão de líquido esteve intimamente ligada ao diâmetro de *underflow*, pois o mesmo era responsável por restringir o escoamento de líquido no duto de *underflow*. Foram obtidos valores de razão de líquido de 0,9%, 4,2% e 9,9% para os respectivos diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm na concentração de sólidos de 1,0% v. Conclui-se que o decréscimo do diâmetro de *underflow* é extremamente favorável à operação de espessamento.

Em contrapartida, houve decréscimos na eficiência total do hidrociclone HCO quando o diâmetro de *underflow* diminuiu. Na condição de suspensão diluída ( $C_{VA} = 1,0\% \text{ v.}$ ), foram

alcançados valores de eficiência de 67,2%, 66,4% e 63,1% quando utilizado diâmetro de *underflow* de 5, 4 e 3 mm, respectivamente. Contudo, quanto maior a concentração da suspensão, mais pronunciado foi esse decréscimo, por exemplo, ao alterar o diâmetro de *underflow* de 5 para 3 mm, a eficiência total reduziu aproximadamente 25% no nível intermediário de concentração alimentada ( $C_{VA} = 5,5\%v.$ ), e cerca de 38% quando a concentração alimentada era de 10,0%v. Existe um efeito combinado entre os fatores estudados, todavia o efeito da concentração foi o mais intenso na resposta eficiência total dos hidrociclones que o efeito do diâmetro de *underflow*.

Acompanhando o efeito da eficiência total, o diâmetro de corte mínimo do HCO foi de aproximadamente 12  $\mu m$ , para o orifício de *underflow* de 5 mm e alimentação de 1,0% de sólidos em volume.

Ainda, analisando o efeito da concentração alimentada no desempenho do hidrociclone HCO, o aumento da mesma diminuiu o consumo energético do equipamento. A vazão máxima de aproximadamente 500  $cm^3/s$  (1,8 L/h) foi alcançada na condição de diâmetro de *underflow* de 3 mm e alimentação com 10,0% de sólidos em volume.

Acréscimos na razão de líquido foram observados com o aumento da concentração de alimentação para o menor nível de diâmetro de *underflow*, todavia no maior nível desta variável o comportamento foi oposto. A superfície de resposta para razão de líquido auxiliou no entendimento desse comportamento, pois revelou que houve efeitos lineares, de interação entre fatores e quadrática do fator diâmetro de *underflow*.

Através do estudo comparativo entre os hidrociclones HCO e HCOF, foram observadas flutuações nos resultados experimentais das respostas relacionadas à eficiência e capacidade dos hidrociclones HCO e HCOF. Uma análise estatística do efeito da filtração revelou que a mesma não exerceu efeito significativo no desempenho do hidrociclone HCOF em relação ao HCO. Certamente, a alta permeabilidade do meio filtrante e o tamanho reduzido do tronco de cone em relação ao comprimento total do equipamento foram responsáveis pela discreta alteração dos valores das respostas relacionadas à hidrociclonagem.

Em todas as condições estudadas, o hidrociclone HCO teve um desempenho superior ao tradicional hidrociclone de Rietema. O hidrociclone HCO apresentou eficiência máxima de aproximadamente 68% e número de Euler médio de cerca de 814, enquanto para a geometria Rietema estes valores foram de 56% e 1088, respectivamente.

Em virtude do baixo gasto energético e da alta capacidade de espessamento do HCO a eleição da melhor condição operacional tem por base o comportamento da eficiência do equipamento. A máxima eficiência alcançada ocorreu ao se trabalhar com suspensão diluída

( $C_{VA} = 1,0\% \text{ v.}$ ) e diâmetro de *underflow* de 5 mm, todavia para se alcançar alta concentração de sólidos o diâmetro de *underflow* de 3 mm é mais indicado, considerando que este ainda mantinha o mesmo patamar de eficiência. Se for necessário trabalhar com suspensões acima de 5,5% v, é aconselhável trabalhar com maior diâmetro de *underflow* ( $D_U = 5 \text{ mm}$ ), pois assim a eficiência não é totalmente sacrificada e a razão de líquido se manteria em baixos patamares para espessamento da suspensão.

O estudo experimental possibilitou o levantamento das Equações de Projeto e das Curvas de Eficiência do HCO, de modo que, de posse das principais características da suspensão de trabalho e das condições operacionais, foi possível prever a eficiência total e o diâmetro de corte do equipamento de maneira fácil e rápida para possíveis interessados.

## 5.2. SUGESTÕES

O presente estudo com hidrociclones convencionais e filtrantes proporcionou as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- A incorporação de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo do efeito da concentração volumétrica de sólidos em hidrociclones considerando escoamento tridimensional, turbulento, transiente e multifásico.
- Estudo fluidodinâmico do escoamento no Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) frente a alteração do diâmetro de *underflow* para melhor compreensão do efeito desta variável na capacidade de processamento do equipamento.
- Estudo do comportamento do Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado (HCOF) sob outras condições operacionais e de permeabilidade do meio filtrante.
- Estudo do efeito da viscosidade de fluidos no desempenho do Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO).

## REFERÊNCIAS

---

ABDOLLAHZADEH, L.; HABIBIAN, M.; ETEZAZIAN, R.; NASERI, S. *Study of particle's shape factor, inlet velocity and feed concentration on mini-hydrocyclone classification and fishhook effect*, Powder Technology 283, p.294-301, 2015.

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

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

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.

BAKASKOV, A.P.; DOLGOV, V.N.; GOLDOBIN, YU.M. *Aerodynamics and Heat Transfer in Cyclones with Particle-Laden Gas Flow*. Experimental Thermal and Fluid Science 3, 597-602, 1990.

BERGSTRÖM, J. *Flow Field and Fibre Fractionation Studies in Hydrocyclones*. Thesis (Doctoral)–Department of Fibre and Polymer Technology, School of Chemical Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 59f, 2006.

BICALHO, I.C. *Concentração de Leveduras da Fermentação Alcoólica em Hidrociclones*. 135 f. Dissertação (Mestrado) UFU, Uberlândia, MG, 2011.

BICALHO, I.C.; MOGNON, J.L.; SHIMOYAMA, J.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R. *Estudo da fluidodinâmica de um hidrociclone operando na presença e ausência de air core*. In: XXXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2012, Vassouras (RJ). ANAIS ENEMP 2011. Rio de Janeiro, p. 335-342, 2012.

BOURGEOIS, F.; MAJUMDER, A.K.; *Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon?* Powder Technol. 237, p.367–375, 2013.

- CHU, L. Y.; YU, W.; WANG, G. J.; ZHOU, X. T.; CHEN, W. M.; DAI, G. Q. *Enhancement of hydrocyclone performance by eliminating the air core*. Chemical Engineering and Processing, v.43, n.12, p.1441-1448, 2004.
- CUI, B-Y.; WEI, D-Z.; GAO, S-L.; LIU, W-G.; FENG, Y-Q. *Numerical and experimental studies of flow field in hydrocyclone with air core*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 24, p. 2642-2649, 2014.
- DAMASCENO, J. J. R. e MASSARANI, G. *Estudo de um sedimentador contínuo com fundo filtrante*. XIV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, p. 283-290, 1986.
- DUECK, J.; FARGHALY, M.; NEESSE, T. *The theoretical partition curve of the hydrocyclone*. Minerals Engineering 62, p.25-30, 2014.
- FAÇANHA, J. M. F. *Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido-líquido em hidrociclones*. 83 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2012.
- FINCH, J.A. *Modelling a fish-hook in hydrocyclones electivity curves*. Powder Technology 36, p. 127–129, 1983.
- GHODRAT, M.; KUANG, S.B.; YU, A.B.; VINCE, A.; BARNETT, G.D. *Numerical analysis of hydrocyclones with different vortex finder configurations*. Minerals Engineering 63, p. 125-138, 2014a.
- GHODRAT, M.; KUANG, S.B.; YU, A.B.; VINCE, A.; BARNETT, G.D.; BARNETT, P.J. *Numerical analysis of hydrocyclones with different conical section designs*. Minerals Engineering 62, p. 74-84, 2014b.
- GOMES, R. H. P. *Separação de emulsões óleo-água em hidrociclones*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia – MG, 2002.
- HENRIQUE, H. M., BARROZO, M. A. S., DAMASCENO, J. J. R., *Estudo da Dinâmica de um Sedimentador Filtrante*. XV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Uberlândia, p. 303-310, 1987.
- HOCHSHEID, R.E. *Horizontal cyclone in closed-circuit grinding*, Minerals Engineering, p.262–266, 1987.

- HUANG, C.; WANG, J.-G.; WANG, J.-Y.; CHEN, C.; WANG, H.-L. *Pressure drop and flow distribution in a mini-hydrocyclone group, UU-type parallel arrangement*. Separation and Purification Technology 103, p.139-150, 2013.
- HWANG, K.-J.; HWANG, Y.-W.; YOSHIDA, H. *Desing of novel hydrocyclone for improving fine particles separation using computational fluid dynamics*. Chemical Engineering Science 85. p. 62-68. 2013.
- JOHNSTONE, R.H. RAIS, S.A. *Increased performance through flash flotation and cyclone optimization*, in: 3rd Mill Ops. Conf., Aus. Inst. Min. Met., Cobar, pp. 79–84, 1988.
- KUANG, S.B.; CHU, K.W.; YU, A.B.; VINCE, A. *Numerical study of liquid-gas-flow in hydrocyclones: Effect of feed solids concentration*. Minerals Engineering 31, p. 17-31, 2012.
- KYRIAKIDIS, Y. N. *Análise do Efeito de Variáveis Geométricas sobre o Desempenho de Hidrociclones Otimizados*. 2014. 148f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2014.
- 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.
- LI, S.; ZHANG, H.; YANG, H.; YANG, S.; LU, J.;YUE, G. *Determinig Cyclone Particle Holdup by Pressure Drop for a CFB Boiler*. Chemical Engineering Technology 30, n.12, p.1726-1731, 2007.
- MARTÍNEZ, L. F.; LAVIN, A. G.; MAHAMUD, M. M.; BUENO, J. L. *Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v.47, n.2, p.192-199, 2008.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 2ed., 2001.
- 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.
- NAGESWARARAO, K. *A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers*. Chemical Engineering Journal 80, p.251–256, 2000.

- NASCIMENTO, M.R.M.; BICALHO, I.C.; MENDONÇA, M.P.; ATAÍDE, C.H. *Separação de emulsões óleo-água em hidrociclones*. In: XXXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2012, Vassouras (RJ). ANAIS ENEMP 2011. Rio de Janeiro, p. 854-861, 2012.
- PANISSET, C. M. A. *Análise e melhorias nas operações envolvidas no sistema de controle de sólidos e no tratamento de efluentes gerados na perfuração de poços*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, MG, 2014.
- PATANKAR, S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Ed. Hemisphere Pub. Co. 1980.
- PETRI JUNIOR, I.; DUARTE, C. R.; ATAÍDE, C. H. Utilização de código comercial de CFD para descrição dos campos de velocidades do líquido em hidrociclone para o tratamento de águas oleosas. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010, Foz do Iguaçu. Anais XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, p. 1552-1558, 2010a.
- PETRI JUNIOR, I.; DUARTE, C. R.; ATAÍDE, C. H.. Aplicação da técnica de CFD na simulação do escoamento líquido-líquido no interior de um hidrociclone com dupla alimentação do tipo voluta. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Sistema Particulados - ENEMP 2009, Campinas - SP. ANAIS DO XXXIV ENEMP. p. 1-9, 2009.
- PETRI JUNIOR, I.; DUARTE, C. R.; VIEIRA, L. G. M.; ATAÍDE, C. H. Estudo numérico (CFD) da fluidodinâmica de um hidrociclone: efeito da divisão e distribuição da malha computacional no tempo total de simulação. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010, Foz do Iguaçu. Anais XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, p.2665-2673, 2010b.
- PETTY, C., PARKS, S. *Flow structures within miniature hydrocyclones*. Minerals Engineering 17, p. 615–624, 2004.
- RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H. *Particle technology and separation processes*. 5th ed. V.2, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 1229 p., 2002.
- RIETEMA, K. *Performance and design of hydrocyclones, parts i to iv*. Chemical Engineering Science, v. 15, p. 298-325, 1961.
- SALVADOR, F. F. *Estudo Experimental do Comportamento de um Hidrociclone com Cone e Cilindro Filtrantes*. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 2013.



- SANTOS, D.A.; GURGEL, M.T.; MOTA, A.F.; PAIVA, F.I.G. *Extração Mineral de Quartzito e sua Aplicabilidade na Construção Civil na Cidade de Várzea – PB*. HOLOS, ano 30, vol.4. p. 89–99, 2014.
- SILVA, D. O. *Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas*. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2012.
- SILVA, D. O; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. *Optimization of Design and Performance of Solid-Liquid Separators: A Thickener Hydrocyclone*. Chemical Engineering Technology, v.38, n.2, p.319-326, 2015a.
- SILVA, D. O; VIEIRA, L. G. M.; LOBATO, F.S.; BARROZO, M. A. S. *Optimization of the design and performance of hydrocyclones by Differential Evolution technique*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v.61, p.1-7, 2012.
- SILVA, M. A. P. *Hidrociclones de Bradley: Dimensionamento e Análise de Desempenho*. 1989. 81 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1989.
- 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.], p. 353-361, 1988.
- SILVA, N. K. G. *Estudo de Otimização da Configuração do Hidrociclone Filtrante*. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado) UFU, Uberlândia, MG, 2014.
- SILVA, N. K. G.; SILVA, D. O; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. *Effects of underflow diameter and vortex finder length on the performance of a newly designed filtering hydrocyclone*. Power Technology 286, p. 305-310, 2015b.
- SOUZA, F. J. *Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante*. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 1999.
- SOUZA, F. J.; NETO, A. S.; BARROZO, M. A. S. *Simulação numérica de escoamentos turbulentos em hidrociclones com modelagem submalha*. II Escola Brasileira de Transição e Turbulência - ETT2000, Uberlândia, p.358-368. [S.l.: s.n.], 2000.
- SVAROVSKY, L. *Hydrocyclone*, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK, 1984. 198p.

SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. 4th Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.

TANG, B.; XU, Y.; SONG, X.; SUN, Z.; YU, J. *Numerical Study on the relationship between high sharpness and configurations of the vortex finder of a hydrocyclone by central composite design*. Chemical Engineering Journal 278, p.504-516, 2015.

VAKAMALLA, T.R.; KUMBHAR, K.S.; GUJJULA, R.; MANGADODDY, N. *Computational and Experimental study of the effect of inclination on hydrocyclone performance*. Separation and Purification Technology 138. p.104-117, 2014.

VIEIRA, L. G. M. *Análise da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclone Filtrante*. [S.l.], 1997.

VIEIRA, L. G. M. *Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema*. 2001. 141 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2001.

VIEIRA, L. G. M. *Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes*. 2006. 297 f. Tese (Doutorado), UFU, Uberlândia, MG, 2006.

VIEIRA, L. G. M.; SILVÉRIO, B. C.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. *Performance of Hydrocyclones with different geometries*. The Canadian Journal of Chemical Engineering. v.89, p.655-662, 2011.

WANG, C.; JI, C.; ZOU, J. *Simulation and Experiment on Transitional Behaviours of Multiphase flow in a Hydrocyclone*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 93, p.1802-1811, 2015.

WENGELER, R., NIRSCHL, H., HERBSTTRITT, F., EHRFELD, W. *Studies on a micro hydrocyclone for liquid-liquid separation*. J. Filtration 6, p. 21-25, 2006.

XU, Y.; SONG, X.; SUN, Z.; TANG, B.; LI, P.; YU, J. *Investigation of the Effect of the Ratio of the Vortex-Finder Diameter to the Spigot Diameter on the Steady State of the Air Core in a Hydrocyclone*. Industrial & Engineering Chemistry Research 52, p.5470-5478, 2013.

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

ZHU, G., LIOW, J.L., NEELY, A. *Computational study of the flow characteristics and separation efficiency in a mini-hydrocyclone*. Chemical Engineering Research and Design 90, p.2135-2147, 2012.

ZHU, G.F., LIOW, J.L., *Experimental study of particle separation and the fishhook effect in a mini-hydrocyclone*. Chemical Engineering Science 111, p.94-105, 2014.

ZHU, G.F., LIOW, J.L., NEELY, A.J. *Computational study of flow in a micro-sized hydrocyclone*. 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, New Zealand, Paper 75, pp. 1-4, 2010.

## APÊNDICE A

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE CONCENTRADOR OTIMIZADO

Tabela A.1 - Resultados experimentais para HCO para  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	330,37	1,11	811,96	17681	62,62	62,20	15,29	15,39	37,55	1,06
1,18	368,02	0,96	872,45	19696	61,28	60,91	14,81	14,91	40,53	1,06
1,47	412,44	0,98	868,28	22073	65,77	65,43	13,58	13,68	41,69	1,06
1,77	452,06	0,91	867,30	24194	62,57	62,22	13,71	13,80	42,33	1,06
Média	390,72	0,99	855,00	20911	63,06	62,69	14,35	14,44	40,52	1,06

Tabela A.2- Resultados experimentais para HCO para  $D_U = 4$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	321,31	4,94	859,26	18341	64,72	62,89	13,22	13,72	11,63	0,99
1,18	370,32	4,28	862,51	21138	65,22	63,67	12,89	13,33	13,26	0,99
1,47	406,27	3,89	895,75	23191	66,98	65,64	12,32	12,73	14,74	0,99
1,77	440,52	3,64	914,24	25146	68,64	67,45	11,44	11,82	15,92	0,99
Média	384,60	4,19	882,94	21954	66,39	64,91	12,47	12,90	13,89	0,99

Tabela A.3 - Resultados experimentais para HCO para  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	321,19	11,00	858,04	16028	65,60	61,35	12,52	13,48	6,21	1,10
1,18	366,57	10,15	878,32	18292	66,86	63,12	12,17	13,02	6,82	1,10
1,47	403,07	9,44	908,07	20114	68,62	65,35	11,20	12,01	7,46	1,10
1,77	440,67	8,86	911,66	21990	67,66	64,52	10,56	11,32	7,82	1,10
Média	382,88	9,86	889,02	19106	67,18	63,58	11,61	12,46	7,08	1,10

Tabela A.4 - Resultados experimentais para HCO com  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 5,5\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$H$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	349,75	3,10	724,05	18086	41,54	39,67	21,09	21,34	43,99	5,53
1,18	398,12	3,09	745,07	20587	42,69	40,87	20,50	20,75	44,74	5,53
1,47	444,05	3,21	748,64	22962	45,13	43,32	19,71	19,97	45,19	5,53
1,77	490,14	3,24	737,36	25345	46,51	44,72	19,25	19,51	45,65	5,53
Média	420,52	3,16	738,78	21745	43,97	42,14	20,14	20,39	44,89	5,53

Tabela A.5 - Resultados experimentais para HCO com  $D_U = 4$  mm e  $C_{VA} = 5,5\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	336,82	3,55	780,67	17333	46,68	44,72	18,38	18,68	44,20	5,68
1,18	383,10	3,61	804,61	19715	48,38	46,44	17,42	17,72	44,64	5,68
1,47	428,99	3,55	802,09	22076	48,13	46,22	17,21	17,51	44,96	5,68
1,77	468,51	3,62	806,96	24110	49,51	47,61	16,82	17,12	45,14	5,68
Média	404,35	3,58	798,58	20809	48,17	46,25	17,46	17,76	44,35	5,68

Tabela A.6 - Resultados experimentais para HCO com  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 5,5\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	320,48	8,83	862,09	16258	57,00	52,84	12,88	13,84	27,47	5,54
1,18	367,89	7,99	872,28	18664	58,00	54,35	12,24	13,09	29,86	5,54
1,47	409,18	7,60	881,39	20758	59,40	56,06	11,80	12,60	31,42	5,54
1,77	446,14	7,37	889,70	22633	60,31	57,15	11,43	12,21	32,42	5,54
Média	385,92	7,95	876,37	19578	58,68	55,10	12,09	12,93	30,29	5,54

Tabela A.7 - Resultados experimentais para HCO com  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 10,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	347,27	3,77	734,01	17329	26,83	23,97	28,13	28,50	44,25	10,03
1,18	399,96	3,93	737,80	19958	29,08	26,18	26,70	27,08	45,22	10,03
1,47	448,17	4,03	734,51	22364	30,70	27,79	25,98	26,36	45,94	10,03
1,77	497,75	4,07	714,56	24838	31,50	28,60	25,33	25,72	46,33	10,03
Média	423,29	3,95	730,22	21122	29,53	26,64	26,53	26,91	45,43	10,03

Tabela A.8 - Resultados experimentais para HCO com  $D_U = 4$  mm e  $C_{VA} = 10,0\%$  v

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	342,34	5,56	755,65	17574	35,72	31,93	23,40	23,88	41,97	10,12
1,18	397,64	5,36	746,79	20412	36,75	33,16	22,71	23,17	43,55	10,12
1,47	443,53	5,39	750,33	22768	39,06	35,58	21,50	21,98	44,91	10,12
1,77	489,63	5,35	738,81	25135	40,50	37,14	20,95	21,41	46,00	10,12
Média	418,29	5,42	747,89	21472	38,01	34,45	22,14	22,61	44,11	10,12

Tabela A.9 - Resultados experimentais para HCO com  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 10,0\%$  v

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
0,88	330,71	8,73	809,37	16503	47,45	42,42	18,08	18,89	37,91	10,10
1,18	382,14	6,60	808,22	19069	47,01	43,27	18,20	18,80	44,44	10,10
1,47	430,45	6,67	796,22	21480	48,50	44,82	17,48	18,08	44,97	10,10
1,77	463,99	6,68	822,33	23154	50,11	46,54	17,10	17,70	45,74	10,10
Média	401,82	7,17	809,03	20051	48,27	44,26	17,72	18,37	43,27	10,10

## APÊNDICE B

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE CÔNICO-FILTRANTE OTIMIZADO

Tabela B.1 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	326,21	0,90	833,53	18475	54,17	53,75	14,70	14,78	37,86	1,00	0,05
1,18	373,92	0,90	845,85	21177	56,65	56,26	14,27	14,34	38,98	1,00	0,06
1,47	412,24	0,90	869,89	23347	59,07	58,69	13,46	13,53	39,92	1,00	0,07
1,77	453,94	0,91	860,90	25709	60,29	59,92	13,18	13,25	40,12	1,00	0,09
Média	391,58	0,90	852,54	22177	57,54	57,16	13,90	13,98	39,22	1,00	0,07

Tabela B.2 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 4$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	321,94	4,66	854,95	17100	59,55	57,58	13,37	13,80	11,40	1,00	0,04
1,18	366,02	4,38	881,87	19441	60,49	58,68	12,47	12,88	12,20	1,00	0,06
1,47	408,45	4,02	885,25	21694	62,33	60,75	11,96	12,33	13,50	1,00	0,07
1,77	441,13	3,84	910,71	23431	61,49	59,95	11,97	12,34	13,89	1,00	0,09
Média	384,39	4,22	883,19	20416	60,97	59,24	12,44	12,84	12,75	1,00	0,06

Tabela B.3 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 1,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	323,21	10,22	847,78	16591	61,11	56,69	12,36	13,45	6,11	1,08	0,04
1,18	369,67	9,50	864,06	18977	63,43	59,59	11,37	12,34	6,77	1,08	0,06
1,47	409,88	9,08	878,57	21041	66,42	63,07	10,63	11,55	7,37	1,08	0,08
1,77	445,50	8,84	892,43	22869	66,07	62,78	9,81	10,62	7,52	1,08	0,09
Média	387,07	9,41	870,71	19870	64,26	60,53	11,04	11,99	6,94	1,08	0,07

Tabela B.4 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 5,5\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	345,65	3,17	741,66	18359	40,12	38,16	21,99	22,25	43,10	5,65	0,03
1,18	399,33	3,17	740,92	21210	41,80	39,89	20,91	21,17	44,13	5,65	0,04
1,47	452,53	3,33	721,17	24036	45,39	43,51	21,70	21,95	44,95	5,65	0,05
1,77	489,62	3,35	739,26	26006	45,69	43,82	19,16	19,43	45,01	5,65	0,07
Média	421,78	3,26	735,75	22403	43,25	41,35	20,94	21,20	44,30	5,65	0,05

Tabela B.5 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 4$  mm e  $C_{VA} = 5,5\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	330,59	3,74	810,57	17302	47,41	45,37	18,75	19,06	43,12	5,64	0,03
1,18	386,50	3,74	790,72	20228	49,24	47,26	17,61	17,92	44,04	5,64	0,04
1,47	436,76	3,76	774,02	22858	50,92	49,01	17,01	17,32	44,73	5,64	0,05
1,77	471,76	3,95	796,10	24690	52,60	50,65	15,99	16,32	44,30	5,64	0,06
Média	406,40	3,80	792,85	21270	50,04	48,07	17,34	17,65	44,05	5,64	0,05

Tabela B.6 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 5,5\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	322,16	8,30	853,64	16960	59,13	55,43	13,45	14,32	28,91	5,40	0,03
1,18	370,74	7,29	859,46	19517	59,92	56,77	12,49	13,24	31,93	5,40	0,04
1,47	408,84	6,07	883,43	21523	62,49	60,06	12,07	12,68	37,00	5,40	0,05
1,77	453,03	5,83	863,36	23850	62,00	59,65	12,07	12,64	37,75	5,40	0,05
Média	388,69	6,87	864,97	20463	60,88	57,98	12,52	13,22	33,90	5,40	0,04



Tabela B.7 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 3$  mm e  $C_{VA} = 10,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	352,06	3,94	714,78	18516	27,96	25,00	28,17	28,55	44,17	10,04	0,02
1,18	405,48	3,77	718,50	21325	27,86	25,03	27,52	27,89	45,21	10,04	0,03
1,47	456,87	3,98	707,41	24028	30,09	27,19	26,46	26,85	45,78	10,04	0,03
1,77	498,89	4,10	711,93	26238	31,86	28,94	24,97	25,38	46,43	10,04	0,04
Média	428,33	3,95	713,16	22527	29,44	26,54	26,78	27,17	45,40	10,04	0,03

Tabela B.8 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 4$  mm e  $C_{VA} = 10,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	341,81	5,61	758,64	18478	37,68	33,98	23,10	23,60	42,67	9,98	0,03
1,18	399,80	5,42	739,35	21613	37,91	34,36	23,10	23,60	43,67	9,98	0,04
1,47	444,30	5,62	748,34	24018	41,54	38,07	21,40	21,91	45,04	9,98	0,04
1,77	491,10	5,68	735,01	26548	43,34	39,93	20,47	20,98	45,83	9,98	0,05
Média	419,25	5,58	745,34	22664	40,12	36,58	22,02	22,52	44,30	9,98	0,04

Tabela B.9 - Resultados experimentais para HCOF para  $D_U = 5$  mm e  $C_{VA} = 10,0\%$  v.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)	$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)
0,88	329,07	8,56	817,92	16973	48,26	43,41	17,85	18,63	38,50	9,99	0,02
1,18	384,63	6,51	798,23	19840	47,71	44,07	18,01	18,60	44,87	9,99	0,05
1,47	423,33	6,55	823,68	21836	49,29	45,74	17,09	17,69	45,53	9,99	0,04
1,77	465,37	6,66	817,91	24004	51,32	47,84	16,56	17,15	46,10	9,99	0,05
Média	400,60	7,07	814,43	20663	49,14	45,27	17,38	18,02	43,75	9,99	0,04

### PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE EFICIÊNCIA DO HCO

O procedimento realizado para construção das curvas de eficiência do hidrociclone HCO, baseia-se na definição de eficiência total e de eficiência total reduzida.

Rearranjando a Equação 2.6 que define a eficiência total reduzida, a eficiência total ( $\eta$ ) de um hidrociclone pode ser correlacionada com sua razão de líquido ( $R_L$ ) e eficiência total reduzida ( $\eta'$ ) conforme Equação C.1.

$$\eta = (1 - R_L)\eta' + R_L \quad (C.1)$$

Ainda, de acordo com a Equação C.2, eficiência total reduzida é a integral da eficiência granulométrica reduzida para a distribuição de partículas do material.

$$\eta' = \int_0^1 G' dX \quad (C.2)$$

A eficiência granulométrica reduzida ( $G'$ ) pode ser representada em função razão entre o diâmetro da partícula coletada ( $d_p$ ) e o diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ), e de dois parâmetros  $N$  e  $m$ , conforme Equação C.3 (MASSARANI, 1989). Desse modo, com base nos dados experimentais de diâmetro de corte reduzido para determinada condição operacional de diâmetro de *underflow* ( $D_U$ ) e concentração volumétrica alimentada ( $C_{VA}$ ), os parâmetros  $N$  e  $m$  foram estimados através de regressão não linear com auxílio do *software* Statística®.

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

Todavia, o diâmetro de determinada partícula ( $d_p$ ) pode ser explicitado a partir da equação que rege o modelo de distribuição granulométrica RRB, assim como representado pela Equação C.4.

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

O diâmetro da partícula é então uma função da fração mássica cumulativa ( $X$ ) e dos parâmetros  $d_{63,2}$  e  $n$  do modelo, independente dos dados experimentais da amostra. A substituição da Equação C.4 em C.3 dá origem a Equação C.5.

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

A substituição da Equação C.5 na Equação C.2, gera uma equação que pode ser integrada a partir da variação aleatória de  $n$  e  $d_{63,2}/d'_{50}$ , visto que os parâmetros  $N$  e  $m$  já foram calculados a partir dos dados experimentais para uma condição operacional específica.

Fixado um valor de  $n$ , que corresponde a determinada granulometria, para cada valor de  $d_{63,2}/d'_{50}$  um valor correspondente de eficiência total reduzida ( $\eta'$ ) é obtido e então é efetuado o cálculo direto da eficiência total ( $\eta$ ) a partir da Equação C.1. Desse modo, é formada uma série de dados de  $\eta'$  para diferentes razões de  $d_{63,2}/d'_{50}$ , para um determinado  $n$ . O mesmo procedimento é realizado alterando o valor de  $n$ , então outra série de dados é obtida. Para cada  $n$ , foi construída uma curva diferente, que foram plotadas num mesmo gráfico, relacionando os dados de eficiência total reduzida ( $\eta'$ ) obtidos frente a variação de  $d_{63,2}/d'_{50}$ .

---



---

**RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS HIDROCICLONES OTIMIZADOS POR SILVA  
(2012) E SILVA (2014)**

Tabela An1.1 - Resultados experimentais para os hidrociclones filtrantes otimizados por SILVA (2014) a 1,47 bar

Respostas	HFOT1	HFOT2	HFOT3
$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	154	283	442
$Eu$	6202	1838	753
$\eta$ (%)	89,11	76,13	66,69
$d_{50}$ (µm)	4,08	7,88	10,54
$R_L$ (%)	46,40	17,12	10,40
$C_{VU}$ (%)	2,01	4,68	6,03
$Q_F$ (cm <sup>3</sup> /s)	0,176	0,135	0,068

Tabela An1.2 - Resultados experimentais para os hidrociclones convencionais otimizados por SILVA (2012) a 1,47 bar

Respostas	HCOT1	HCOT2	HCOT3
$Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	262	309	433
$Eu$	2151	1549	788
$\eta$ (%)	85,53	63,39	52,88
$R_L$ (%)	44,57	9,37	5,08

**RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE RIETEMA (VIEIRA, 2006)**

Tabela An2.1 - Resultados experimentais para Rietema com  $D_U = 3$  mm.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$C_{VU}$ (%)
0,88	289	0,67	1060	14005	41,3	40,9	13,3	13,35	0,9	35,76
1,18	322	0,69	1137	15618	42,86	42,46	12,86	12,9	0,9	36,02
1,47	358	0,67	1147	17384	44,63	44,26	12,43	12,47	0,9	37,81
1,77	392	0,64	1151	19009	46,76	46,38	11,81	11,85	0,9	39,02

Tabela An2.2 - Resultados experimentais para Rietema para  $D_U = 4$  mm.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$C_{VU}$ (%)
0,88	292	5,35	1040	14142	46,6	43,58	10,62	11,06	0,93	7,90
1,18	328	5,13	1094	15920	47,29	44,44	10,31	10,72	0,93	7,90
1,47	361	4,91	1130	17518	50,32	47,96	9,59	9,98	0,93	8,87
1,77	378	4,74	1237	18340	52,73	50,38	9,07	9,44	0,93	9,52

Tabela An2.3 - Resultados experimentais para Rietema para  $D_U = 5$  mm.

$-\Delta P$ (bar)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$ (-)	$Re$ (-)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)	$d_{50}$ ( $\mu$ m)	$d'_{50}$ ( $\mu$ m)	$C_{VA}$ (%)	$C_{VU}$ (%)
0,88	300	12,92	981	14562	53,31	46,38	8,45	9,78	0,91	3,66
1,18	345	12,28	992	16724	53,81	47,35	8,35	9,53	0,91	3,83
1,47	375	12,27	1048	18188	53,95	47,51	8,02	9,46	0,91	4,04
1,77	412	11,79	1043	19968	55,88	50,00	7,86	9,07	0,91	4,18