



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



CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCICLONES COM CILINDROS E CONES PERMEÁVEIS

ÉRICA VICTOR DE FARIA

Uberlândia – MG

2022



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



CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCICLONES COM CILINDROS E CONES PERMEÁVEIS

ÉRICA VICTOR DE FARIA

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira

Marcos Antonio de Souza Barrozo

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

Uberlândia – MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F224 2022	Faria, Érica Victor de, 1993- CARACTERIZAÇÃO DE HIDROCICLONES COM CILINDROS E CONES PERMEÁVEIS [recurso eletrônico] / Érica Victor de Faria. - 2022. Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira. Coorientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.482 Inclui bibliografia. 1. Engenharia química. I. Vieira, Luiz Gustavo Martins ,1976-, (Orient.). II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza ,1961-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título. CDU: 66.0
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 14/2022, PPGEQ				
Data:	29 de agosto de 2022	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:22
Matrícula do Discente:	11813EQU005				
Nome do Discente:	Érica Victor de Faria				
Título do Trabalho:	Caracterização de hidrociclones com cilindros e cones permeáveis				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo experimental e de simulação em hidrociclones não convencionais				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Isabele Cristina Bicalho - DEG/UFLA; Eduardo Hiromitsu Tanabe - DEQ/UFSM; Yanne Novais Kyriakidis - FEQUI/UFU; Danylo de Oliveira Silva - FEQUI/UFU; Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Isabele Cristina Bicalho, Usuário Externo**, em 29/08/2022, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2022, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danylo de Oliveira Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2022, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yanne Novais Kyriakidis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2022, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Hiromitsu Tanabe, Usuário Externo**, em 29/08/2022, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2022, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3875295** e o código CRC **164CDA14**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar ao longo de toda a minha vida, por me ter permitido chegar aonde estou e ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho.

Agradeço aos meus familiares que sempre me apoiaram e incentivaram com palavras de carinho. Em especial aos meus pais, Roseni e José Ulisses, que com amor sempre me incentivaram e proporcionaram a oportunidade de estudar. Sem vocês eu com certeza não teria chegado até aqui. Aos meus irmãos, Rafael e Pedro, à minha avó Lia e aos meus tios e primos por sempre me apoiarem e acreditarem em mim. Ao Virgílio, por todo carinho, paciência, companheirismo e apoio incentivando-me diariamente. Obrigada por sempre estar presente.

Aos meus orientadores, Luiz Gustavo Martins Vieira e Marcos Antonio de Souza Barrozo por todo o apoio, dedicação, oportunidades e ensinamentos. Obrigada queridos professores pela confiança depositada em mim como pesquisadora.

Às professoras Isabele Cristina Bicalho e Yanne Novais Kyriakidis e aos professores Danylo de Oliveira Silva e Eduardo Hiromitsu Tanabe, agradeço por aceitarem compor a banca examinadora e pelas valiosas contribuições para a melhoria desta tese.

A todos os amigos que estiveram comigo nessa jornada, com os quais tive o prazer de conviver durante a pós-graduação, por compartilharem comigo momentos divertidos e as dificuldades desse período.

Aos amigos do Laboratório de Separação e Energias Renováveis, do Laboratório de Processos de Separação e do Laboratório de Separação Sólido-Fluido que sempre foram extraordinariamente prestativos em ajudar em todas as situações, e por tornarem a rotina de laboratório mais leve e agradável.

À Universidade de Uberlândia, em especial aos professores, técnicos e demais funcionários da Faculdade de Engenharia Química, que contribuíram para a minha formação e concretização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade concedida, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Meus mais sinceros agradecimentos.

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

Ayrton Senna

*“Tudo o que fizerdes,
fazei-o de todo o coração. ”*

Colossenses 3:23

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	i
Lista de tabelas.....	viii
Lista de símbolos.....	xi
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	5
2. Revisão Bibliográfica.....	6
2.1. Características gerais dos hidrociclones	6
2.2. Principais indicadores de desempenho de separação em hidrociclones	10
2.2.1 – Vazões Volumétricas (Q , Q_U)	10
2.2.2 – Número de Euler (Eu).....	11
2.2.3 – Concentração Volumétrica de Sólidos no <i>Underflow</i> (C_{VU})	11
2.2.4 – Razão de Líquido (R_L)	12
2.2.5 – Eficiência Total (E_T) e Eficiência Total Reduzida (E_T')	13
2.2.6 – Eficiência Granulométrica (G) e Diâmetro de Corte (d_{50})	13
2.3. Dimensões geométricas e famílias de hidrociclones	15
2.4. Estudos em Hidrociclones Filtrantes na FEQUI/UFU.....	17
2.5. Trabalhos Correlatos.....	28
3. Material e Métodos	33
3.1. Material Particulado.....	33
3.1.1. Preparação do Material Particulado.....	34
3.2. Hidrociclones	36
3.3. Unidade Experimental	41
3.4. Planejamentos Experimentais	42
3.5. Procedimento Experimental.....	45

3.6. Curvas de Eficiência ou Caracterização dos Hidrociclones	47
4. Resultados e Discussão	48
4.1. Estudo de desempenho dos hidrociclones pertencentes ao caso 1a (maximização da eficiência total para hidrociclones H _{CoF})	48
4.1.1. Vazão de alimentação e Número de Euler.....	49
4.1.2. Concentração de sólidos do <i>underflow</i> e Razão de líquido	57
4.1.3. Eficiência total e diâmetro de corte	64
4.2. Estudo de desempenho dos hidrociclones pertencentes ao caso 1b (maximização da eficiência total para hidrociclones H _{CoF})	71
4.2.1. Vazão de alimentação e Número de Euler.....	72
4.2.2. Razão de líquido e Concentração de sólidos do <i>underflow</i>	77
4.2.3. Eficiência total e diâmetro de corte	82
4.3. Estudo de desempenho dos hidrociclones pertencentes ao Caso 3a (minimização do número de Euler para hidrociclones H _{CoF})	88
4.3.1. Vazão de alimentação e Número de Euler.....	89
4.3.2. Razão de líquido e Concentração de sólidos do <i>underflow</i>	96
4.3.3. Eficiência total e diâmetro de corte	101
4.4. Estudo de desempenho dos hidrociclones pertencentes ao Caso 3b (minimização do número de Euler para hidrociclones H _{CoF})	107
4.4.1. Vazão de alimentação e Número de Euler.....	107
4.4.2. Razão de líquido e Concentração de sólidos do <i>underflow</i>	113
4.4.3. Eficiência total e diâmetro de corte	118
4.5. Comparação entre os Hidrociclones	122
4.5.1. Hidrociclones classificadores	123
4.5.2. Hidrociclones concentradores.....	128
5. Conclusões e Sugestões	134
5.1. Conclusões	134
5.2. Sugestões.....	136

Referências	138
Apêndice A	143
Resultados Experimentais para os Hidrociclones Filtrantes e Convencionais	143
A.1 - Resultados dos Planejamentos para os Hidrociclones do caso 1a.....	143
A.2 - Resultados dos Planejamentos para os Hidrociclones do caso 1b.....	145
A.3 - Resultados dos Planejamentos para os Hidrociclones do caso 3a.....	147
A.4 - Resultados dos Planejamentos para os Hidrociclones do caso 3b.....	149
A.5 - Desvios experimentais das respostas analisadas considerando as réplicas do ponto central	151
Apêndice B.....	152
Levantamento das Curvas de Eficiência dos Hidrociclones.....	152
Anexo I.....	154
I - Resultados Experimentais para os Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes e Convencionais obtidos por Ascendino (2019)	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-1 – Representação esquemática de um hidrociclone convencional.	7
Figura 2.1-2 – Representação do escoamento no interior de hidrociclones.	7
Figura 2.1-3 – Forças que atuam em uma partícula no interior de um hidrociclone.	8
Figura 2.1-4 – Decomposição do vetor velocidade para uma partícula no interior de um hidrociclone.	9
Figura 2.3-1 – Dimensões características de um hidrociclone.	15
Figura 2.4-1 – Representação esquemática de um hidrociclone convencional (HCon), um hidrociclone cônico-filtrante (HCoF), um hidrociclone cilíndrico-filtrante (HCiF) e um hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante (HCiCoF).	18
Figura 3.1-1 – Moinho de bolas utilizado na cominuição do material particulado.	34
Figura 3.1-2 – Distribuição granulométrica característica do quartzito moído.	35
Figura 3.2-1 – Hidrociclones classificadores (a) HCiCoF _{1a} , (b) HCoF _{1b} e (c) HCiF _{1c}	38
Figura 3.2-2 – Hidrociclones concentradores (a) HCiCoF _{3a} , (b) HCoF _{3b} e (c) HCiF _{3c}	39
Figura 3.2-3 – Detalhes do filtro de bronze sinterizado antes do processo de colmatção, por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (Partículas de Bronze sinterizado).	40
Figura 3.2-4 – Detalhes com menor foco em microscopia eletrônica de varredura (MEV) de partículas de bronze sinterizado do meio filtrante após o processo de colmatção, à esquerda. À direita, detalhes de partículas de quartzito nos interstícios.	40
Figura 3.3-1 – Unidade experimental utilizada nos experimentos de hidrociclonagem.	41
Figura 3.4-1 – Orifícios de <i>underflow</i> intercambiáveis (D_U de 5 mm, 4 mm e 3 mm).	44
Figura 4.1-1 – Vazão de alimentação para hidrociclones HCon _{1a} e HCiCoF _{1a} com $D_U = 3$ mm.	49
Figura 4.1-2 – Vazão de alimentação para hidrociclones HCon _{1a} e HCiCoF _{1a} com $D_U = 4$ mm.	50
Figura 4.1-3 – Vazão de alimentação para hidrociclones HCon _{1a} e HCiCoF _{1a} com $D_U = 5$ mm.	50
Figura 4.1-4 – Número de Euler para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 3$ mm.	51
Figura 4.1-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 4$ mm.	51
Figura 4.1-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 5$ mm.	52

Figura 4.1-7 – Superfícies de Resposta para (a) vazão de alimentação (Q) e (b) número de Euler (Eu) para o hidrociclone HCiCoF _{1a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	54
Figura 4.1-8 – Vazão de filtrado para o hidrociclone HCiCoF _{1a}	56
Figura 4.1-9 – Concentração volumétrica de sólidos do <i>underflow</i> para os hidrociclones HCon _{1a} e HCiCoF _{1a} com $D_U = 3$ mm.	57
Figura 4.1-10 – Concentração volumétrica de sólidos do <i>underflow</i> para os hidrociclones HCon _{1a} e HCiCoF _{1a} com $D_U = 4$ mm.	57
Figura 4.1-11 – Concentração volumétrica de sólidos do <i>underflow</i> para os hidrociclones HCon _{1a} e HCiCoF _{1a} com $D_U = 5$ mm.	58
Figura 4.1-12 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 3$ mm.	59
Figura 4.1-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 4$ mm.	59
Figura 4.1-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 5$ mm.	60
Figura 4.1-15 – Superfícies de Resposta para (a) Concentração do <i>underflow</i> (C_{VU}) e (b) razão de líquido (R_L) para o hidrociclone HCiCoF _{1a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	62
Figura 4.1-16 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 3$ mm.	64
Figura 4.1-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 4$ mm.	64
Figura 4.1-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 5$ mm.	65
Figura 4.1-19 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 3$ mm.	66
Figura 4.1-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 4$ mm.	66
Figura 4.1-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF _{1a} e HCon _{1a} com $D_U = 5$ mm.	66
Figura 4.1-22 – Superfícies de Resposta para (a) eficiência total (E_T) e (b) diâmetro de corte (d_{50}) para o hidrociclone HCiCoF _{1a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	69
Figura 4.2-1 – Vazão de filtrado HCoF _{1b}	71

Figura 4.2-2 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 3$ mm.	72
Figura 4.2-3 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 4$ mm.	72
Figura 4.2-4 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 5$ mm.	73
Figura 4.2-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 3$ mm.	73
Figura 4.2-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 4$ mm.	73
Figura 4.2-7 – Número de Euler para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 5$ mm.	74
Figura 4.2-8 – Superfícies de Resposta para a vazão de alimentação (Q) do hidrociclone HCoF _{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	75
Figura 4.2-9 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HCoF _{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	75
Figura 4.2-10 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 3$ mm.	77
Figura 4.2-11 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 4$ mm.	77
Figura 4.2-12 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 5$ mm.	78
Figura 4.2-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 3$ mm.	78
Figura 4.2-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 4$ mm.	79
Figura 4.2-15 – Razão de líquido para os hidrociclones HCon _{1b} e HCoF _{1b} com $D_U = 5$ mm.	79
Figura 4.2-16 – Superfícies de Resposta para Concentração do <i>underflow</i> e razão de líquido do hidrociclone HCoF _{1b} segundo o par X_1 - X_2 , nos níveis centrais dos demais fatores.	81
Figura 4.2-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b} com $D_U = 3$ mm.	82
Figura 4.2-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b} com $D_U = 4$ mm.	83
Figura 4.2-19 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b} com $D_U = 5$ mm.	83
Figura 4.2-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b} com $D_U = 3$ mm.	84
Figura 4.2-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{1b} e Hcon _{1b} com $D_U = 4$ mm.	84
Figura 4.2-22 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HcoF _{1b} e Hcon _{1b} com $D_U = 5$ mm.	84
Figura 4.2-23 – Superfícies de Resposta para eficiência total (E_T) do hidrociclone HCoF _{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 nos níveis centrais dos demais fatores.	86

Figura 4.2-24 – Superfícies de Resposta para o diâmetro de corte (d_{50}) do hidrociclone HCoF _{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	86
Figura 4.3-1 – Vazão de filtrado para os hidrociclones HCoF _{3a}	88
Figura 4.3-2 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} , $D_U = 3$ mm.	89
Figura 4.3-3 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} , $D_U = 4$ mm.	89
Figura 4.3-4 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} , $D_U = 5$ mm.	89
Figura 4.3-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 3$ mm.	90
Figura 4.3-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 4$ mm.	90
Figura 4.3-7 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 5$ mm.	91
Figura 4.3-8 – Superfícies de Resposta para vazão de alimentação (Q) do hidrociclone HCoF _{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	94
Figura 4.3-9 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HCoF _{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	94
Figura 4.3-10 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 3$ mm.	96
Figura 4.3-11 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 4$ mm.	96
Figura 4.3-12– Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 5$ mm.	97
Figura 4.3-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 3$ mm.	98
Figura 4.3-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 4$ mm.	98
Figura 4.3-15 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 5$ mm.	98

Figura 4.3-16 – Superfícies de Resposta para (a) concentração de sólidos do <i>underflow</i> e (b) razão de líquido do hidrociclone HCoF _{3a} segundo o par X_1 - X_2 , nos níveis centrais dos demais fatores.	100
Figura 4.3-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 3$ mm.	102
Figura 4.3-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 4$ mm.	102
Figura 4.3-19 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 5$ mm.	102
Figura 4.3-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 3$ mm.	103
Figura 4.3-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 4$ mm.	103
Figura 4.3-22 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a} com $D_U = 5$ mm.	104
Figura 4.3-23 – Superfícies de Resposta para eficiência total (E_T) do hidrociclone HCoF _{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	105
Figura 4.3-24 – Superfícies de Resposta para diâmetro de corte (d_{50}) do hidrociclone HCoF _{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	105
Figura 4.4-1 – Vazão de filtrado para o hidrociclone HCoF _{3b}	107
Figura 4.4-2 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} $D_U = 3$ mm.	108
Figura 4.4-3 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} $D_U = 4$ mm.	108
Figura 4.4-4 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} $D_U = 5$ mm.	108
Figura 4.4-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 3$ mm.	109
Figura 4.4-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 4$ mm.	109
Figura 4.4-7 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 5$ mm.	110
Figura 4.4-8 – Superfícies de Resposta para (a) número de Euler (E_u) e (b) vazão de alimentação (Q) do hidrociclone HCoF _{3b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.	111
Figura 4.4-9 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 3$ mm.	113
Figura 4.4-10 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 4$ mm.	113

Figura 4.4-11– Concentração volumétrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 5$ mm.	113
Figura 4.4-12 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 3$ mm.	114
Figura 4.4-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} $D_U = 4$ mm.....	115
Figura 4.4-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} $D_U = 5$ mm.....	115
Figura 4.4-15 – Superfícies de resposta para concentração de sólidos do <i>underflow</i> (C_{VU}) e razão de líquido (R_L) do hidrociclone HCoF _{3b} segundo par X_1 - X_2 , nos níveis centrais dos demais fatores.	116
Figura 4.4-16 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 3$ mm. .	118
Figura 4.4-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 4$ mm. .	119
Figura 4.4-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 5$ mm. .	119
Figura 4.4-19 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 3$ mm.	120
Figura 4.4-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 4$ mm.	120
Figura 4.4-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b} com $D_U = 5$ mm.	120
Figura 4.5-1 – Eficiência total e número de Euler para os hidrociclones do caso 1 ao operar com 1,0 % em volume de sólidos na alimentação.	124
Figura 4.5-2 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{1b} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 1,0 %v.	125
Figura 4.5-3 – Curva de eficiência total (E_T) de HCon _{1c} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 1,0 %v.	125
Figura 4.5-4 – Eficiência total e número de Euler para os hidrociclones do caso 1 ao operar com 5,5 % em volume de sólidos na alimentação.	126
Figura 4.5-5 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{1b} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 5,5 %v.	126
Figura 4.5-6 – Eficiência total e número de Euler para os hidrociclones do caso 1 ao operar com 10,0 % em volume de sólidos na alimentação.	127
Figura 4.5-7 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{1a} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.	127

Figura 4.5-8 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{1b} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.	128
Figura 4.5-9 – Razão de líquido e eficiência total para os hidrociclones do caso 3 ao operar com 1,0 % em volume de sólidos na alimentação.	129
Figura 4.5-10 – Razão de líquido e eficiência total para os hidrociclones do caso 3 ao operar com 5,5 % em volume de sólidos na alimentação.	130
Figura 4.5-11 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{3a} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 5,5 %v.	131
Figura 4.5-12 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{3a} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 5,5 %v.	131
Figura 4.5-13 – Razão de líquido e eficiência total para os hidrociclones do caso 3 ao operar com 10,0 % em volume de sólidos na alimentação.	132
Figura 4.5-14 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{3c} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.	133
Figura 4.5-15 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF _{3c} para diâmetro de <i>underflow</i> (D_U) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.3-1 – Relações geométricas de famílias de hidrociclones.	17
Tabela 3.1-1 – Composição química do quartzito.	34
Tabela 3.2-1 – Dimensões geométricas dos hidrociclones.	39
Tabela 3.4-1 – Matriz de planejamento para os experimentos.	43
Tabela 3.4-2 – Correspondência entre os fatores e as suas formas codificadas.	45
Tabela 4.1-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCoF _{1a}	53
Tabela 4.1-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HCoF _{1a} e HCon _{1a}	55
Tabela 4.1-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido do hidrociclone HCoF _{1a}	61
Tabela 4.1-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido dos hidrociclones HCoF _{1a} e HCon _{1a}	63
Tabela 4.1-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone HCoF _{1a}	67
Tabela 4.1-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF _{1a} e HCon _{1a}	70
Tabela 4.2-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCoF _{1b}	74
Tabela 4.2-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b}	76
Tabela 4.2-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido do hidrociclone HCoF _{1b}	80
Tabela 4.2-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido dos hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b}	82
Tabela 4.2-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte do hidrociclone HCoF _{1b}	85

Tabela 4.2-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF _{1b} e HCon _{1b}	87
Tabela 4.3-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCoF _{3a}	91
Tabela 4.3-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a}	95
Tabela 4.3-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração do <i>underflow</i> e razão de líquido do hidrociclone HCoF _{3a}	99
Tabela 4.3-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido dos hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a}	101
Tabela 4.3-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte do hidrociclone HCoF _{3a}	104
Tabela 4.3-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF _{3a} e HCon _{3a}	106
Tabela 4.4-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCoF _{3b}	110
Tabela 4.4-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b}	112
Tabela 4.4-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido do hidrociclone HCoF _{3b}	116
Tabela 4.4-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do <i>underflow</i> e razão de líquido dos hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b}	117
Tabela 4.4-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b}	121
Tabela 4.4-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF _{3b} e HCon _{3b}	122
Tabela 4.5-1 – Resultados experimentais para o HCon _{3c} e comparativo dos demais hidrociclones com menores razões de líquido em relação ao HCon _{3c}	129

Tabela A. 1 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCoF _{1a} .	143
Tabela A. 2 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon _{1a} .	144
Tabela A. 3 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCoF _{1b} .	145
Tabela A. 4 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon _{1b} .	146
Tabela A. 5 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCoF _{3a} .	147
Tabela A. 6 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon _{3a} .	148
Tabela A. 7 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCoF _{3b} .	149
Tabela A. 8 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon _{3b} .	150
Tabela A. 9 – Desvios-padrão experimentais das grandezas analisadas para os hidrociclones das matrizes de planejamento (pontos centrais).....	151
Tabela I. 1 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon _{1c} .	154
Tabela I. 2 – Resultados Experimentais para o hidrociclone HCoF _{1c} .	155
Tabela I. 3 – Resultados Experimentais para o hidrociclone HCon _{3c} .	156
Tabela I. 4 – Resultados Experimentais para o hidrociclone HCoF _{3c} .	157

LISTA DE SÍMBOLOS

C_V	Concentração volumétrica de sólidos, [%]
C_{VA}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, [%]
C_{VU}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , [%]
C_{WA}	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação, [%]
C_{WU}	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , [%]
d_{50}	Diâmetro de corte, [μm]
d'_{50}	Diâmetro de corte reduzido, [μm]
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, [μm]
D_c	Diâmetro da seção cilíndrica do hidrociclone, [mm]
D_i	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone, [mm]
D_o	Diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone, [mm]
d_p	Diâmetro da partícula, [μm]
D_U	Diâmetro do duto de <i>underflow</i> do hidrociclone, [mm]
E_T	Eficiência total, [%]
E_T'	Eficiência reduzida, [%]
Eu	Número de Euler, [–]
G	Eficiência granulométrica, [%]
G'	Eficiência granulométrica reduzida, [%]
H	Comprimento da seção cônica do hidrociclone, [mm]
h	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, [mm]
L	Comprimento total do hidrociclone, [mm]
ℓ	Comprimento do <i>vortex finder</i> , [mm]
n	Parâmetro ajustado do modelo RRB, [–]
Q	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone, [cm^3/s]
Q_F	Vazão volumétrica da corrente de filtrado do hidrociclone, [cm^3/s]
Q_O	Vazão volumétrica da corrente de <i>overflow</i> do hidrociclone, [cm^3/s]
Q_U	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i> do hidrociclone, [cm^3/s]
R_L	Razão de líquido, [%]
u_c	Velocidade do fluido na seção cilíndrica, [m/s]
W	Vazão mássica da corrente de alimentação, [g/s]
W_U	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i> , [g/s]

X_i	Variável i codificada, [–]
X_1	Variável codificada concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação [–]
X_2	Variável codificada diâmetro de <i>underflow</i> [–]
X_3	Variável codificada queda de pressão [–]
X_4	Variável codificada filtração [–]
Y	Fração mássica de partículas com diâmetro igual ou menor a dp na corrente de alimentação, [%]

Símbolos Gregos

$-\Delta P$	Queda de pressão, [bar]
θ	Ângulo da seção cônica do hidrociclone, [°]
μ	Viscosidade do fluido, [g/(cm·s)]
ρ	Densidade da corrente do líquido, [g/cm ³]
ρ_A	Densidade da corrente de alimentação, [g/cm ³]
ρ_s	Densidade das partículas sólidas, [g/cm ³]
ρ_u	Densidade da corrente de <i>underflow</i> , [g/cm ³]

RESUMO

Estudos publicados sobre hidrociclones até o ano de 2022 relatam seu uso majoritariamente no processamento de suspensões diluídas. No entanto, suspensões com altas concentrações de sólidos são mais comumente encontradas em práticas industriais e o uso de hidrociclones nesses casos pode resultar em separações pouco eficientes. Com o propósito de melhorar o desempenho desses separadores, modificações em sua estrutura têm sido estudadas, como a associação da operação de filtração à hidrociclonagem. O hidrociclone filtrante apresenta a parede cilíndrica, cônica ou ambas, constituídas em material poroso, e apresenta uma saída adicional (filtrado) para o fluido. Diante desse contexto, um estudo experimental foi proposto para avaliar o desempenho de geometrias otimizadas de hidrociclones com cilindros e/ou cones filtrantes (HCiCoF-OT1 e HCoF-OT3, HCoF-OT1 e HCoF-OT3), sugeridas por Salvador (2017), operando suspensões contendo até 10,0 % de sólidos em volume. Para isso, desenvolveu-se um planejamento experimental para cada equipamento, no qual foram avaliados três níveis das variáveis de interesse: concentração volumétrica de sólidos na alimentação (C_{VA}), diâmetro de *underflow* (D_U) e queda de pressão ($-ΔP$). Os efeitos da filtração foram estimados através da comparação com equipamentos convencionais (paredes totalmente maciças) de mesma geometria. Em todos os casos observou-se que o consumo energético foi reduzido para os hidrociclones filtrantes; e que o aumento de C_{VA} levou à redução da eficiência total. Para os hidrociclones de geometrias HCoF-OT1 e HCoF-OT1 a eficiência total foi maximizada com o aumento dos níveis de D_U e $-ΔP$. Esses equipamentos foram capazes de promover altas eficiências totais de separação, obtendo-se $E_T = 85 \%$ para HCoF-OT1 e $E_T = 86 \%$ para HCoF-OT1 com o processamento de suspensões diluídas ($C_{VA} = 1,0 \%$); e foram alcançadas eficiências de 79 % (HCoF-OT1) e 77 % (HCoF-OT1) para suspensões concentradas ($C_{VA} = 10,0 \%$). Os hidrociclones de geometrias HCoF-OT3 e HCoF-OT3 proporcionaram baixas razões de líquido para todas as concentrações estudadas. Sendo que HCoF-OT3 apresentou R_L de 0,6 % para a suspensão diluída ($C_{VA} = 1,0 \%$), e de 4,0 % para a mais concentrada ($C_{VA} = 10,0 \%$), o que ratifica o alto potencial concentrador desses separadores. A razão de líquido nesses equipamentos foi minorada para menores diâmetros de *underflow*. Para suspensões diluídas, a razão de líquido foi minorada para os hidrociclones convencionais; já para suspensões concentradas os equipamentos filtrantes apresentaram uma melhor alternativa por proporcionar um menor consumo energético e R_L estatisticamente iguais.

Palavras-chave: separação sólido-líquido, filtração, suspensões concentradas, concentração de sólidos, diâmetro de *underflow*.

ABSTRACT

Published studies on hydrocyclones up to 2022 mostly report their use in the processing of dilute suspensions. However, high concentrations of solids, is more commonly encountered in industrial practices, and the use of hydrocyclones in these cases can result in inefficient separations. Possible changes in the structure of hydrocyclones have been studied to improve the performance of these separators, such as the association of filtration and hydrocycloning operation. The filtering hydrocyclone has a cylindrical wall, conical wall, or both, made of porous material, and has an additional outflow (filtered) for the fluid. Given this context, this experimental study intended to evaluate the performance of optimal geometries of hydrocyclones with filtering cylinders and cones (HCiCoF-OT1 and HCiCoF-OT3, HCoF-OT1 and HCoF-OT3), proposed by Salvador (2017), operating with suspensions with different solids concentrations. For this, an experimental design was developed for each hydrocyclone to evaluate the effects of filtration and three levels of the variables of interest: feed solids concentration (C_{VA}), underflow diameter (D_U), and pressure drop ($-AP$). In all cases, it was observed that the energy consumption was reduced for the filtering hydrocyclones; and the increase in the feed solids concentration led to a reduction in the total efficiency. For the hydrocyclones of HCiCoF-OT1 and HCoF-OT1 geometries, the total efficiency was minimized with the increase of C_{VA} and reduction of the variables underflow diameter and pressure drop. The maximum total efficiency achieved was 85 % for HCiCoF-OT1 and 86 % for HCoF-OT1 operating with D_U of 5 mm, pressure drop of 1.77 bar, and 1.0 %v. of solids in the feed. These hydrocyclones also provided high total efficiencies in suspensions containing 10.0 %v. solids, reaching 79 % (HCiCoF-OT1) and 77 % (HCoF-OT1). The hydrocyclones of HCiCoF-OT3 and HCoF-OT3 geometries showed low split ratios for all concentrations studied. HCiCoF-OT3 presented R_L of 0.6 % for the most diluted suspension ($C_{VA} = 1.0$ %v.), and 4.0 % for the most concentrated ($C_{VA} = 10.0$ %v.). To these hydrocyclones the split ratio was lower for dilute suspensions, smaller underflow diameters, and conventional equipment; for concentrated suspensions, the filtering equipment presented a better alternative for providing a lower energy consumption and statistically equal R_L .

Keywords: solid-liquid separation, filtration, slurries, solids concentration, underflow diameter.

1. INTRODUÇÃO

Como uma das tecnologias de separação mecânica mais eficazes e de baixo custo, a separação por hidrociclone é amplamente empregada. São equipamentos muito versáteis quando comparados a outros separadores devido às suas vantagens incluindo alta eficiência de separação, baixo consumo energético, baixo custo de instalação, ampla faixa de operação e pequena necessidade de manutenção devido à ausência de partes móveis. A primeira patente de hidrociclone data de 1891 e este projeto visava a remoção de contaminantes pesados em uma corrente de água através do movimento rotacional do fluido (BERGSTRÖM, 2006). No entanto, as primeiras aplicações industriais de hidrociclones são relatadas ao final da 2ª Guerra Mundial, na separação de material sólido disperso em um líquido de menor densidade, em Minas Estatais Holandesas (RIETEMA, 1961).

No âmbito industrial, os hidrociclones são equipamentos muito utilizados em processos de separação sólido-líquido. No entanto, as aplicações do hidrociclone podem ser divididas em mais três categorias diferentes de separações de fase: a separação de sólidos de sólidos, a separação de líquidos de líquidos e a separação de gases de líquidos. A aplicação desses separadores se dá em diferentes áreas, a destacar os setores mineral, químico, alimentício, biotecnológico e petroquímico, além de inúmeros setores no tratamento de efluentes.

Trata-se de um equipamento de estrutura simples, sendo basicamente constituído por uma parte cilíndrica acoplada a uma parte cônica. Tipicamente o duto de alimentação está localizado tangencialmente à parede cilíndrica. No topo da seção cilíndrica há um tubo coaxial que é prolongado para o interior do hidrociclone denominado de *vortex finder*, pelo qual é descarregada a corrente de *overflow*. A outra saída está localizada na parte mais estreita do tronco de cone, a partir da qual tem-se o orifício de *underflow*.

O princípio de separação nesse equipamento é a sedimentação centrífuga. A energia de pressão adquirida através do bombeamento da suspensão e a alimentação tangencial são responsáveis pelo movimento rotacional do fluido. O escoamento em um hidrociclone é frequentemente descrito como a combinação de um fluxo descendente helicoidal externo e um fluxo ascendente helicoidal interno (BERGSTRÖM, 2006). Após a suspensão ser introduzida

tangencialmente na parte cilíndrica, as partículas são separadas de acordo com seus tamanhos e densidades. Partículas maiores e cuja densidade é maior do que a densidade do fluido são direcionadas para a parede, sofrem a ação das forças centrífuga e gravitacional, e são direcionadas ao orifício de *underflow*. Por outro lado, as partículas menores e menos densas seguem a trajetória do vórtice interno e são direcionadas, através do *vortex finder*, em direção à saída do *overflow* (SVAROVSKY, 2000; MORGAN, 2005).

Destaca-se a aplicação da hidrociclonagem em três processos: classificação, espessamento e clarificação. A classificação consiste em separar uma quantidade inicial de partículas com base em suas diferenças de tamanho (MACHACA, 2010). O espessamento é utilizado quando a principal finalidade em um processo é o de garantir uma alta concentração de sólidos na corrente de *underflow*. Geralmente, os equipamentos desenvolvidos para essa finalidade não apresentam uma alta eficiência total de separação, uma vez que a maior parte da fase líquida é direcionada para o *overflow*, o que ocasiona o arraste de partículas para esta corrente. Por fim, a clarificação é empregada quando o principal objetivo é produzir um *overflow* limpo, com a menor quantidade possível de partículas, obtendo a clarificação do efluente. Svarovsky (2000) cita que alterar as dimensões geométricas de um hidrociclone influencia nas características dessas aplicações.

Com o propósito de melhorar o desempenho desses separadores e de adequá-los a processos específicos, vários estudos vêm sendo realizados para o projeto e construção de hidrociclones não-convencionais. Sendo assim, têm sido investigadas modificações na estrutura de hidrociclones através da alteração de seus aspectos geométricos, ou até mesmo da associação de uma ou mais operações unitárias simultâneas à hidrociclonagem. Neste contexto destacam-se os hidrociclones filtrantes, enfoque deste trabalho.

A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) vem desenvolvendo desde a década de 1980 hidrociclones não-convencionais com o objetivo de otimizar a separação nesses equipamentos. Para isso, a incorporação de uma ou mais seções filtrantes nos hidrociclones foi e continua sendo objeto de estudo dos pesquisadores da Instituição (SOUZA, 1999; VIEIRA, 2001; ARRUDA, 2003; VIEIRA, 2006; ALMEIDA, 2008; FAÇANHA, 2012; SALVADOR, 2013; SILVA, 2014; GONÇALVES, 2016; SALVADOR, 2017 e ASCENDINO, 2019).

Nestes equipamentos não convencionais, as principais paredes maciças do equipamento (partes cilíndrica, cônica ou ambas) são substituídas por paredes porosas. O processo de separação em hidrociclones filtrantes é semelhante ao dos hidrociclones convencionais (aqueles

com paredes completamente maciças), sendo que o que difere os novos equipamentos dos convencionais é a presença de uma pequena corrente adicional de fluido (inferior a 1 % da vazão de alimentação), advinda da filtração nas regiões permeáveis do separador. Além disso, não há formação de torta sobre a parede permeável devido às elevadas tensões cisalhantes no interior do equipamento (SILVA, 2014).

Apesar da baixa vazão de filtrado, a filtração modifica a fluidodinâmica do escoamento no interior do hidrociclone, alterando a relação entre as componentes de velocidade e a interação entre os vórtices livre (externo) e forçado (interno). Estudos prévios (SOUSA, 1999; VIEIRA, 2001; VIEIRA, 2006; FAÇANHA, 2012 e SALVADOR, 2013) já indicaram que a adição de um meio filtrante em hidrociclones convencionais pode trazer benefícios, tais como a redução do consumo energético de bombeamento (redução do número de Euler) ou aumento da eficiência total.

Diante das vantagens relacionadas ao uso de hidrociclones filtrantes, Salvador (2017) estudou o efeito de certas dimensões geométricas (diâmetro de alimentação, diâmetro de *overflow*, altura do cilindro e ângulo do tronco de cone). Através desse estudo foram realizadas otimizações geométricas para estes separadores a partir de um Algoritmo de Evolução Diferencial (DE) para hidrociclones convencionais e para cada modalidade de hidrociclones filtrantes: hidrociclone cônico-filtrante (HCoF), cilíndrico-filtrante (HCiF) e cilíndrico-cônico-filtrante (HCiCoF). A autora propôs três casos de otimização geométrica com base em indicadores de desempenho dos hidrociclones, com os objetivos de maximizar a eficiência de total (caso 1), minimizar a razão de líquido (caso 2) e minimizar o número de Euler (caso3). Assim, foram obtidos três hidrociclones otimizados para cada uma das modalidades de hidrociclones filtrantes, porém, mantendo constantes a concentração de sólidos alimentados, a queda de pressão e o diâmetro de orifício de *underflow*.

Dentre as geometrias obtidas por Salvador (2017) foram selecionadas as geometrias otimizadas para o caso 1: HCoF-OT1, HCoF-OT1, HCoF-OT1, e otimizadas para o caso 3: HCoF-OT3, HCoF-OT3 e HCoF-OT3, para compor este estudo. Os equipamentos otimizados para o caso 1 promoveram grande recuperação de sólidos, assim, são hidrociclones aplicáveis a processos de separação de partículas finas ou clarificação. Já os hidrociclones otimizados para o caso 3 proporcionaram uma alta capacidade de processamento, e com isso, o menor consumo energético dentre os equipamentos estudados. Além disso, foi observado experimentalmente que os equipamentos do caso 3 também promoveram baixa razão de líquido e elevada concentração de sólidos na corrente de *underflow*. Isto posto, optou-se por não abordar o caso

2 no presente estudo, pois foi observado que os equipamentos do caso 3 supriram a demanda objetivada para o segundo caso de otimização, e apresentam-se como uma opção mais vantajosa para operações de espessamento devido ao menor consumo energético proporcionado.

Além da configuração geométrica, condições operacionais, como a concentração de sólidos da alimentação e queda de pressão de operação, também podem afetar o desempenho de um hidrociclone. Em sistemas com baixa concentração de sólidos, a fase dispersa não apresenta influências significativas sobre o comportamento da fase contínua (fluida), devido a isso, os hidrociclones trabalham com elevada eficiência de separação no processamento de suspensões diluídas (SVAROVSKY, 2000). No entanto, à medida que se aumenta a concentração de sólidos da suspensão, os efeitos das interações partícula-fluido e partícula-partícula tornam-se mais relevantes e as partículas sólidas tendem a se acumular na seção cônica do hidrociclone, alterando a fluidodinâmica do sistema. Desse modo a presença de alta concentração de sólidos na suspensão afeta o escoamento do fluido e produz uma distribuição de velocidades no hidrociclone que tende a reduzir o movimento diferencial das partículas, comportamento este desfavorável à separação (DAVAILLES *et al.*, 2012; KUANG *et al.*, 2012).

Nesse contexto, a maioria dos estudos publicados sobre hidrociclones, até o momento, relatam o seu uso no processamento de suspensões diluídas. No entanto, em grande parte das aplicações industriais a concentração de sólidos na alimentação pode ser relativamente alta, aumentando o nível de complexidade da separação realizada nesses dispositivos. Nesse caso, a eficiência de separação pode ser drasticamente reduzida com o aumento da concentração de sólidos (GONÇALVES, 2016; MARTHINUSSEN *et al.*, 2014). Com isso, a avaliação dos efeitos da maior concentração de sólidos na operação do hidrociclones é extremamente importante para ampliar a previsão de desempenho desses equipamentos.

Considerando que a concentração de sólidos na alimentação pode alterar o desempenho de hidrociclones, é relevante compreender melhor o comportamento dos hidrociclones otimizados por Salvador (2017) em operações com diferentes concentrações de sólidos na alimentação. Esses equipamentos apresentaram ótimo desempenho de separação e espessamento, porém foram testados apenas no processamento de suspensões diluídas, até o presente momento.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar e avaliar o desempenho dos hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes (HCiCoF-OT1 e HCiCoF-OT3) e cônico-filtrantes (HCoF-OT1 e HCoF-OT3) otimizados por Salvador (2017). Além disso, buscou-se potencializar a utilização desses equipamentos em condições operacionais de concentração de sólidos diferentes daquelas utilizadas pela autora através do estudo de alterações na queda de pressão, diâmetro de *underflow* e utilização destes hidrociclones nas modalidades filtrantes e convencionais. Para este propósito, foram definidos os objetivos específicos descritos na sequência.

- Avaliar a influência da concentração de sólidos na corrente de alimentação (C_{VA}) no desempenho dos hidrociclones de geometrias HCiCoF-OT1, HCoF-OT1, HCiCoF-OT3 e HCoF-OT3.
- Avaliar a influência da queda de pressão ($-\Delta P$) no desempenho dos hidrociclones de geometrias HCiCoF-OT1, HCoF-OT1, HCiCoF-OT3 e HCoF-OT3.
- Avaliar a influência do diâmetro de *underflow* (D_U) no desempenho dos hidrociclones de geometrias HCiCoF-OT1, HCoF-OT1, HCiCoF-OT3 e HCoF-OT3.
- Avaliar a influência da filtração no desempenho dos hidrociclones de geometrias HCiCoF-OT1, HCoF-OT1, HCiCoF-OT3 e HCoF-OT3 através da comparação entre desempenho dos hidrociclones filtrantes otimizados e suas respectivas modalidades convencionais (paredes totalmente maciças), diante de alterações nas variáveis mencionadas.
- Comparar o desempenho dos hidrociclones de geometrias HCiCoF-OT1, HCiCoF-OT3, HCoF-OT1, HCoF-OT3 e das geometrias HCiF-OT1 e HCiF-OT3, caracterizadas por Ascendino (2020), nas modalidades filtrantes e convencionais operando em diferentes condições de concentrações de sólidos na alimentação.
- Levantar as curvas de eficiência dos hidrociclones cilíndrico-cônico filtrantes e cônico filtrantes otimizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentadas as características gerais referentes aos hidrociclones. Além disso, são abordados os principais indicadores de desempenho em um processo de hidrociclonagem. Em seguida, é apresentado um breve histórico acerca dos hidrociclones filtrantes desenvolvidos na FEQUI/UFU e um levantamento referente a estudos relevantes sobre esses equipamentos.

2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS HIDROCICLONES

Os hidrociclones são separadores que operam a partir da formação de um campo centrífugo. Em geral, são equipamentos compostos de uma geometria cônico-cilíndrica, com uma entrada tangencial na seção cilíndrica e uma saída em cada sentido do seu eixo principal. A saída na seção cilíndrica é chamada de duto de *overflow* e se estende para dentro do hidrociclone (*vortex-finder*). A segunda saída, o orifício de *underflow*, está localizada na extremidade cônica. Na Figura 2.1-1 mostram-se esquematicamente as dimensões de projeto de um hidrociclone convencional, a entrada de alimentação tangencial e as saídas axiais.

Os hidrociclones são geralmente operados verticalmente com o *underflow* na extremidade inferior. O princípio básico de separação nestes equipamentos é a sedimentação centrífuga e sua operação é simples: a suspensão é introduzida tangencialmente no hidrociclone, a uma velocidade relativamente alta. Devido à geometria cônico-cilíndrica do equipamento e à energia de pressão aplicada à corrente de alimentação, a suspensão inicia um movimento em espiral descendente e produz um campo centrífugo. As partículas maiores e mais densas se movem através do fluido em direção à parede do hidrociclone em um movimento em espiral, e são direcionadas ao orifício de *underflow* juntamente com uma fração do líquido.

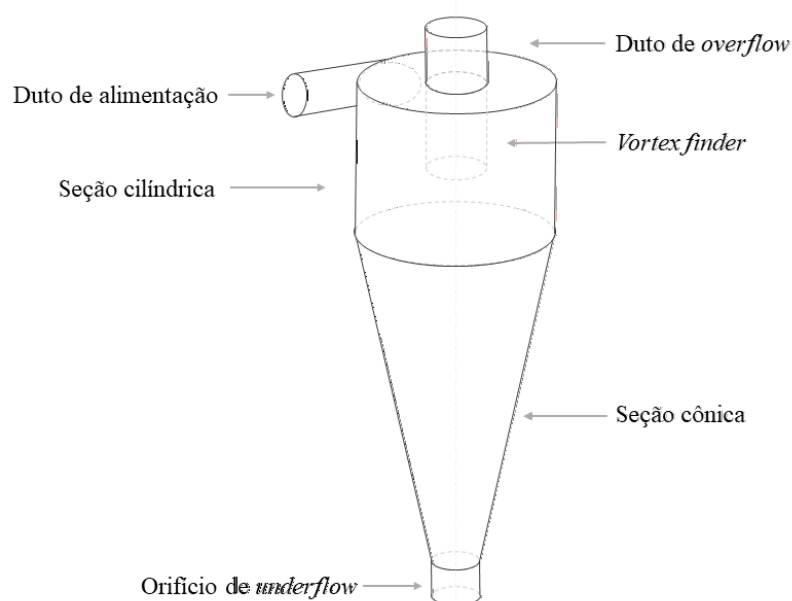


Figura 2.1-1 – Representação esquemática de um hidrociclone convencional.

Fonte: A autora.

Devido à limitação de área causada pelo diâmetro do orifício de *underflow*, um outro vórtice central é formado com rotação na mesma direção que o vórtice externo, mas fluindo no sentido oposto (para cima) e deixa o hidrociclone pelo duto de *overflow*, através do *vortex finder*, arrastando consigo a maior parte do líquido e das partículas finas e menos densas. Uma representação da trajetória da suspensão no interior do hidrociclone pode ser visualizada na Figura 2.1-2.

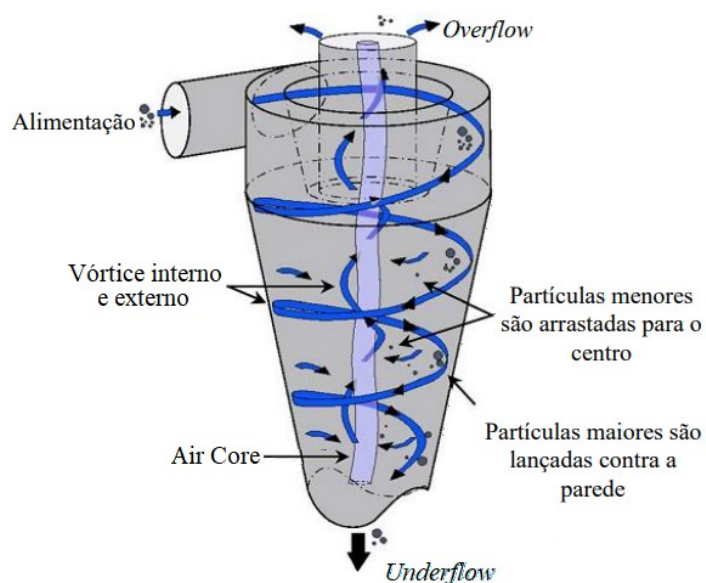


Figura 2.1-2 – Representação do escoamento no interior de hidrociclones.

Adaptado de Cullivan *et al.* (2004).

Apesar do funcionamento simples, o escoamento no interior do hidrociclone é complexo, turbulento e tridimensional. Devido ao campo centrífugo formado, inicia-se um fluxo descendente em espiral ao longo das paredes internas do equipamento e um fluxo ascende em espiral no centro do equipamento. Durante esse processo, a separação ocorre na direção radial devido à ação da aceleração centrífuga, induzida pelas forças de arraste e centrífuga, sendo exemplificadas as forças atuantes sobre a trajetória da suspensão no interior de um hidrociclone na Figura 2.1-3.

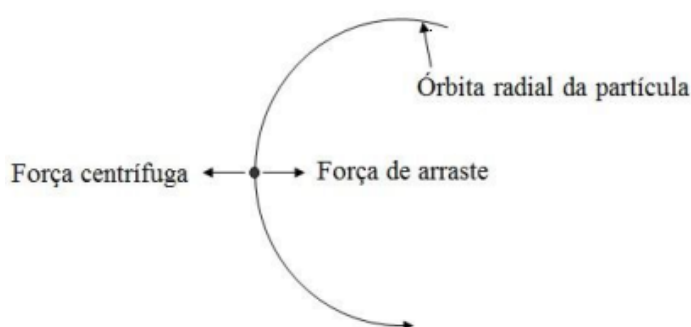


Figura 2.1-3 – Forças que atuam em uma partícula no interior de um hidrociclone.

Adaptado de Wills *et al.* (2006).

Apesar de estar presente, a força gravitacional não atua significativamente no processo de separação em hidrociclones. Segundo Svarovsky (2000), o campo centrífugo é muito superior ao campo gravitacional dentro do equipamento. O fato de a força gravitacional não influenciar significativamente a separação possibilita a operação dos hidrociclones na posição vertical, horizontal ou inclinados em qualquer ângulo.

De acordo com o balanço das forças atuantes, cada partícula percorrerá uma trajetória no interior do equipamento. Para as partículas em que a força centrífuga for maior do que a força de arraste, haverá a movimentação em direção à parede do equipamento, formando a fase mais densa. Em contrapartida, no caso em que a força de arraste for superior à força centrífuga, acontecerá a movimentação dessas partículas em direção à região central do equipamento.

O movimento do fluido pode ser explicado a partir da decomposição das componentes de velocidade: tangencial (v_θ), axial (v_a) e radial (v_r). A força centrífuga está associada ao vetor velocidade tangencial, enquanto a força de arraste está relacionada ao vetor velocidade radial (SVAROVSKY, 2000). A componente axial da velocidade, é responsável pela descarga das partículas, mas não exerce influência direta no balanço de forças durante esse processo (MELO,

2010). As componentes da velocidade de uma partícula no hidrociclone podem ser identificadas na Figura 2.1-4.

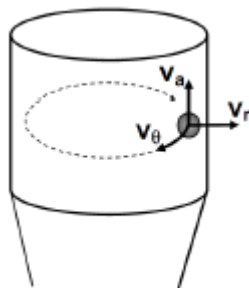


Figura 2.1-4 – Decomposição do vetor velocidade para uma partícula no interior de um hidrociclone.

Fonte: Bergström (2006).

Devido a sua natureza, a velocidade tangencial está diretamente relacionada à geração das forças centrífugas, as quais são responsáveis pela coleta de determinada partícula. Além disso, essa componente também está relacionada às forças de cisalhamento, que não permitem que o material particulado fique aderido às paredes do equipamento (BERGSTRÖM, 2006).

A componente tangencial divide o escoamento num hidrociclone em duas regiões: uma externa, que se comporta de forma semelhante a um vórtice livre; e a região interna, que se comporta como uma rotação de corpo sólido, também denominada vórtice forçado (BERGSTRÖM, VOMHOFF, 2007). Essa componente é altamente relevante no processo de hidrociclonagem, sendo a principal responsável pela saída do fluido através do duto de *overflow* (WANG e YU, 2008; DELGADILLO e RAJAMANI, 2009). Quanto maior a velocidade tangencial, maior será a força centrífuga imposta às partículas e menor será o diâmetro de uma partícula separável (QUTEISHAT, 2020). Tal velocidade não se altera significativamente na seção cilíndrica do hidrociclone, mas à medida que a suspensão se move em direção à seção cônica, em uma posição radial específica, sua magnitude é reduzida, pois neste sentido ocorre o decaimento sucessivo da intensidade do fluxo turbulento (BANERJEE *et al.*, 2016).

Embora a componente de velocidade dominante em um hidrociclone seja a tangencial, a presença das componentes nas direções radial e axial tornam mais complexo o movimento. A velocidade radial está associada à força de arraste (SVAROVSKY, 2000). Por sua vez, a componente axial da velocidade também é significativa, mas desempenha um papel indireto na separação, pois varia com a distância do eixo de uma maneira complexa (DARBY, 2001; QUTEISHAT, 2020). O campo de escoamento formado por essas três componentes de

velocidade resulta em um movimento turbulento e colisões significativas entre as partículas que impactam diretamente o desempenho de separação desses equipamentos.

2.2. PRINCIPAIS INDICADORES DE DESEMPENHO DE SEPARAÇÃO EM HIDROCICLONES

A fim de avaliar e quantificar o processo de hidrociclonagem, alguns conceitos básicos são fundamentais. Deste modo, nesta sessão serão abordados os principais parâmetros associados à avaliação de desempenho em um processo de hidrociclonagem.

2.2.1 – Vazões Volumétricas (Q , Q_U)

A vazão de alimentação (Q) é uma variável importante no processo de separação, pois quantifica a capacidade de processamento do equipamento. Por sua vez, a vazão da corrente de *underflow* (Q_U), está relacionada à eficiência de separação de um hidrociclone.

A vazão volumétrica de uma corrente é dada pela razão entre a sua vazão mássica e sua respectiva densidade. As vazões volumétricas das correntes de alimentação e *underflow* estão descritas pelas Equações 2.1 e 2.2 respectivamente.

$$Q = \frac{W}{\rho_A} \quad (2.1)$$

$$Q_U = \frac{W_U}{\rho_U} \quad (2.2)$$

Em que W é a vazão mássica da corrente de alimentação, W_U é a vazão mássica da corrente de *underflow*, ρ_A e ρ_U são respectivamente as densidades das correntes de alimentação e de *underflow*. As densidades podem ser calculadas pelas Equações 2.3 e 2.4, em que C_{WA} é a concentração mássica da corrente de alimentação, C_{WU} é a concentração mássica da corrente de *underflow*, ρ é a densidade do fluido e ρ_s é a densidade do material particulado.

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

$$\rho_U = \frac{\rho}{1 - C_{wU} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (2.4)$$

2.2.2 – Número de Euler (Eu)

Segundo Svarovsky (2000), o número de Euler (Eu) é um adimensional definido pela relação entre a queda de pressão ($-\Delta P$) no separador (diferença de pressão entre a alimentação e saída de *overflow*) e a energia cinética por unidade de volume alimentado, conforme a Equação 2.5, em que u_c é a velocidade do fluido na seção cilíndrica do hidrociclone, dada pela Equação 2.6.

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (2.5)$$

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (2.6)$$

Devido a sua natureza, o número de Euler é um parâmetro importante na avaliação da eficiência energética em hidrociclones pois relaciona a energia de pressão com a energia cinética. Dessa forma, quanto menor o valor do número de Euler, menor o consumo energético requerido pelo equipamento para processar uma mesma vazão de alimentação.

2.2.3 – Concentração Volumétrica de Sólidos no *Underflow* (C_{vU})

A concentração de sólidos na corrente de *underflow* está relacionada ao desempenho de um hidrociclone e é um dos indicadores da capacidade de espessamento desse equipamento. Essa resposta pode ser obtida a partir das densidades do líquido (ρ) e do material particulado (ρ_s) e da concentração mássica de sólidos na corrente de *underflow* (C_{wU}), conforme explicitado na equação 2.7.

$$C_{vU} = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_{wU}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (2.7)$$

2.2.4 – Razão de Líquido (R_L)

Em função da composição geométrica dos hidrociclones, constata-se uma divisão natural da corrente alimentada em duas saídas (*overflow* e *underflow*), independentemente da velocidade de alimentação e atuação de forças centrífugas no escoamento. Dessa forma, mesmo sem levar em consideração a atuação do campo centrífugo durante a operação deste separador, esse efeito, popularmente conhecido como “*Efeito T*”, promove o direcionamento de uma parcela do líquido, juntamente com partículas sólidas, para o *underflow*.

A razão de líquido é a resposta que quantifica esse efeito de divisão de correntes. Assim, indica qual é a fração de líquido direcionada para a corrente de *underflow* dentre a vazão total de líquido alimentada inicialmente no hidrociclone. Essa relação pode ser calculada conforme a equação 2.8.

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{vU})}{Q(1 - C_{vA})} \quad (2.8)$$

Essa resposta está intimamente relacionada ao poder de espessamento dos hidrociclones. Uma baixa razão de líquido indica que grande quantidade de fluido é direcionada para a corrente de *overflow*, o que contribui para uma maior concentração de sólidos no *underflow*. A razão de líquido também é um indicador importante para processos de classificação que envolvem, em geral, um processamento adicional antes da recuperação de minerais valiosos (LUSINGA *et al.*, 2009). Assim, quando o objetivo é a clarificação da corrente de *overflow*, o hidrociclone opera com altas razões de líquidos e com altas eficiências totais de separação. Já quando o objetivo é concentrar a corrente de *underflow*, uma baixa razão de líquido é desejada, o que, por sua vez, pode acarretar uma redução da eficiência total de separação.

2.2.5 – Eficiência Total (E_T) e Eficiência Total Reduzida (E_T')

O desempenho de separação em hidrociclones pode ser avaliado pela eficiência total (E_T), que indica a razão entre a massa de sólidos coletada na corrente de *underflow* e a massa de sólidos alimentada inicialmente no separador, conforme indicado na Equação 2.9.

$$E_T = \frac{C_{WU}W_U}{C_{WA}W} \quad (2.9)$$

Dessa forma, a eficiência total de um hidrociclone considera todos os sólidos coletados no *underflow*, independentemente se foram selecionadas pela ação do campo centrífugo ou pelo arraste do líquido, ocasionado pela divisão de correntes, conforme mencionado na sessão anterior (*Efeito T*). A fim de se quantificar a fração de sólidos coletada na corrente de *underflow* exclusivamente pela ação do campo centrífugo, avalia-se a eficiência total reduzida, cujo cálculo é realizado conforme a Equação 2.10.

$$E_T' = \frac{E_T - R_L}{1 - R_L} \quad (2.10)$$

De acordo com a Equação 2.10, o cálculo da eficiência total reduzida é realizado através da dedução do efeito de divisão de correntes (quantificado pela razão de líquido) na eficiência total do hidrociclone.

2.2.6 – Eficiência Granulométrica (G) e Diâmetro de Corte (d_{50})

Em uma operação de hidrociclonagem não acontece a completa separação de partículas, visto que podem ser localizadas partículas grossas na corrente de *overflow*, do mesmo modo que partículas finas também podem ser detectadas na corrente de *underflow* (SVAROVSKY, 2000). Com isso, é necessário a utilização de parâmetros para quantificar a classificação realizada pelo equipamento (SAMPAIO, 2007).

Nesse sentido, a eficiência granulométrica é definida como a razão entre as taxas mássicas de um determinado tamanho individual de partículas no *underflow* e na alimentação. Quando conhecida a distribuição granulométrica das partículas, a eficiência granulométrica

pode ser obtida através da Equação 2.11, na qual d_p é o diâmetro da partícula, X_U é a fração mássica de partículas com diâmetro igual ou menor a d_p na corrente de *underflow*, X é a fração mássica de partículas com diâmetro igual ou menor a d_p na corrente de alimentação.

$$G = E_T \frac{\frac{dX_U}{d(d_p)}}{\frac{dX}{d(d_p)}} \quad (2.11)$$

No entanto, a eficiência granulométrica (G) abrange todas as partículas coletadas no *underflow*, independentemente se foram selecionadas pela ação do campo centrífugo ou pela divisão de correntes. Conforme definido para a eficiência total reduzida (E_T), a eficiência granulométrica reduzida (G') também leva em consideração apenas as partículas selecionadas devido à ação do campo centrífugo dentro do separador. Conforme a Equação 2.12, os efeitos da divisão de correntes são compensados através do desconto da razão de líquido na eficiência granulométrica.

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (2.12)$$

Considerando a eficiência granulométrica, existe um diâmetro da partícula que será separada com 50 % de eficiência. Esse tamanho de partícula é denominado diâmetro de corte (d_{50}). Esse parâmetro estabelece que partículas com diâmetro d_{50} têm a mesma probabilidade (50 %) de serem direcionadas em ambas as saídas do hidrociclone (*overflow* ou *underflow*). Sendo assim, partículas cujo diâmetro seja maior que d_{50} terão mais chances de serem coletadas no *underflow*, ou seja, tendem a apresentar eficiências granulométricas maiores que 50 %, enquanto partículas com diâmetro menor que d_{50} estão mais propensas a serem direcionadas ao *overflow* e, por isso, provavelmente apresentarão eficiências granulométricas inferiores a 50 %. Dessa forma, o diâmetro de corte também representa um parâmetro relevante ao processo de hidrociclonagem, pois quanto menor for d_{50} de um equipamento, maior a sua eficiência de coleta.

De forma análoga ao estabelecido para o diâmetro de corte, o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) pode ser definido como o diâmetro de partícula coletado com eficiência granulométrica

reduzida de 50 %. O diâmetro de corte reduzido indica o poder de classificação dos hidrociclones ao considerar apenas a ação do campo centrífugo na separação. Dessa forma são descontadas as partículas que são arrastadas pelo líquido devido à divisão de fluxo, conforme sugerido por Lynch (1977).

2.3. DIMENSÕES GEOMÉTRICAS E FAMÍLIAS DE HIDROCICLONES

As principais dimensões geométricas características de um hidrociclone convencional estão indicadas na Figura 2.3-1, e são elas: diâmetro do *overflow* (D_o), diâmetro da alimentação (D_i), comprimento do *vortex finder* (ℓ), diâmetro da seção cilíndrica (D_c), ângulo do tronco de cone (θ), diâmetro do *underflow* (D_u), comprimento total (L), comprimento da seção cilíndrica (h) e comprimento do tronco de cone (H).

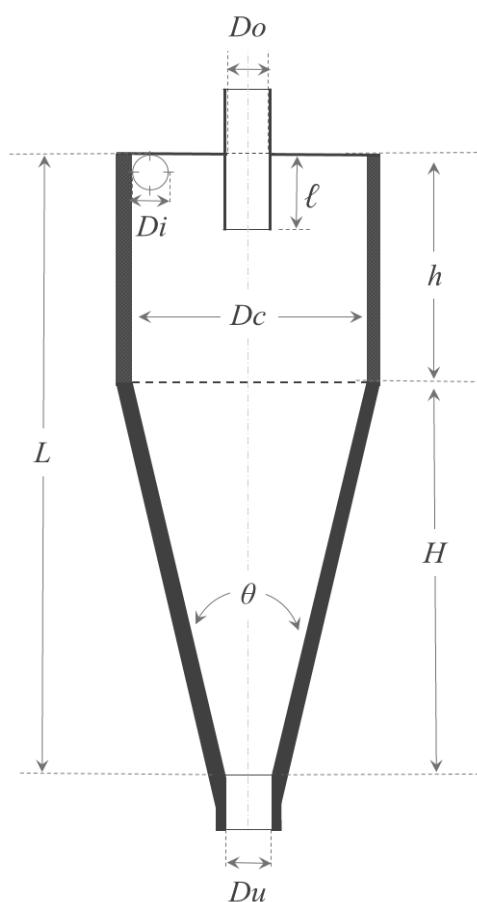


Figura 2.3-1 – Dimensões características de um hidrociclone.
Adaptado de Vieira (2006).

Diversos estudos relacionam a geometria do hidrociclone à função que ele desempenha. Ao reduzir o diâmetro de alimentação, por exemplo, consegue-se recuperar mais partículas devido à maior velocidade de alimentação (KENSAL, 1958; SVAROVSKY 2000; TANG *et al.*, 2015). Um aumento no diâmetro de *overflow* pode promover o aumento da eficiência de separação para partículas mais finas, mas a separação de partículas mais grossas tende a ser reduzida devido a um fenômeno denominado curto-circuito (KENSAL, 1958; BRADLEY, 2013).

O correto dimensionamento do orifício de *underflow* também é vital para a melhor operação do hidrociclone, sendo que um aumento em D_U pode resultar em uma maior eficiência de separação e redução de d_{50} (KENSAL, 1958; GHODRAT *et al.*, 2013; NI *et al.*, 2016). No entanto, segundo Svarovsky (2000), o tamanho ideal da abertura não pode ser previsto com segurança e, conseqüentemente, essa dimensão é frequentemente considerada uma variável operacional e não uma variável de projeto.

Além disso, a capacidade de processamento de um hidrociclone também pode ser relacionada ao comprimento de sua seção cilíndrica, e a eficiência total de separação sofre alterações de acordo com o comprimento e ângulo adotados para a seção cônica do hidrociclone (SILVA, 2014; RICHARDSON E HARKER, 2002). Deste modo, modificações nas variáveis geométricas podem alterar a fluidodinâmica do equipamento, impactando no desempenho de classificação de partículas.

Devido ao exposto, adota-se a classificação dos hidrociclones em famílias, de acordo com a relação entre suas dimensões geométricas. Uma família de hidrociclones é um conjunto de equipamentos que possui relações geométricas semelhantes e, desse modo, os hidrociclones operam de maneira similar (BRADLEY, 1965). Cada família reúne um conjunto de separadores que mantêm uma proporção fixa de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da seção cilíndrica (VIEIRA, 2006). Como exemplos, citam-se as famílias clássicas de hidrociclones apresentadas na Tabela 2.3-1 e suas principais relações geométricas.

Tabela 2.3-1 – Relações geométricas de famílias de hidrociclones.

<i>Família</i>	<i>Di/Dc</i>	<i>Do/Dc</i>	<i>ℓ/Dc</i>	<i>L/Dc</i>	<i>θ</i>
AKW	0,200	0,320	0,800	6,240	15°
Bradley	0,133	0,200	0,330	6,850	9,0°
Demco I	0,217	0,500	1,000	4,70	25°
Demco II	0,244	0,313	0,833	3,900	20,0°
HI-Klone	0,175	0,250	0,920	5,60	10°
Krebs	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
Mosley I	0,154	0,214	0,570	7,43	6°
Mosley II	0,160	0,250	0,570	7,71	6°
Rietema	0,280	0,340	0,400	5,000	20,0°
RW 2515	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
Warman	0,290	0,200	0,310	4,00	15°

Fonte: Silva (2012).

Em relação às famílias de hidrociclones apresentadas na Tabela 2.3-1, os equipamentos da família Rietema se destacam por sua qualidade concentradora e por apresentarem baixo consumo energético. A principal característica desta família é apresentar o comprimento da parte cilíndrica maior que o comprimento do tronco de cone. Já a família Bradley possui troncos de cone compridos, com um ângulo menor. Devido a isso, são bons classificadores, mas requerem um dispendioso consumo energético em sua operação.

De acordo com o exposto, compreender os efeitos das variáveis geométricas no desempenho de hidrociclones têm sido objeto de diversos estudos. Além disso, esse entendimento proporciona melhorias no desempenho do equipamento de acordo com a aplicação pretendida (VIEIRA, 2006).

2.4. ESTUDOS EM HIDROCICLONES FILTRANTES NA FEQUI/UFU

Além de alterações nas proporções geométricas convencionais de hidrociclones, diversos estudos referentes a possíveis modificações na estrutura física do equipamento vêm sendo desenvolvidos. Nesses estudos observa-se que tais remodelações refletem em mudanças no comportamento da suspensão e podem melhorar o desempenho de separação desses

equipamentos (VIEIRA, 2006). Tais alterações deram origem a uma categoria denominada hidrociclones não convencionais.

Neste contexto de não convencionais destacam-se os hidrociclones filtrantes, foco deste trabalho. Nestes equipamentos, as principais paredes maciças (cilíndrica, cônica ou ambas) são substituídas por paredes permeáveis, que permitem uma vazão de fluido (Q_F) escoar por essas fronteiras, dando origem a mais uma corrente de saída do separador: a corrente de filtrado. Na Figura 2.4-1 apresenta-se uma representação esquemática com o hidrociclone convencional (HCon) e suas variantes filtrantes denominadas hidrociclones cônico-filtrante (HCoF), cilíndrico-filtrante (HCiF) e cilíndrico-cônico-filtrante (HCiCoF).

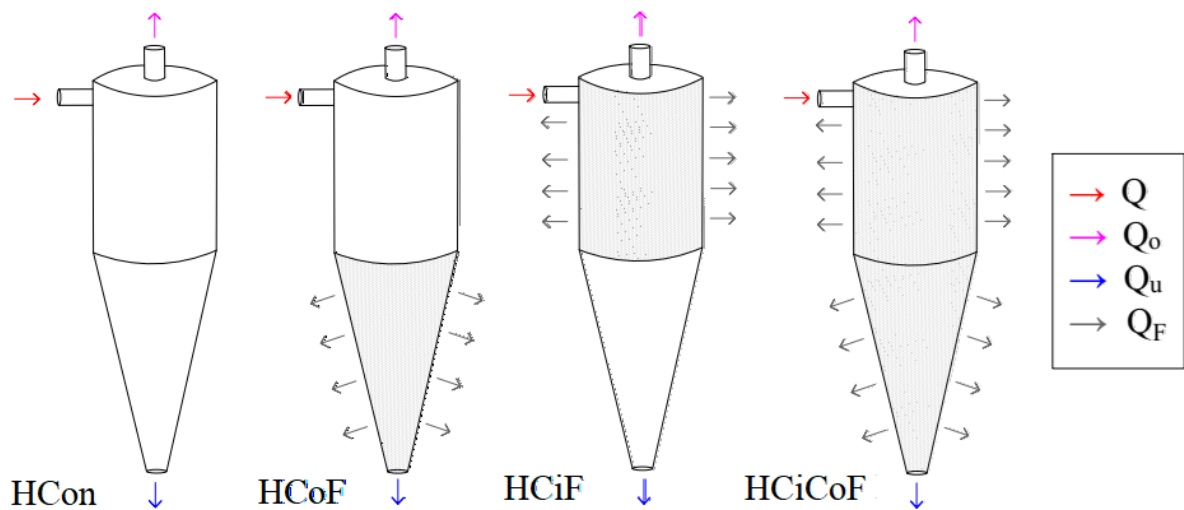


Figura 2.4-1 – Representação esquemática de um hidrociclone convencional (HCon), um hidrociclone cônico-filtrante (HCoF), um hidrociclone cilíndrico-filtrante (HCiF) e um hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante (HCiCoF).

Fonte: Salvador *et al.* (2021).

Estes separadores filtrantes são caracterizados por apresentarem uma pequena corrente de filtrado (não mais que 1 % da vazão de alimentação) e nenhuma formação de torta sobre a parede permeável devido às elevadas tensões cisalhantes no interior do equipamento (SILVA, 2014). Porém, a filtração é capaz de modificar significativamente a fluidodinâmica do escoamento no interior do hidrociclone, alterando a relação entre as componentes de velocidade e a interação entre os vórtices livre (externo) e forçado (interno) (VIEIRA, 2006). Estudos prévios (SOUSA, 1999; VIEIRA, 2001; VIEIRA, 2006; FAÇANHA, 2012 e SALVADOR, 2013) já indicaram que a adição de um meio filtrante em hidrociclones convencionais pode trazer benefícios, tais como a diminuição dos custos energéticos de bombeamento (diminuição

do número de Euler) ou aumento no poder de classificação de partículas (aumento da eficiência total).

Os estudos com hidrociclones filtrantes na Universidade Federal de Uberlândia iniciaram-se com o trabalho de Lanna *et al.* (1992), no qual os autores tiveram como objetivo comparar o hidrociclone de seção cônica filtrante com o equipamento convencional e estudar o desempenho de separação destes separadores. Para tanto, os autores utilizaram um hidrociclone de geometria Bradley, com diâmetro da sessão cilíndrica de 30 mm e região cônica filtrante produzida em tecido de nylon. Os materiais particulados utilizados foram o carbonato de cálcio e sulfato de bário.

Após a análise dos resultados, Lanna *et al.* (1992) observaram que o hidrociclone filtrante estudado apresentou como vantagem um menor consumo energético (redução do número de Euler), quando comparado ao equipamento na modalidade convencional (paredes completamente maciças). Além disso, o equipamento filtrante apresentou maior capacidade de processamento (maior vazão de alimentação) e um maior potencial de espessamento (aumento da concentração de sólidos no *underflow*).

No entanto, Lanna *et al.* (1992) observaram uma redução na capacidade de separação do equipamento filtrante em comparação ao convencional, evidenciado por uma redução no valor de eficiência total e aumento do diâmetro de corte reduzido. Outra contribuição interessante desse trabalho foi a constatação de que a corrente de filtrado continha apenas água pura e que não havia a formação de torta próximo à parede filtrante em razão das forças de cisalhamento atuantes no interior do hidrociclone.

Com o intuito de avaliar a utilização de diferentes materiais como meios filtrantes Vieira (1997) estudou o mesmo hidrociclone de geometria Bradley, porém, com cone filtrante manufaturado em polipropileno. O equipamento foi estudado na separação de sulfato de bário, nas mesmas condições operacionais adotadas por Lanna *et al.* (1992). Esse equipamento promoveu resultados qualitativamente semelhantes àqueles obtidos para o hidrociclone com meio filtrante em nylon, diferindo-se apenas na ordem de grandeza.

Dando continuidade aos estudos de meios filtrantes, Souza (1999) utilizou em seu estudo hidrociclones cuja seção cônica filtrante foi manufaturada com partículas de bronze sinterizado. O autor empregou um hidrociclone na mesma geometria e condições experimentais empregadas nos trabalhos anteriores (LANNA *et al.*, 1992 e VIEIRA, 1997) para a separação de partículas de pirocloro.

No estudo em questão (SOUZA, 1999), consideraram-se duas diferentes resistências para o meio filtrante e, com isso, o autor foi capaz de incluir a resistência do meio filtrante às equações de projeto propostas para os hidrociclones filtrantes. Além disso, o autor constatou que a resistividade da torta não era um fator relevante nas equações de projeto e, conforme verificado nos trabalhos anteriores, não havia acúmulo de torta próximo à parede filtrante.

Através de testes experimentais, Souza (1999) também constatou aumento na vazão de alimentação (capacidade de processamento) e pôde-se relacionar que o aumento da capacidade de processamento era inversamente proporcional à resistência do meio filtrante. Também foi observada a redução no número de Euler para os hidrociclones filtrantes, e com isso o autor pôde constatar que o número de Euler para esse separador era uma função da resistência do meio filtrante e dimensões geométricas do equipamento.

Souza (1999) também concluiu que a incorporação da seção cônica filtrante levou à redução da eficiência total de coleta e ao aumento do diâmetro de corte reduzido em comparação ao equipamento convencional de mesma geometria. O autor indicou que a existência da corrente de filtrado poderia ter influenciado na fluidodinâmica no interior do hidrociclone, modificando os perfis dos vórtices gerados pela turbulência. Sendo assim, haveria a migração de parte da suspensão contida no vórtice externo para o interno. Esse efeito de “mistura” promoveria o aumento da quantidade de suspensão direcionada à corrente de *overflow*, com consequente redução das razões de líquido e eficiências totais (pelo arraste de partículas). Dessa forma, esse comportamento seria acentuado ao trabalhar com meios porosos mais permeáveis.

Com o intuito de avaliar diferentes geometrias de hidrociclones na modalidade filtrante, Vieira (2001) estudou hidrociclones de geometria Rietema, cujos cones filtrantes também foram manufaturados a partir de partículas de bronze sinterizado em três diferentes permeabilidades. O autor pôde comparar os resultados obtidos para os hidrociclones filtrantes de geometria Rietema com os de geometria Bradley estudados por Souza (1999) e Lanna *et al.* (1992).

Em contraste ao que fora obtido por Souza (1999) no estudo de hidrociclones filtrantes de geometria Bradley, os hidrociclones filtrantes de geometria Rietema apresentaram um acréscimo nos números de Euler em relação ao equipamento convencional nas mesmas condições de operação. A maior razão de líquido observada na operação com os hidrociclones filtrantes em relação ao convencional acarretou uma menor concentração de sólidos no *underflow*. Além disso, para a mesma capacidade de operação (mesma vazão de alimentação)

foram encontrados menores valores de diâmetro de corte reduzido e maiores patamares de eficiência total de coleta para os separadores de Rietema na modalidade filtrante.

Vieira (2001) atribuiu esses resultados ao formato da região cônica desses equipamentos (Bradley e Rietema). Segundo o autor, para hidrociclones de geometria Bradley, o vórtice interno teria uma influência mais pronunciada sobre a região do vórtice externo, por manter um menor ângulo de tronco de cone. Dessa forma, uma menor parcela de líquido contendo partículas seria direcionada para a corrente de *underflow*. Por outro lado, para os equipamentos de geometria Rietema, os vórtices interno e externo estariam mais distantes um do outro, devido ao maior ângulo de tronco de cone. A partir disso, o líquido e partículas contidos no vórtice externo do equipamento filtrante apresentariam uma menor tendência a migrar para o vórtice interno e, com isso, não seriam direcionados à corrente de *overflow*.

Em seguida, Arruda *et al.* (2002) estudaram hidrociclones filtrantes de geometria Krebs. Os autores relataram que nas mesmas condições operacionais a presença de uma seção cônica porosa praticamente não influenciou o desempenho da operação de hidrociclonagem para esta configuração geométrica. A família Krebs tem como uma de suas características geométricas um ângulo de tronco de cone de $12,7^\circ$, valor intermediário se comparado às famílias Bradley e Rietema, previamente estudadas respectivamente por Sousa (1999) e Vieira (2001).

Dando continuidade ao estudo de hidrociclones filtrantes em diferentes geometrias, Arruda (2003) realizou um estudo com equipamentos de geometria Demco II. Em sua análise não foram identificadas modificações no desempenho de operação em relação ao convencional, resultado similar ao relatado por Arruda *et al.* (2002) para equipamentos da família Krebs. A família Demco II apresenta como uma de suas características um tronco de cone geometricamente semelhante ao da família Rietema.

Através da comparação entre as diferentes famílias de hidrociclones estudadas na modalidade convencional e filtrante, Arruda (2003) concluiu que o efeito do meio filtrante estava relacionado à razão entre a área lateral da seção cônica filtrante e a área lateral da seção cilíndrica dos hidrociclones. O autor observou que equipamentos que possuíam essas dimensões semelhantes seriam pouco influenciados pela filtração, como observado para as geometrias Krebs e Demco II.

Já para as geometrias em que a área lateral da seção cônica filtrante fosse menor que área lateral da seção cilíndrica, o meio filtrante atuaria aumentando os efeitos de turbulência, e com isso a perda de carga do sistema. Isso resultaria em um aumento da eficiência total de separação, assim como observado para os hidrociclones filtrantes da família Rietema. Por outro

lado, quando a relação entre as áreas laterais fosse maior que um, a filtração causaria a redução da perda de carga no interior do equipamento. Isso acarretaria a diminuição da eficiência total de separação, conforme observado para a família Bradley.

Partindo dessas observações, o estudo de Vieira (2006) teve como objetivo realizar uma otimização geométrica para hidrociclones convencionais (de paredes maciças) e hidrociclones cônico-filtrantes. Com isso, o autor almejava encontrar uma configuração geométrica que aliasse baixo consumo energético (redução do número de Euler) com alta eficiência total de separação. Assim, o autor avaliou a influência das variáveis geométricas diâmetro de alimentação (D_i), diâmetro de *overflow* (D_o), comprimento total (L) e ângulo de tronco de cone (θ) no desempenho dos hidrociclones. Para isso, Vieira (2006) estudou 25 configurações geométricas em um planejamento composto central, no qual cada uma das quatro variáveis mencionadas foi estudada em cinco níveis, de modo a abranger toda faixa de famílias de hidrociclones utilizadas comercialmente.

O estudo em questão foi realizado através de testes experimentais com cones filtrantes constituídos por partículas de bronze sinterizado e utilizando rocha fosfática como material particulado. Além de simulações bidimensionais em fluidodinâmica computacional (CFD), visando o entendimento de perfis de escoamentos no interior dos hidrociclones.

Utilizando a técnica de superfícies de respostas e análise canônica o autor pôde selecionar a geometria de hidrociclone filtrante que apresentou os melhores resultados desejados, ou seja, um baixo número de Euler e alta eficiência total, esta configuração foi denominada HF₁₁. Ainda, os resultados de Vieira (2006) mostraram que para a maioria das geometrias estudadas os hidrociclones filtrantes apresentaram maior eficiência de coleta e consequentemente menores valores da resposta diâmetro de corte em relação ao equipamento convencional de mesma geometria.

Além do apresentado, os equipamentos filtrantes estudados por Vieira (2006) se mostraram mais eficientes energeticamente do que os separadores de mesma geometria e paredes maciças, pois apresentaram menor número de Euler. Através de simulações via CFD, Vieira (2006) pôde observar que houve um menor efeito de mistura na base do cone dos equipamentos filtrantes em relação aos convencionais. Com isso, em um hidrociclone filtrante a partícula teria menor probabilidade de migrar para o vórtice interno, e permaneceria próxima à parede até ser direcionada ao duto de *underflow*.

Almeida (2008) deu seguimento ao trabalho de Vieira (2006), estudando a influência das variáveis diâmetro de *underflow* e comprimento de *vortex finder* no desempenho do

hidrociclone filtrante otimizado HF₁₁. O material particulado adotado também foi a rocha fosfática. O autor encontrou que o aumento do comprimento de *vortex finder* levou a um aumento do número de Euler e da eficiência total de separação; no entanto esta variável não influenciou na razão de líquido do equipamento e promoveu uma redução no diâmetro de corte.

Em relação ao diâmetro de *underflow*, Almeida (2008) observou que o aumento nessa variável maximizou a razão de líquido e a eficiência total de separação, pois quanto maior o diâmetro de *underflow* maior é a quantidade de líquido direcionada a essa corrente. Isso também foi relacionado à redução do diâmetro de corte. O aumento nessa variável também promoveu a minimização do consumo energético (diminuição do número de Euler), pois a resistência ao escoamento no interior do hidrociclone seria reduzida com o aumento dessa dimensão.

O autor também determinou valores ótimos a serem utilizados a depender da aplicação do equipamento. Assim, Almeida (2008) observou que para o hidrociclone estudado a melhor configuração para se utilizar em operações de classificação seria o diâmetro de *underflow* de 5 mm e o comprimento de *vortex finder* de 21 mm. Já para operações de espessamento, empregar um diâmetro de *underflow* de 3 mm e comprimento de *vortex finder* de 12 mm seria mais vantajoso.

Façanha (2012) também investigou o processo de separação na geometria otimizada por Vieira (2006), utilizando partículas de rocha fosfática como material particulado. Esse trabalho foi o primeiro a explorar hidrociclones com a sessão cilíndrica filtrante, tendo como objetivo avaliar o efeito do posicionamento das paredes filtrantes e a influência da permeabilidade dos cilindros no desempenho da operação de hidrociclonagem.

A autora observou que os equipamentos HClF e HCoF apresentaram a mesma tendência para o número de Euler e para razão de líquido. Para ambos foi observada uma redução nessas respostas em relação ao equipamento convencional.

Nas condições operacionais estudadas por Façanha (2012), o equipamento com cilindro filtrante (HClF) apresentou o menor número de Euler. A autora acredita que esse resultado foi obtido devido à redução da perda de carga proporcionada pelo fato de a parede filtrante estar localizada no início do escoamento (ainda na sessão cilíndrica) e esse meio poroso representaria um caminho preferencial.

Por outro lado, os hidrociclones HClF e HCoF demonstraram comportamento contrário em relação a diâmetro de corte reduzido e eficiência total reduzida. Neste caso, a filtração se mostrou vantajosa para o equipamento cônico filtrante e desfavorável para o hidrociclone cilíndrico filtrante em relação à separação do material particulado.

Através das análises realizadas, Façanha (2012) concluiu que o hidrociclone HCoF seria mais vantajoso no processamento de suspensões contendo materiais particulados mais “finos”, pois foi capaz de promover a redução do diâmetro de corte reduzido e proporcionar uma redução no consumo energético de processamento (evidenciado pela redução do número de Euler). Por outro lado, o hidrociclone HCiF seria mais favorável que as demais modalidades para operações com materiais particulados mais “grossos”, uma vez que manteria o mesmo desempenho de separação e permitiria o processamento de um maior volume de suspensão por unidade de tempo.

Salvador (2013) também abordou a geometria HF11 otimizada por Vieira (2006). No entanto, esse foi o primeiro estudo acerca de um hidrociclone em que foram aplicadas paredes filtrantes nas sessões cilíndrica e cônica simultaneamente. A autora comparou o desempenho de um hidrociclone cilíndrico-cônico filtrante (HCiCoF) com os equipamentos cônico filtrante, cilíndrico filtrante e convencional de mesma geometria e avaliou o efeito da permeabilidade do meio filtrante numa mesma queda de pressão. O material particulado adotado por Salvador (2013) foi a rocha fosfática.

Foi observado pela autora que o número de Euler dos hidrociclones filtrantes foi menor que dos convencionais ao utilizar as matrizes porosas com menor permeabilidade. Por outro lado, a maior permeabilidade prejudicou o consumo energético dos hidrociclones filtrantes, pois levou ao aumento do número de Euler em relação ao convencional.

No que tange o desempenho de separação, Salvador (2013) pôde inferir que não houve variações significativas entre a eficiência total dos equipamentos nas modalidades filtrantes e convencional nas condições experimentais abordadas em seu estudo. A partir desse resultado, a autora sugere que a eficiência total seja uma resposta mais sensível à geometria do equipamento do que à associação da filtração à hidrociclonagem.

A razão de líquido dos hidrociclones filtrantes foi aumentada em relação ao convencional operando nas mesmas condições (SALVADOR, 2013), no entanto esse efeito foi mais pronunciado para o equipamento completamente filtrante. O equipamento de menor permeabilidade (HCiCoF- k_{1a}) apresentou a maior razão de líquido enquanto o equipamento de maior permeabilidade (HCiF- k_3) apresentou a menor razão de líquido. Isso possivelmente ocorreu devido ao efeito de mistura ser menos pronunciado para menores permeabilidades, com isso, menos partículas seriam direcionadas para o vórtice interno, efeito esse que leva uma maior quantidade de suspensão à corrente de *underflow*.

Em relação ao diâmetro de *underflow*, Salvador (2013) também observou que quando foram utilizadas maiores aberturas de *underflow*, foram obtidos maiores valores de vazão de alimentação, razão de líquido, eficiência total e menores valores de número de Euler para os hidrociclones cilíndrico-cônico filtrantes.

Os estudos prosseguiram com Silva (2014) cujo trabalho teve como objetivo realizar otimizações geométricas para a modalidade de hidrociclones cônico-filtrantes. Para isso, foram empregadas como variáveis de projetos dos problemas de otimização as relações geométricas D_i/D_c , D_o/D_c , L/D_c e a variável θ , de acordo com o planejamento composto central elaborado por Vieira (2006).

A autora empregou técnicas de superfícies de respostas e algoritmo de evolução diferencial para encontrar três configurações geométricas que atendessem às restrições impostas para cada caso de otimização proposto. O primeiro caso teve como objetivo maximizar a eficiência total para $Eu < 6500$; o segundo caso buscou minimizar a razão de líquido para $d_{50} < 7 \mu\text{m}$; e o terceiro caso teve o intuito de minimizar o número de Euler para $d_{50} < 7 \mu\text{m}$. Além disso, também foi avaliada a influência do diâmetro de *underflow* (D_U) e do comprimento do *vortex finder* (ℓ) no desempenho das geometrias otimizadas.

Foram obtidas três configurações otimizadas que foram submetidas a ensaios experimentais nas mesmas condições de pressão e material particulado de Vieira (2006) e Salvador (2013), rocha fosfática. Os hidrociclones obtidos foram: HFOT1, que forneceu a mais alta eficiência de separação dentre as geometrias estudadas ($E_T = 89,11 \%$); HFOT2, que promoveu baixa razão de líquido ($R_L = 17,12 \%$); e HFOT3, que proporcionou o menor consumo energético ($Eu = 753$). Através da análise do diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder*, Silva (2014) pôde selecionar os valores dessas variáveis que ressaltaram as potencialidades de cada equipamento. Para o HFOT1 os valores dessas variáveis já estavam ajustados ($D_U = 5\text{mm}$ e $\ell = 12\text{ mm}$), pois o equipamento obteve a maior eficiência total dentre todas as geometrias analisadas. Para o HFOT2, concluiu-se que reduzir o diâmetro de *underflow* para 2,5 mm poderia levar a uma grande redução na razão de líquido e consequentemente um aumento na concentração de sólidos do *underflow*. Para o HFOT3, o número de Euler foi pouco alterado por essas variáveis, mas adotar um diâmetro de *underflow* de 3,5 mm conferiu um maior caráter concentrador para o equipamento (maior C_{VU} e menor R_L).

Dando seguimento, Gonçalves (2016) realizou um estudo acerca da geometria otimizada concentradora HFOT3, obtida por Silva (2014). O material particulado utilizado nos experimentos foi o mineral quartzito. Nesse estudo, a autora avaliou o efeito do diâmetro de

underflow e da concentração de sólidos da alimentação no desempenho do hidrociclone cônico filtrante e convencional de mesma geometria. Além disso, a autora realizou uma comparação de desempenho entre o equipamento otimizado e o hidrociclone da família Rietema, uma clássica família de hidrociclones concentradores.

Gonçalves (2016) observou que o desempenho dos hidrociclones de geometria HFOT3 era pouco dependente da utilização das paredes porosas estudadas. A autora creditou esse resultado ao tamanho reduzido da parte cônica filtrante em relação ao tamanho da seção cilíndrica do hidrociclone em questão. A permeabilidade utilizada na execução dos testes também pode ter contribuído para os resultados encontrados.

Para os hidrociclones HFOT3, acréscimos no diâmetro de *underflow* contribuíram para o aumento do número de Euler, da razão de líquido e da eficiência total, ao passo que houve uma redução na concentração de sólidos da corrente de *underflow*. Dessa forma, Gonçalves (2016) observou que para os hidrociclones de geometria HFOT3, o aumento da restrição ao escoamento reduziu o consumo energético, sinalizando um comportamento possivelmente não linear da resposta número de Euler em relação à variável diâmetro de *underflow*. Esse resultado era inesperado, visto que Almeida (2008) e Salvador (2013) verificaram nas geometrias estudadas que decréscimos no diâmetro de *underflow* contribuíram para o aumento do número de Euler em decorrência da perda de carga associada à restrição ao escoamento da corrente de *underflow*. A autora creditou este comportamento imprevisto à geometria distinta do equipamento otimizado, pois os demais trabalhos estudaram geometrias com características classificadoras.

No que se refere às alterações na concentração de sólidos na alimentação, Gonçalves (2016) observou que aumentar essa variável operacional resultou na redução de número de Euler e razão de líquido, e aumento na concentração de sólidos do *underflow*. Por outro lado, também foi ocasionada uma redução na eficiência total (desfavorável à separação).

Os valores encontrados para a razão de líquido foram baixos para os três diâmetros de *underflow* analisados por Gonçalves (2016), o que indica a utilização do hidrociclone HFOT3 para operações de concentração ou espessamento. Além disso, em todas as condições estudadas, o hidrociclone HFOT3 teve um desempenho superior ao tradicional hidrociclone da família Rietema, pois apresentou eficiência total superior e menor número de Euler médio que a família clássica. A autora concluiu que, para aplicações do equipamento em operações de espessamento seria mais indicado uma menor abertura de *underflow* ($D_U = 3\text{mm}$). Contudo, se for necessário

trabalhar com suspensões concentradas (acima de 5,5 %v.) é aconselhável utilizar um diâmetro de *underflow* de 5 mm, de modo a não reduzir excessivamente a eficiência total.

Salvador (2017) estudou três casos de otimização para cada uma das quatro modalidades de hidrociclones: convencional, cilíndrico filtrante, cônico filtrante e cilíndrico-cônico filtrante. O Caso 1 tinha como objetivo a maximização da eficiência total com $Eu < 5000$; o Caso 2 consistia na minimização da razão de líquido com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$; e o Caso 3 visava a minimização do número de Euler com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$. Nesse estudo foram empregadas como variáveis de projetos dos problemas de otimização as relações geométricas Di/Dc , Do/Dc , L/Dc e a variável θ , previamente organizadas em um planejamento composto central com 25 diferentes configurações para cada modalidade de hidrociclone.

Os resultados experimentais do planejamento obtidos por Salvador (2017) permitiram a obtenção de equações de regressão para previsão de número de Euler, razão de líquido, eficiência total e diâmetro de corte, como funções das dimensões geométricas estudadas. De acordo com a autora, a principal diferença constatada entre as três modalidades de hidrociclones filtrantes e convencional estava no consumo energético. Os hidrociclones filtrantes apresentaram um número de Euler expressivamente menor do que os equipamentos de paredes maciças de mesma geometria, independentemente de o meio filtrante estar localizado na seção cônica, cilíndrica, ou em ambas.

A associação das equações de regressão obtidas no PCC ao algoritmo de evolução diferencial realizado por Salvador (2017) resultou em três geometrias otimizadas para cada categoria de hidrociclone. As geometrias otimizadas foram avaliadas experimentalmente e foram capazes de majorar as eficiências totais e minorar as razões de líquido e números de Euler, em relação às demais geometrias estudadas. Os resultados encontrados para separação de partículas de quartzito em suspensão foram:

- HCon-OT1: $E_T = 95,47 \%$; HCon-OT2: $R_L = 5,53 \%$; HCon-OT3: $Eu = 845$;
- HClF-OT1: $E_T = 91,91 \%$; HClF-OT2: $R_L = 7,89 \%$; HClF-OT3: $Eu = 665$;
- HCoF-OT1: $E_T = 90,31 \%$; HCoF-OT2: $R_L = 9,59 \%$; HCoF-OT3: $Eu = 648$;
- HClCoF-OT1: $E_T = 89,59 \%$; HClCoF-OT2: $R_L = 12,41 \%$; HClCoF-OT3: $Eu = 582$.

A partir do estudo de Salvador (2017), Ascendino (2019) analisou experimentalmente o efeito das variáveis operacionais queda de pressão, concentração de sólidos da alimentação, e dimensão acessória diâmetro de *underflow* no desempenho das geometrias cilíndrico-filtrantes otimizadas HClF-OT1, HClF-OT2 e HClF-OT3. Para isso, o autor realizou um planejamento

fatorial com três variáveis a três níveis para cada equipamento e utilizou o quartzito como material particulado.

Para os hidrociclones de geometria HCiF-OT1, Ascendino (2020) observou que a eficiência total foi majorada e a razão de líquido minorada para os hidrociclones da modalidade cilíndrico-filtrante em todas as condições experimentais estudadas. Além disso, o aumento da concentração de sólidos na alimentação provocou reduções significativas na eficiência total e número de Euler dos separadores.

Para os equipamentos resultantes do segundo caso de otimização, Ascendino (2019) observou que todos apresentaram baixas razões de líquido e números de Euler inferiores a 900. Os hidrociclones convencionais apresentaram menor razão de líquido em comparação aos filtrantes de mesma geometria. Além disso, observou-se que não houve uma influência significativa da queda de pressão no comportamento da razão de líquido para os hidrociclones de geometria HCiF-OT2. Essa resposta foi influenciada principalmente pelo diâmetro de *underflow*, seguido da concentração volumétrica da corrente de alimentação.

Para o terceiro caso de otimização, foi verificado por Ascendino (2020) que os hidrociclones filtrantes apresentaram menores valores do número de Euler do que a modalidade convencional, exceto nas condições em que operavam com a suspensão mais diluída ($C_{VA} = 1,0\%$). Assim como no caso 2, todos os hidrociclones apresentaram baixas razões de líquido e número de Euler. Inclusive, houve condições em que foram obtidas razões de líquido inferiores àquelas do segundo caso de otimização, apresentando HCiF-OT3 como uma opção mais interessante que HCiF-OT2 para aplicações em operações de espessamento. Além disso, o número de Euler foi reduzido com o aumento de C_{VA} e D_U .

De acordo com o exposto, fica claro que manipular a estrutura e as principais dimensões características em um hidrociclone pode afetar significativamente o desempenho destes equipamentos. Ademais, as condições operacionais também são de grande importância na avaliação de um hidrociclone. O comportamento fluidodinâmico desses equipamentos depende da concentração de sólidos na alimentação, queda de pressão de operação e vazão de alimentação, por exemplo.

2.5. TRABALHOS CORRELATOS

Foi observado que alterações nas variáveis operacionais e materiais podem afetar o escoamento interno e o desempenho dos hidrociclones (NI *et al.*, 2016; TIAN *et al.*, 2018).

Diante disto, a influência destas variáveis sobre as principais respostas relacionadas à hidrociclonagem tem sido estudada teórica e experimentalmente com o intuito de entender, relacionar e quantificar o efeito destas variáveis sobre o processo de hidrociclonagem.

Segundo Gonçalves (2019), a queda de pressão no equipamento e a concentração de sólidos na alimentação são as condições operacionais que mais influenciam o desempenho dos hidrociclones. A queda de pressão é proporcional à eficiência total de separação e ao consumo de energético (BRADLEY, 1965; KENSALL, 1958). Portanto, o primeiro passo ao se projetar uma unidade de hidrociclonagem é definir a forma de bombeamento do fluido baseado na quantidade de energia e recursos financeiros disponíveis. Em média, os hidrociclones operam com pressões que variam de 0,34 a 6 bar, considerando que os equipamentos grandes operam nos patamares inferiores, entre 1 e 2 bar (SVAROVSKY, 2000).

Embora haja certas correlações na literatura para determinar curvas de capacidade de hidrociclones, sua aplicabilidade é bastante limitada aos parâmetros geométricos e operacionais usados. Estas correlações são essenciais para o projeto de equipamentos auxiliares a montante e a jusante do separador, uma vez que as condições de queda de pressão levam, não apenas ao dimensionamento do equipamento de propulsão, mas também ao dimensionamento de tubos e dispositivos para controle e monitoramento de vazões (IZQUIERDO *et al.*, 2018).

Resultados publicados por Rodrigues *et al.* (2003) apresentam uma correlação direta entre a queda de pressão dentro do hidrociclone e a vazão volumétrica de líquido alimentado no sistema. Sendo assim, estes autores encontraram em seu estudo que a queda de pressão é mais acentuada para vazões volumétricas maiores. Tal fenômeno pode ser explicado pela conservação de energia e de momento linear. Uma vez que há uma taxa mássica maior entrando no sistema, há também uma maior velocidade de entrada. Logo, o saldo de energia após a passagem do fluido é maior para vazões mais altas resultando em uma maior velocidade tangencial média do fluido para sistemas com maiores capacidades de processamento, o que leva a um gradiente de pressão mais significativo no sistema.

Mukherjee *et al.* (2003) observaram que o aumento da pressão na alimentação geraria um aumento na queda de pressão ao longo do eixo do hidrociclone. Isto causaria um aumento da velocidade axial das partículas devido ao vórtice livre formado, resultando em deslocamento de partículas durante a separação. Nesse sentido, para diminuir a queda de pressão ao longo do eixo do hidrociclone e melhorar o efeito de separação dos hidrociclones, os autores sugerem trabalhar com diâmetros do *overflow* maiores.

Lee (2014) verificou a influência da pressão de alimentação no potencial de operação de um hidrociclone de 335 mm de diâmetro operando a baixa pressão (1,38 – 5,56 kPa) para separar partículas orgânicas finas (1 a 700 μm) de água de aquicultura. Através de técnicas de superfícies de respostas o autor sugere uma condição ótima de operação, que corresponde ao valor intermediário para a pressão de alimentação.

Corroborando com os resultados anteriores, Tian *et al.* (2018) afirmam que o aumento da queda de pressão melhora o desempenho de separação e aumenta o consumo energético do equipamento até que se atinja um patamar em que essas respostas passam a permanecer constantes. Devido ao aumento da queda de pressão, há a elevação da vazão de alimentação, que acarreta a redução do tempo de residência das partículas no hidrociclones. Por sua vez, o baixo tempo de residência das partículas no equipamento pode resultar na estabilização da eficiência total e até mesmo torná-la decrescente.

Neesse *et al.* (2015) apresentaram a aplicação da hidrociclonagem a altas pressões de alimentação (> 150 kPa ou 1,5 bar) na classificação de partículas sólidas ultrafinas. Os autores foram capazes de separar partículas submicrônicas operando hidrociclones em altas pressões de alimentação, 6 MPa. Segundo os autores, esse resultado não poderia ser alcançado ao operar com pressões de alimentação mais baixas.

Da mesma forma, diversos trabalhos vêm estudando os efeitos da concentração de sólidos da alimentação no desempenho de hidrociclones. Em geral, o aumento da concentração de sólidos proporciona o rápido decaimento da eficiência (GONÇALVES, 2016; KUANG *et al.*, 2012). De acordo com Massarani (2001), a velocidade terminal de uma partícula é reduzida substancialmente na presença de outras partículas, e a taxa de sedimentação é reduzida constantemente. Isso acontece porque em sistemas diluídos, as partículas sólidas circulam livremente, porém, à medida que a concentração na suspensão aumenta, as partículas ficam mais próximas e interagem entre si, influenciando as suas trajetórias (ORTEGA-RIVAS e SVAROVSKY, 1998).

Saengchan *et al.* (2009) propuseram a utilização de um hidrociclone de geometria Bradley em substituição à centrífuga usualmente empregado no processo de produção de amido de mandioca. Para isso, estudaram a variação de queda de pressão, diâmetro de *underflow* e concentração de sólidos no equipamento. Os autores observaram que o aumento da queda de pressão de operação promoveu o aumento da vazão de alimentação e da força centrífuga, produzindo uma eficiência total maior, uma razão de líquido mais baixa e um diâmetro de corte menor das partículas de amido. Uma concentração de alimentação mais alta resultou em uma

razão de líquido mais baixa, devido às partículas de amido apresentarem maior tendência a sair pelo *overflow*, devido à proximidade de densidade entre a fase dispersa e contínua. Menores diâmetros de *underflow* resultaram na redução da eficiência de separação amido-água, pois essa restrição fez com que partículas de amido fossem acumuladas na seção cônica e direcionadas ao *overflow*, consequentemente reduzindo a recuperação de sólidos. Além disso, os resultados experimentais foram usados para construir modelos empíricos para predição da eficiência total.

Zhang *et al.* (2011) avaliaram que a alta concentração de partículas reduz a componente tangencial da velocidade. O autor relaciona esse efeito ao aumento de colisões entre as partículas que, dispersas na fase fluida podem aumentar a viscosidade aparente da suspensão, aumentando assim a dissipação de energia e reduzindo as velocidades tangenciais. O autor cita que para sistemas densos, além da interação entre a fase contínua e as partículas, há uma força de interação entre as partículas, que tem importante influência no campo de escoamento bifásico. Nesse mesmo estudo, o autor observa que a presença de partículas no vórtice interno, diminui as velocidades axiais da fase fluida, pois o aumento da concentração de sólidos reflete em um aumento da força de arrasto que as partículas exercem na fase contínua.

Davailles *et al.* (2012) realizou um estudo experimental e numérico variando a concentração de sólidos de alimentação entre 10 % e 50 % em massa. Como esperado, o desempenho do hidrociclone foi prejudicado com o aumento da concentração de sólidos da alimentação. De fato, à medida que a concentração de sólidos de alimentação aumenta, a velocidade tangencial (que conduz a separação dentro do hidrociclone) é fortemente afetada. O diâmetro de corte e a concentração de sólidos do *underflow* aumentam com o teor de sólidos da alimentação, assim como a razão de líquido, foram observados aumentos de 2 % a cerca de 20 %, com o aumento da concentração da suspensão alimentada, para essa reposta. Além disso, os autores observaram que, em altas concentrações, partículas são acumuladas na seção cônica e a região preenchida com partículas não contribui mais para a separação. Os sólidos que preenchem esta região do hidrociclone reduzem o volume útil disponível para separação, o que confere ao equipamento uma geometria efetiva que difere da sua geometria física. À medida que a concentração de sólidos é aumentada, o leito de partículas formado cresce, sendo que na maior concentração de sólidos testada, a seção cônica do hidrociclone foi quase inteiramente preenchida com um leito de partículas. Além disso, os autores relataram que pode ocorrer a formação de regiões densas no interior do hidrociclone, que dissipam energia por meio de efeitos viscosos, principalmente em direção à parte inferior da seção cônica.

Kumar *et al.* (2021) estudaram a variação da C_{VA} utilizando simulações fluidodinâmicas em um hidrociclone operando com um núcleo de ar. Os autores verificaram que, aumentando a concentração de partículas de 0 % para 1,5 %, em volume, há um aumento nos níveis de intensidade de turbulência do fluido em cerca de 12 % na região próxima à parede, quantificado pela raiz quadrada média (RMS) do campo de velocidade. Por outro lado, um aumento adicional da concentração de sólidos para 1,8 % causou uma queda de aproximadamente 4 % na turbulência do fluido. Os autores creditam essa redução na turbulência do fluido à aglomeração de partículas que ocorre à medida que se aumenta a concentração de partículas na suspensão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta sessão são apresentadas as informações relativas à preparação e à caracterização do material particulado empregado na formulação das suspensões empregadas nos testes de hidrociclonagem. Além disso, descrevem-se a unidade experimental e os hidrociclones utilizados, bem como o procedimento experimental adotado. Apresentam-se também o planejamento experimental utilizado no desenvolvimento deste trabalho e a metodologia numérica adotada para realizar a caracterização dos hidrociclones filtrantes otimizados por Salvador (2017).

3.1. MATERIAL PARTICULADO

Foi adotado como material particulado no presente estudo o quartzito concedido pela empresa ANEX Mineração situada em Itabirito - MG. Trata-se de uma rocha metamórfica, composta principalmente por sedimentos recristalizados ricos em quartzo. Esse minério possui como principal característica uma elevada resistência interna, devido à estrutura cristalina densa e coesa no qual é formado (SANTOS *et al.*, 2014). Em virtude disto, o quartzito proporciona as principais características desejadas em um material particulado para ensaios experimentais de hidrociclonagem, dureza e resistência à quebra, que proporcionam a estabilidade da distribuição granulométrica durante a operação dos hidrociclones. Dessa forma, é possível reproduzir as condições experimentais com maior confiabilidade.

A composição química do quartzito foi determinada através da técnica de espectrometria de raios X pela própria empresa doadora, e pode ser consultada na Tabela 3.1-1.

A densidade real do quartzito ($2,6705 \pm 0,0008 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) foi determinada por picnometria com deslocamento de gás Hélio, realizada no equipamento AccuPyc 1330 da Micromeritics. Enquanto a densidade aparente foi obtida através de picnometria convencional e correspondeu a $2,627 \pm 0,015 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Tabela 3.1-1 – Composição química do quartzito.

Espécie	Composição Química (%)
SiO ₂	95,45
Al ₂ O ₃	3,56
K ₂ O	0,65
Na ₂ O	0,20
TiO ₂	0,08
Fe ₂ O ₃	0,04
CaO	0,01
MgO	0,01

Fonte: Salvador (2017).

3.1.1. PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

Inicialmente foi realizada a adequação do material particulado à faixa granulométrica desejada, com o intuito de replicar as condições experimentais utilizadas por Salvador (2017) na otimização dos hidrociclones a serem caracterizados nesta tese. Para a adequação do material particulado foi realizada a cominuição das partículas via moagem em moinho de bolas. O moinho utilizado está apresentado na Figura 3.1-1, ele era composto por um vaso cerâmico cilíndrico de 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura (corpo do moinho), e 75 esferas de cerâmicas de, aproximadamente, 4 cm de diâmetro (meio de moagem) e operado a uma rotação constante de 23 rpm.



Figura 3.1-1 – Moinho de bolas utilizado na cominuição do material particulado.

Fonte: A autora.

A cada batelada foram necessárias, aproximadamente, 52 h para processar 3 kg de quartzito previamente seco em estufa a 105°C. Ao término de cada batelada, verificou-se a distribuição granulométrica do quartzito por meio da análise de partículas por difração a *laser* no equipamento Mastersizer Microplus, marca Malvern.

Com auxílio do *software* Statistica® foram realizados ajustes dos modelos de distribuição granulométrica da literatura aos dados experimentais e foi determinado que o modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB) foi o que melhor se ajustou às informações experimentais obtidas para o quartzito moído. Com um coeficiente de correlação (R^2) igual a 99,08 %, foram determinados os parâmetros $d_{63,2}$ (18,78 μm) e n (1,02) exibidos na Equação 3.1.

$$X = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{18,78} \right)^{1,02} \right] \quad (3.1)$$

A distribuição granulométrica característica das amostras de quartzito utilizadas, bem como o ajuste do modelo RRB aos dados experimentais são apresentados na Figura 3.1-2.

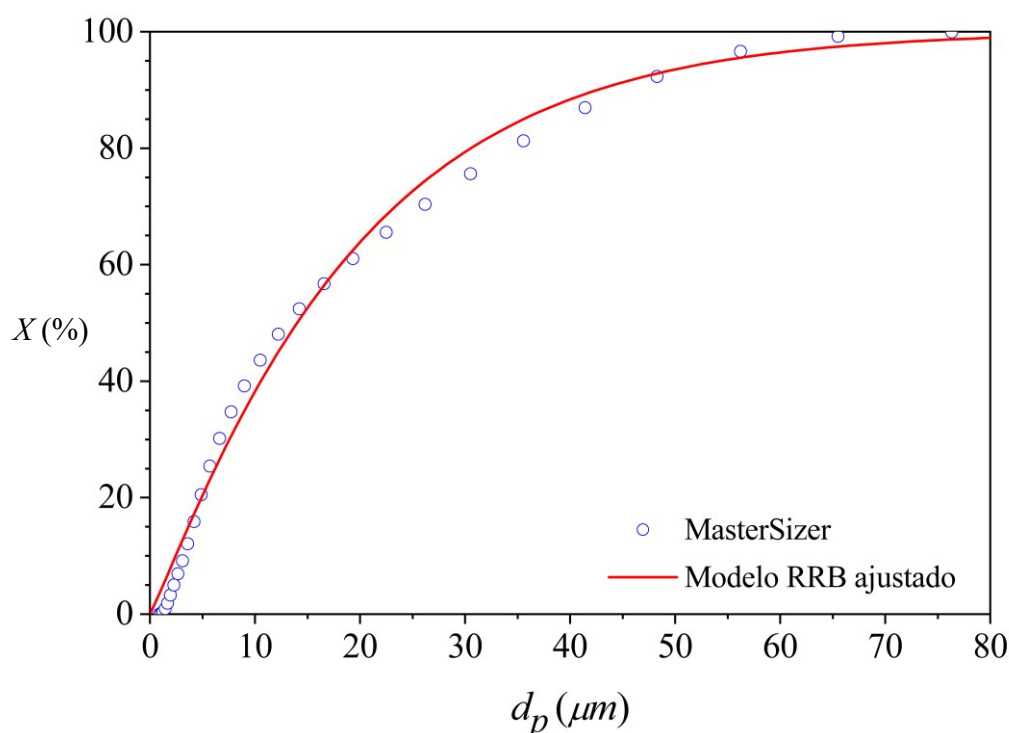


Figura 3.1-2 – Distribuição granulométrica característica do quartzito moído.

Fonte: A autora.

3.2. HIDROCICLONES

Na intenção de auxiliar na diferenciação entre hidrociclones estudados, foi adotada a seguinte nomenclatura durante o desenvolvimento deste trabalho, em que a sigla **HCiCoF** é utilizada ao se referir aos **Hidrociclones Cilíndrico-Cônico-Filtrantes**, **HCoF** aos **Hidrociclones Cônico-Filtrantes**, **HCiF** aos **Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes** e **HCon** para os **Hidrociclones Convencionais**.

Dentre as geometrias obtidas por Salvador (2017) através de otimizações multiobjetivo foram selecionadas as geometrias HCiCoF-OT1, HCoF-OT1, HCiF-OT1, otimizadas para o caso 1, e HCiCoF-OT3, HCoF-OT3 e HCiF-OT3, otimizadas para o caso 3, para compor este estudo. Vale ressaltar que os dados de caracterização experimental dos hidrociclones de geometrias HCiF-OT1 e HCiF-OT3, abordados neste trabalho, foram obtidos por Ascendino (2019).

Os hidrociclones otimizados para maximização da eficiência total (caso 1) promoveram grande recuperação de sólidos, assim, são hidrociclones aplicáveis em processos de separação de partículas finas ou clarificação. Os equipamentos otimizados para o caso 2 não foram abordados nesse estudo, pois apesar desse caso objetivar a minimização da razão de líquido, os hidrociclones otimizados para minimização do número de Euler (caso 3) apresentaram-se como uma opção mais vantajosa para operações de espessamento. Foi observado que as geometrias otimizadas para o caso 3, além de proporcionaram um baixo consumo energético, apresentaram baixa razão de líquido e elevada concentração de sólidos na corrente de *underflow*.

Para cada caso de otimização supracitado, a autora obteve as seguintes proporções geométricas:

- HCiCoF-OT1 – Hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante para o caso 1a (maximização da eficiência total para hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes): $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,16; 0,19; 7,3; 9,0^\circ\}$;
- HCoF-OT1 – Hidrociclone cônico-filtrante otimizado para o caso 1b (maximização da eficiência total para hidrociclones cônico-filtrantes): $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,21; 0,19; 7,6; 9,0^\circ\}$;
- HCiF-OT1 – Hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado para o caso 1c (maximização da eficiência total para hidrociclones cilíndrico-filtrantes): $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,16; 0,19; 7,3; 9,0^\circ\}$;

- HCoF-OT3 – Hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante para o caso 3a (minimização do número de Euler para hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes): $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 6,7; 20,0^\circ\}$;
- HCoF-OT3 – Hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante para o caso 3b (minimização do número de Euler para hidrociclones cônico-filtrantes): $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 7,6; 11,2^\circ\}$.
- HCoF-OT3 – Hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante para o caso 3c (minimização do número de Euler para hidrociclones cilíndrico-filtrantes): $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 5,8; 14,5^\circ\}$.

Além das dimensões geométricas indicadas acima, todos os equipamentos possuíam dutos de alimentação de seção reta circular, diâmetro de seção cilíndrica (Dc) igual a 30 mm e comprimento do *vortex finder* (ℓ) de 12 mm.

A fim de avaliar o impacto da filtração no desempenho desses separadores, cada uma das configurações otimizadas foi também testada na modalidade convencional (paredes totalmente maciças), mantendo condições operacionais análogas.

Logo, nesse estudo foram montados oito hidrociclones segundo as geometrias HCoF-OT1, HCoF-OT1, HCoF-OT3 e HCoF-OT3 advindas da otimização de Salvador (2017). Além disso, foram abordados neste trabalho os hidrociclones cilíndrico-filtrantes otimizados (HCoF-OT1 e HCoF-OT3), cujos dados experimentais foram obtidos por Ascendino (2019). Para isso adotou-se a seguinte nomenclatura:

- HCoF_{1a} – Hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT1 otimizado por Salvador (2017);
- HCon_{1a} – Hidrociclone convencional com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT1 otimizado por Salvador (2017);
- HCoF_{1b} – Hidrociclone cônico-filtrante com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT1 otimizado por Salvador (2017);
- HCon_{1b} – Hidrociclone convencional com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT1 otimizado por Salvador (2017);
- HCoF_{1c} – Hidrociclone cilíndrico-filtrante com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT1 otimizado por Salvador (2017);
- HCon_{1c} – Hidrociclone convencional com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT1 otimizado por Salvador (2017);

- HCiCoF_{3a} – Hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante com as dimensões geométricas do hidrociclone HCiCoF-OT3 otimizado por Salvador (2017);
- HCon_{3a} – Hidrociclone convencional com as dimensões geométricas do hidrociclone HCiCoF-OT3 otimizado por Salvador (2017);
- HCoF_{3b} – Hidrociclone cônico-filtrante com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT3 otimizado por Salvador (2017);
- HCon_{3b} – Hidrociclone convencional com as dimensões geométricas do hidrociclone HCoF-OT3 otimizado por Salvador (2017).
- HCiF_{3c} – Hidrociclone cilíndrico-filtrante com as dimensões geométricas do hidrociclone HCiF-OT3 otimizado por Salvador (2017);
- HCon_{3c} – Hidrociclone convencional com as dimensões geométricas do hidrociclone HCiF-OT3 otimizado por Salvador (2017).

Apresentam-se na Figura 3.2-1 os hidrociclones filtrantes classificadores HCiCoF_{1a} , HCoF_{1b} e HCiF_{1c} (Caso 1 de otimização – Máxima Eficiência Total), na Figura 3.2-2 são mostrados os hidrociclones filtrantes concentradores (Caso 3 de otimização – Mínimo Número de Euler) HCiCoF_{3a} e HCoF_{3b} e HCiF_{3c} . As dimensões geométricas desses equipamentos são descritas na Tabela 3.2-1.

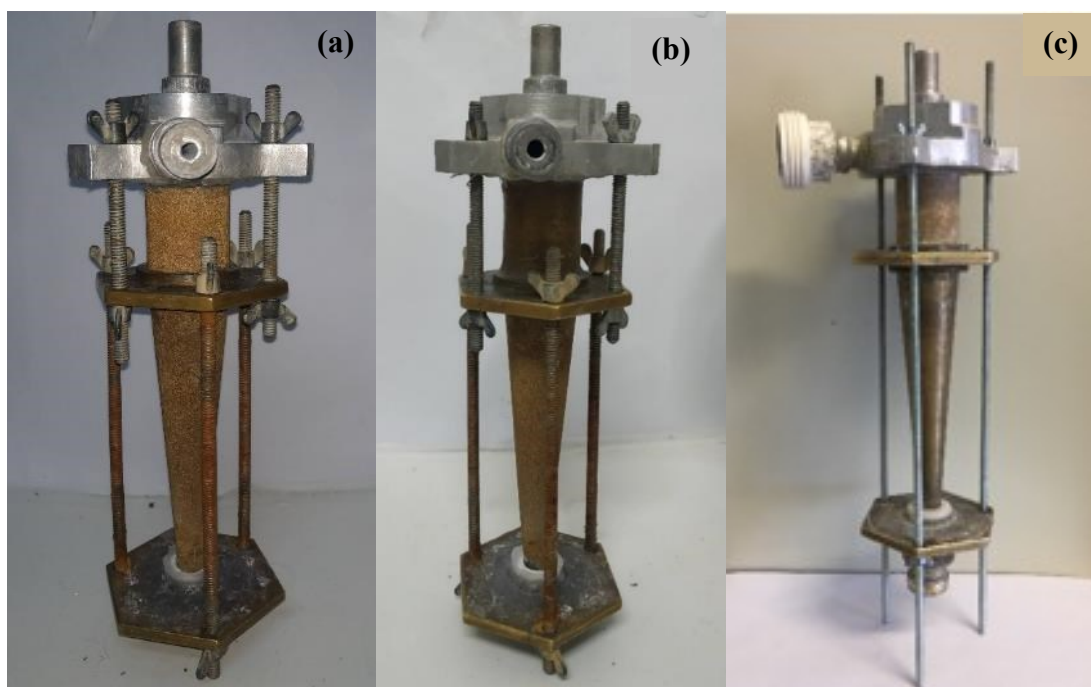


Figura 3.2-1 – Hidrociclones classificadores (a) HCiCoF_{1a} , (b) HCoF_{1b} e (c) HCiF_{1c} .

Fonte: (a) (b) A autora, (c) Ascendino (2019).

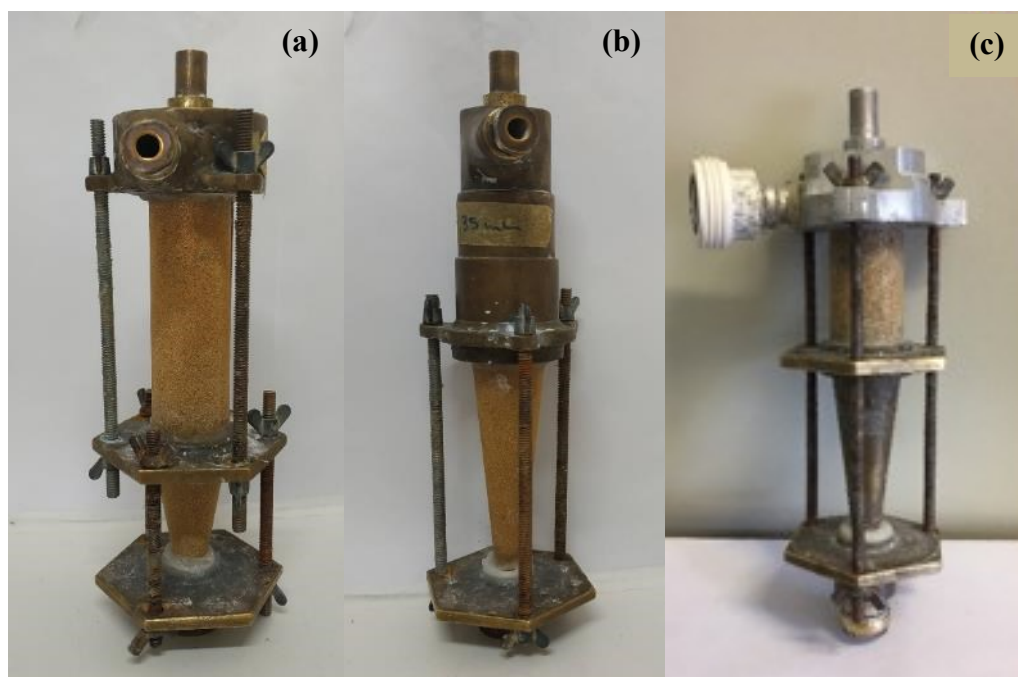


Figura 3.2-2 – Hidrociclones concentradores (a) HCiCoF_{3a} , (b) HCoF_{3b} e (c) HCiF_{3c} .

Fonte: (a) (b) A autora, (c) Ascendino (2019).

Tabela 3.2-1 – Dimensões geométricas dos hidrociclones.

	HCiCoF- OT1	HCoF- OT1	HCiCoF- OT3	HCoF- OT3
D_c (mm)	30,0	30,0	30,0	30,0
D_i (mm)	4,8	6,3	7,8	7,8
D_o (mm)	5,7	5,7	10,5	10,5
h (mm)	60,2	69,2	130,1	100,5
θ (°)	9,0	9,0	20,0	11,2
ℓ (mm)	12,0			
D_U (mm)	3, 4 ou 5			

Fonte: A autora.

A estrutura dos hidrociclones era constituída por peças intercambiáveis e de montagem modular. As seções cilíndricas e os troncos de cone foram acoplados por sistemas de travas mecânicas e os dutos de alimentação, *overflow* e *underflow* eram peças rosqueáveis. Além disso, para evitar vazamentos, realizou-se a vedação nas intersecções dos cilindros e cone utilizando silicone acético. Dessa forma, após a montagem do equipamento era necessário aguardar aproximadamente 24 h para garantir a completa secagem do selante de cura acética.

Os dutos de alimentação e *overflow* utilizados na montagem dos hidrociclones eram constituídos de latão ou alumínio, assim como os cilindros e troncos de cone de paredes

totalmente maciças (impermeáveis). Por sua vez, as matrizes porosas (cilindros e troncos de cone permeáveis) foram confeccionadas com partículas de bronze ($D_p = 150 \mu\text{m}$) sinterizado pela Indústria e Comércio de Filtros e Materiais Sinterizados Ltda. (Metalsinter). A espessura da parede de todos os componentes permeáveis era $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Os detalhes do filtro obtido por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), antes e depois do processo de colmatção, são mostrados nas Figuras 3.2-3 e 3.2-4.

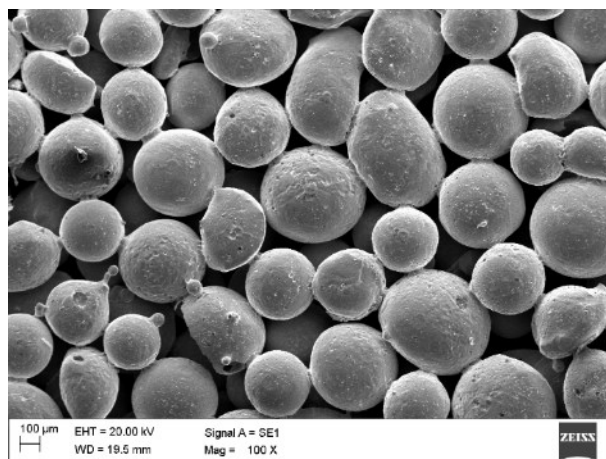


Figura 3.2-3 – Detalhes do filtro de bronze sinterizado antes do processo de colmatção, por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (Partículas de Bronze sinterizado).

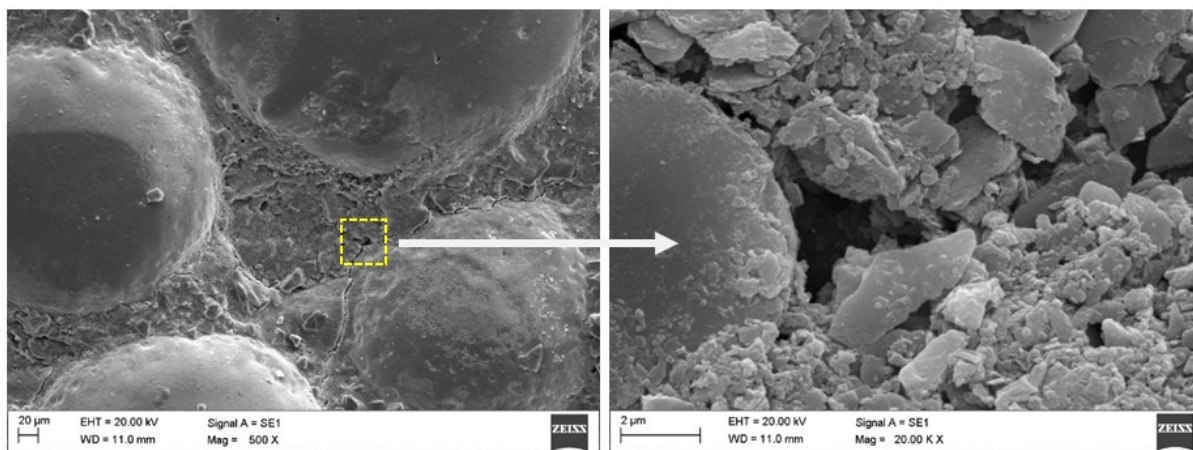


Figura 3.2-4 – Detalhes com menor foco em microscopia eletrônica de varredura (MEV) de partículas de bronze sinterizado do meio filtrante após o processo de colmatção, à esquerda. À direita, detalhes de partículas de quartzo nos interstícios.

A permeabilidade e a porosidade da parede filtrante foram determinadas após a colmatção através da metodologia de Rocha e Vieira (2012) e Darby (2001), e foram obtidos

os valores de $4,19 \pm 0,70 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ e $5,07 \pm 0,28 \%$, respectivamente. Após o processo de colmatação e em condições estacionárias, a vazão de filtrado médio por área de filtro foi $(1,63 \pm 0,70) \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ a 147 kPa.

3.3. UNIDADE EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (LASER – FEQUI/UFU).

A unidade experimental utilizada na realização dos experimentos era composta por um reservatório com capacidade de 250 L (a), um agitador mecânico (b), uma bomba centrífuga (c), um medidor de vazão do tipo Coriolis (d), um manômetro digital (e) e os hidrociclones (f). A linha de operação era composta por: (1) a da linha de alimentação do hidrociclone, (2) a linha de *bypass*. A linha de alimentação o ajuste de vazão era realizado através de uma válvula globo (g) e na linha de *bypass* era utilizada uma válvula gaveta (h). Cada componente da unidade experimental está indicado na Figura 3.3-1.

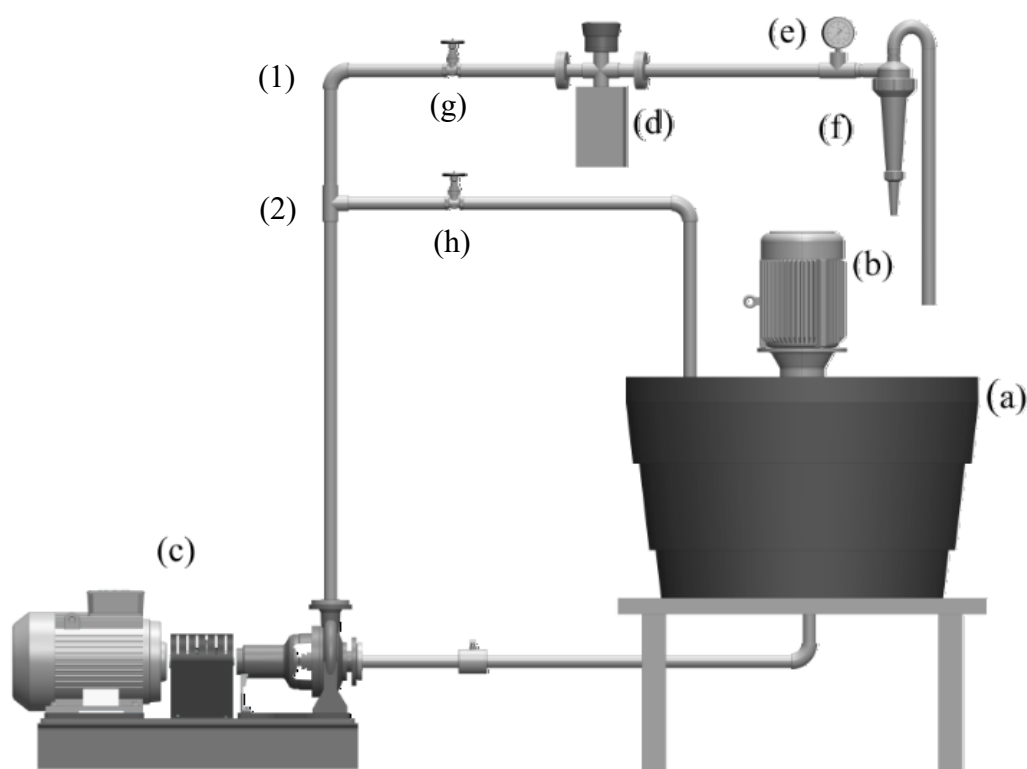


Figura 3.3-1 – Unidade experimental utilizada nos experimentos de hidrociclonação.
Fonte: Salvador *et al.* (2021).

O reservatório utilizado para o armazenamento da suspensão era de polietileno, e nele foi instalado um par de chicanas próximo às paredes, a fim de evitar a formação de vórtices no tanque. A homogeneização da suspensão de alimentação contida no tanque era realizada com auxílio de um agitador mecânico de 1,5 cv, o qual era operado à rotação constante de 1200 rpm (rotação aferida por meio de tacômetro digital acoplado a um inversor de frequência).

Para o bombeamento da suspensão do tanque até a linha de operação era utilizada uma bomba centrífuga. O equipamento modelo 1,5/1B-AH da marca Weir Mineral, contava com potência de 5 cv. Essa bomba possuía revestimento especial para sistemas abrasivos, característica importante devido à natureza abrasiva da suspensão utilizada nos testes experimentais.

Na linha de operação estavam instalados um medidor de vazão mássica e um manômetro digital. O medidor de vazão utilizado era do modelo RHM08-3FS1PN e marca Metroval. Era constituído de um *display* com transmissão de informações referentes à vazão e um sensor de medição de vazão do tipo Coriolis, cuja faixa de operação compreendia vazões mássicas de 300 a 1800 kg/h e pressões de até 15,5 bar. Um manômetro digital de Bourdon foi empregado na medição da queda de pressão na entrada do hidrociclone, faixa de operação de 0 a 7 bar.

3.4. PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS

Como o objetivo principal deste trabalho envolvia a caracterização experimental dos hidrociclones de geometrias HCoF-OT1, HCoF-OT3 e HCoF-OT3, otimizados por Salvador (2017), um planejamento experimental foi proposto com o intuito de avaliar a performance desses separadores frente a alterações operacionais. Além disso, o mesmo planejamento foi executado para os equipamentos convencionais de mesma geometria para realizar a avaliação da filtração.

Para a caracterização dos hidrociclones foram elencadas três variáveis: concentração volumétrica de sólidos na alimentação (C_{VA}), diâmetro de *underflow* (D_U) e queda de pressão ($-\Delta P$). As variáveis foram estudadas em três níveis igualmente espaçados: C_{VA} de 1,0 % a 10,0 % em volume, D_U de 3 a 5 mm e $-\Delta P$ de 1,18 a 1,77 bar.

Dessa forma, um planejamento fatorial completo a 3 níveis com duas réplicas no ponto central foi proposto para cada hidrociclone. Cada fator passa a ser representado por sua forma codificada, nível superior (+1), central (0) e inferior (-1). Apresenta-se na Tabela 3.4-1 o

planejamento de experimentos genérico que servirá de base para a análise dos hidrociclones estudados.

Tabela 3.4-1 – Matriz de planejamento para os experimentos.

Experimento	$X_1 (C_{VA})$	$X_2 (D_v)$	$X_3 (-\Delta P)$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14 (3)	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Fonte: A autora.

Os orifícios de *underflow* foram constituídos de teflon, como peças acessórias rosqueáveis aos hidrociclones, e eram facilmente alteráveis. Os orifícios de *underflow* utilizados de acordo com o planejamento experimental estão mostrados na Figura 3.4-1.

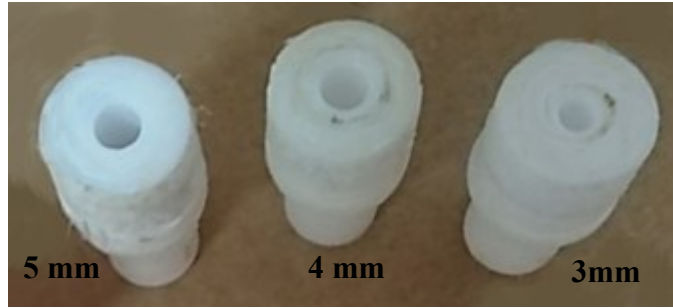


Figura 3.4-1 – Orifícios de *underflow* intercambiáveis (D_U de 5 mm, 4 mm e 3 mm).

Fonte: A autora.

Na Equação 3.2 representa-se a equação de codificação para as variáveis quantitativas (δ). Nela, δ_i é o valor do fator em sua forma original, $\bar{\delta}_i$ é o nível do valor central utilizado no experimento e ΔX_i é a diferença entre o nível mais alto (+ 1) e mais baixo (– 1) de cada variável.

$$X_i = 2 \frac{\delta_i - \bar{\delta}_i}{\Delta X_i} \quad (3.2)$$

Dessa maneira, a codificação de cada variável quantitativa é representada pelas equações 3.3, 3.4 e 3.5.

$$X_1 = \frac{C_{VA} - 5,5}{4,5} \quad (3.3)$$

$$X_2 = \frac{D_U - 4,0}{1,0} \quad (3.4)$$

$$X_3 = \frac{(-\Delta P) - 1,470}{0,295} \quad (3.5)$$

Para avaliar o efeito da diferença existente entre a utilização de hidrociclones filtrantes e convencionais foi adicionada uma variável qualitativa denominada filtração, codificada como X_4 . A essa variável foram atribuídos dois níveis possíveis, em que o nível superior (+ 1) indica que houve a substituição da seção cilíndrica, cônica ou ambas por seções permeáveis. Por sua vez, o nível inferior (– 1) indica que não houve essa substituição, ou seja, se refere aos

hidrociclones com paredes completamente maciças, denominados convencionais. Dessa forma, foram avaliados, através de regressões múltiplas, quatro planejamentos experimentais mistos com 3 e 2 níveis através da combinação dos planejamentos experimentais para os hidrociclones filtrantes e convencionais com a mesma configuração geométrica. Assim, a correspondência dos fatores com as suas formas codificadas está explicitada na Tabela 3.4-2.

Tabela 3.4-2 – Correspondência entre os fatores e as suas formas codificadas.

Variável Original		C_{VA} (%v.)	D_U (mm)	$-AP$ (bar)	Filtração
Variável codificada		X_1	X_2	X_3	X_4
	Inferior (– 1)	1,0	3,0	1,18	Hidrociclone convencional
Níveis	Central (0)	5,5	4,0	1,47	–
	Superior (+ 1)	10,0	5,0	1,77	Hidrociclone com cilindro e/ou cone filtrante

Fonte: A autora.

3.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia experimental empregada no estudo de caracterização de hidrociclones utilizados no desenvolvimento e aplicações desta tese foi realizada através de testes experimentais com os hidrociclones. Os experimentos seguiram uma cronologia específica de acordo com o planejamento experimental para cada um dos equipamentos estudados, em que são definidas as condições experimentais de concentração volumétrica de sólidos na alimentação, diâmetro de *underflow* e queda de pressão.

Primeiramente era realizada a preparação da suspensão de alimentação de acordo com a concentração volumétrica de sólidos na alimentação (C_{VA}) especificada no planejamento.

Em seguida, era definido o hidrociclone a ser utilizado, cada hidrociclone era montado com dimensões especificadas, de forma que o sistema de travas mecânicas promovia o encaixe entre as sessões cilíndrica e cônica do equipamento, mantendo selado todo o conjunto. Além disso, eram encaixados e rosqueados os dutos de alimentação e de *overflow*. Isto feito, era realizada a vedação com silicone acético para evitar quaisquer vazamentos e aguardadas 24 h para o processo de cura completa do selante. Então, era realizado o acoplamento do hidrociclone à unidade experimental.

O duto de *underflow* (D_U) era selecionado de acordo com o planejamento experimental, e essa peça era acoplada à extremidade inferior da sessão cônica do hidrociclone. Finalizada a montagem do equipamento, dava-se sequência à operação da unidade, variando-se a queda de pressão conforme o planejamento de experimentos.

O procedimento experimental era iniciado com o acionamento dos equipamentos de aferição de pressão e vazão. Consecutivamente, foram utilizados um manômetro digital e um medidor de vazão do tipo Coriolis. Em sequência, era iniciada a homogeneização da suspensão, realizada através de um agitador mecânico, que permanecia ligado durante todo o período de execução do experimento.

Para iniciar a operação de bombeamento, primeiro era realizada a escorva da bomba centrífuga, sendo que essa etapa se faz necessária a fim de evitar o fenômeno de cavitação. Esse procedimento era realizado através da completa abertura da válvula de saída de material do tanque, preenchendo-se a bomba com água. Então, abria-se a válvula da linha de *by-pass* e acionava-se a bomba, iniciando o experimento.

No primeiro estágio desse processo, há um direcionamento da suspensão apenas para o duto de *by-pass*, enquanto a válvula de alimentação permanecia completamente fechada. A quantidade de suspensão direcionada para a linha de alimentação do hidrociclone era controlada através do manuseio das válvulas globo e gaveta, pertencentes à linha de alimentação e *by-pass*, respectivamente. Essas eram manipuladas até que pressão de operação ($-AP$), verificada no visor do manômetro digital, fosse estabilizada de acordo com a linha do planejamento experimental que estava sendo executada.

Com a estabilização da queda de pressão, a vazão mássica de alimentação lida no *display* do sensor de vazão era anotada e eram retiradas três alíquotas para a determinação das vazões mássicas das correntes de *underflow* e filtrado. Com o auxílio de uma balança semianalítica e um cronômetro digital, as vazões eram determinadas através de técnicas gravimétricas.

Para a determinação da concentração de sólidos, eram retiradas três alíquotas de cada corrente (alimentação, *underflow* e *overflow*). Essas amostras eram coletadas, pesadas e levadas à estufa por 24 h à temperatura de 105°C. Após esse tempo, pesavam-se as amostras e registravam-se suas massas para os cálculos das concentrações.

Já para a determinação das distribuições granulométricas de alimentação e *underflow*, coletavam-se três amostras dessas correntes que eram levadas para análise granulométrica no equipamento de difração a raio laser Mastersizer Microplus da Malvern.

Para a configuração inicial do equipamento, era realizada a calibração do sistema óptico através da medida da solução “branco”, o que era necessário para a definição dos parâmetros iniciais. Essa solução era composta por água destilada contendo 1,0 g/L do dispersante hexametáfosfato de sódio (Calgon).

Após a etapa de calibração, transferia-se a amostra a ser analisada para um béquer contendo 500 mL de solução “branco”. Aplicava-se a essa suspensão um banho ultrassônico durante 30 s para realizar a dissociação de possíveis conglomerados de partículas contidos na amostra. A presença do dispersante garantia que as partículas se mantivessem dispersas na suspensão evitando a formação de novos conglomerados.

Na sequência, o sistema de aquisição e análise do equipamento fornecia as relações entre as frações volumétricas e os diâmetros de partículas aferidos. Esses dados eram tabulados e, por fim, eram realizados ajustes de modelos de distribuição granulométrica aos dados experimentais através de regressões não-lineares com o auxílio do *software* Statistica®.

3.6. CURVAS DE EFICIÊNCIA OU CARACTERIZAÇÃO DOS HIDROCICLONES

De posse das informações experimentais coletadas, foi realizado o levantamento de curvas de eficiência [$E_T = F(d'_{50}/d_{63,2})$] para os hidrociclones estudados. As curvas de eficiência de um hidrociclone são diagramas com informações sistematizadas capazes de nos proporcionar uma rápida estimativa da eficiência total do equipamento de acordo com as condições de operação nas quais o separador será submetido (concentração de sólidos, diâmetro de *underflow* e distribuição granulométrica do material particulado) (GONÇALVES, 2016).

O procedimento para a obtenção das curvas de eficiência está descrito no Apêndice B. A partir disso, um ajuste não-linear foi feito no *software* Statistica® conforme a Equação 3.6.

$$E_T = 1 - \exp \left[\frac{\left(\frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \right)^{P_2}}{P_1} \right] \quad (3.6)$$

As curvas foram ajustadas para cada valor de E_T . Além disso, para cada valor de $d_{63,2}/d'_{50}$, haverá um valor correspondente de eficiência total.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados experimentais obtidos para os hidrociclones cônico-filtrantes (HCoF-OT1 e HCoF-OT3) e cilíndrico-cônico-filtrantes (HCiCoF-OT1 e HCiCoF-OT3) de acordo com o procedimento experimental descrito no Capítulo 3. Foram obtidos resultados de capacidade de processamento, número de Euler, concentração volumétrica de sólidos do *underflow*, razão de líquido, eficiência total e diâmetro de corte. Os resultados experimentais para cada hidrociclone filtrante foram comparados com os resultados obtidos para o hidrociclone convencional (HCon) de mesma geometria, adotado como referência para as discussões.

Ainda, com o intuito de avaliar quantitativamente a influência dos fatores estudados em cada equipamento, foram realizadas análises de Regressões Múltiplas e Superfícies de Resposta a partir dos dados dos planejamentos experimentais. Essas análises foram realizadas com o auxílio do *software* Statistica®, em que foram considerados relevantes apenas os efeitos com nível de significância menor ou igual a 10 %.

Todas as informações a respeito dos resultados experimentais obtidos para os hidrociclones HCiCoF_{1a}, HCon_{1a}, HCoF_{1b}, HCon_{1b}, HCiCoF_{3a}, HCon_{3a}, HCoF_{3b} e HCon_{3b} podem ser encontradas no Apêndice A. Para os hidrociclones HCiF_{1c}, HCon_{1c}, HCiF_{3c} e HCon_{3c}, os dados experimentais obtidos por Ascendino (2019) estão no Anexo I.

4.1. ESTUDO DE DESEMPENHO DOS HIDROCICLONES PERTENCENTES AO CASO 1A (MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA TOTAL PARA HIDROCICLONES HCiCoF)

Nesta seção serão apresentados e comparados os resultados experimentais para o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante (HCiCoF_{1a}) e o hidrociclone convencional de mesma geometria (HCon_{1a}), provenientes do primeiro caso de otimização, ou seja, a maximização da eficiência total. Para tanto, serão analisadas e comparadas as seguintes respostas: vazão de

alimentação, número de Euler, razão de líquido, concentração de sólidos do *underflow*, eficiência total e diâmetro de corte.

4.1.1. VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO E NÚMERO DE EULER

A vazão de alimentação e o número de Euler são muito relevantes em um processo de hidrociclonagem, pois estão intrinsecamente relacionados à capacidade de processamento e consumo energético do separador. Dessa forma, para uma mesma queda de pressão usada em um experimento, o equipamento que apresenta uma maior vazão de alimentação é capaz de processar uma quantidade maior de suspensão com um consumo energético menor.

Primeiramente, serão apresentados os valores obtidos experimentalmente para a vazão de alimentação para o hidrociclone HCon_{1a} e para o hidrociclone de mesma geometria na modalidade convencional, HCiCoF_{1a}. Nas Figuras 4.1-1, 4.1-2 e 4.1-3 apresentam-se os resultados de vazão de alimentação obtidos para os diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm, respectivamente, com a alteração da concentração de sólidos da alimentação de 1,0 % a 10,0 %v. e queda de pressão de 1,18 a 1,77 bar, conforme as condições descritas no planejamento.

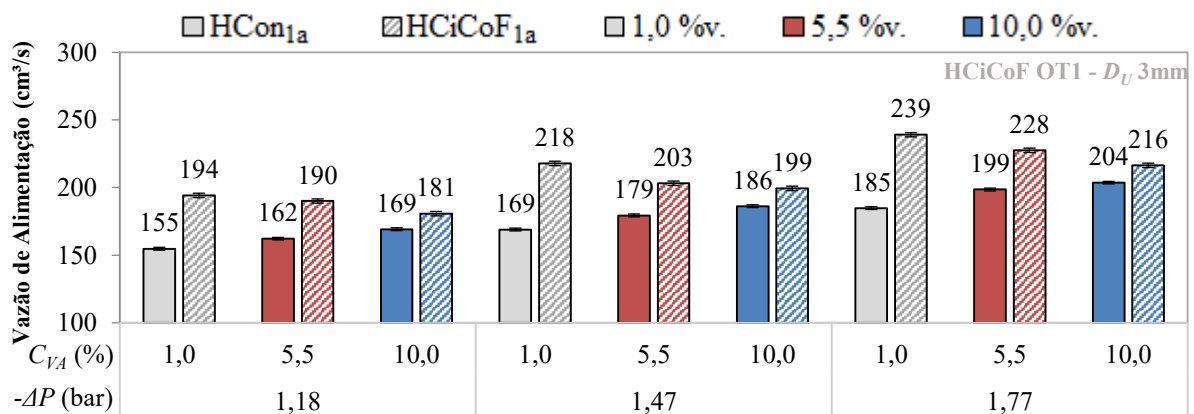


Figura 4.1-1 – Vazão de alimentação para hidrociclones HCon_{1a} e HCiCoF_{1a} com $D_U = 3$ mm.

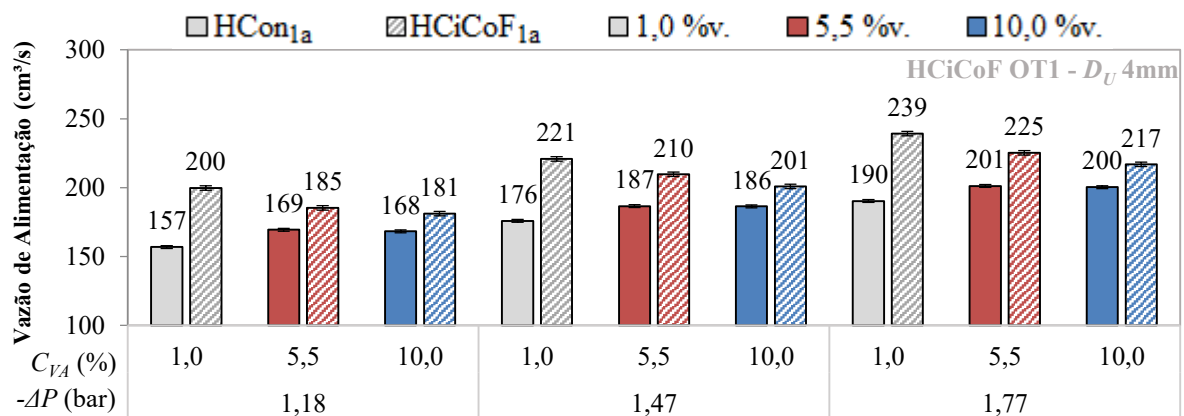


Figura 4.1-2 – Vazão de alimentação para hidrociclones HCon_{1a} e HClCoF_{1a} com $D_U = 4$ mm.

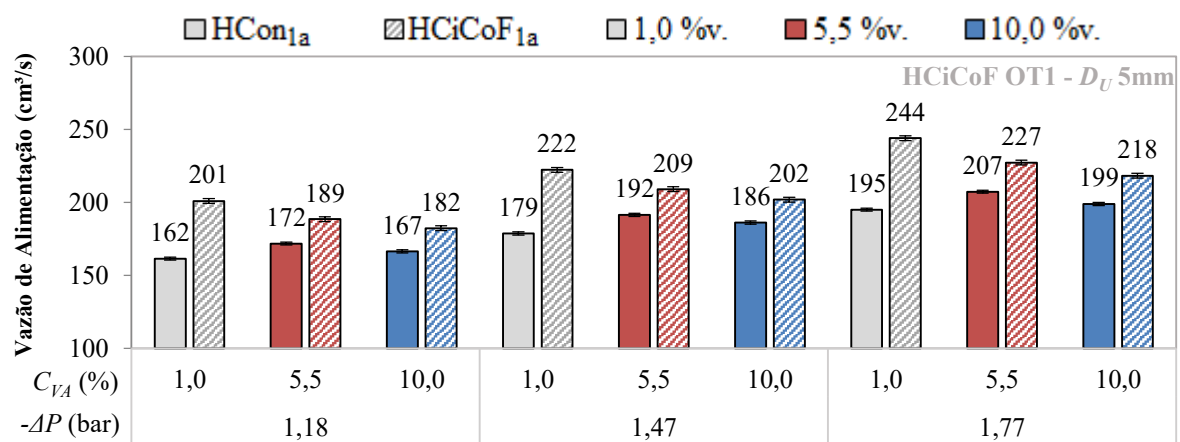


Figura 4.1-3 – Vazão de alimentação para hidrociclones HCon_{1a} e HClCoF_{1a} com $D_U = 5$ mm.

Conforme pode ser observado nas Figuras 4.1-1, 4.1-2 e 4.1-3, a vazão de alimentação para o hidrociclone HClCoF_{1a} foi sempre maior que a dos hidrociclones convencionais, operando nas mesmas condições, para todas as condições experimentais estudadas. O resultado variou de 154,7 a 207,4 cm³/s para o hidrociclone convencional e de 180,6 a 244,1 cm³/s para o equipamento filtrante, sendo observado um aumento de 15,4 %, em média, na vazão de alimentação para o hidrociclone HClCoF_{1a}, valor semelhante ao relatado por Salvador (2017) para as geometrias estudadas em seu PCC.

Nas condições experimentais estudadas, a vazão de alimentação atingiu seu valor máximo para os hidrociclones filtrantes operando com diâmetro de *underflow* de 5 mm, nas condições de queda de pressão e concentração de sólidos na alimentação de 1,77 bar e 1,0 % em volume, respectivamente. Assim como esperado, o aumento da concentração de sólidos leva à redução da velocidade tangencial, comportamento que prejudica a vazão de alimentação (DAVAILLES *et al.*, 2012). Por outro lado, o aumento do diâmetro de *underflow* possibilita o

aumento da vazão de suspensão processada, pois ocasiona a redução da resistência ao escoamento. Também foi possível observar o aumento em Q conforme a queda de pressão era elevada.

Devido ao aumento da capacidade observado para HCiCoF_{1a} em relação a HCon_{1a} , espera-se que isso se reflita no número de Euler, resposta que está diretamente relacionada aos custos de bombeamento em uma unidade de hidrociclonagem. Os resultados do número de Euler obtidos para os equipamentos filtrante (HCiCoF_{1a}) e convencional (HCon_{1a}) com a alteração do percentual de sólidos na alimentação (1,0 % a 10,0 %v.) e queda de pressão (1,18 a 1,77 bar), são apresentados nas Figuras 4.1-4, 4.1-5 e 4.1-6, para os diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm, respectivamente.

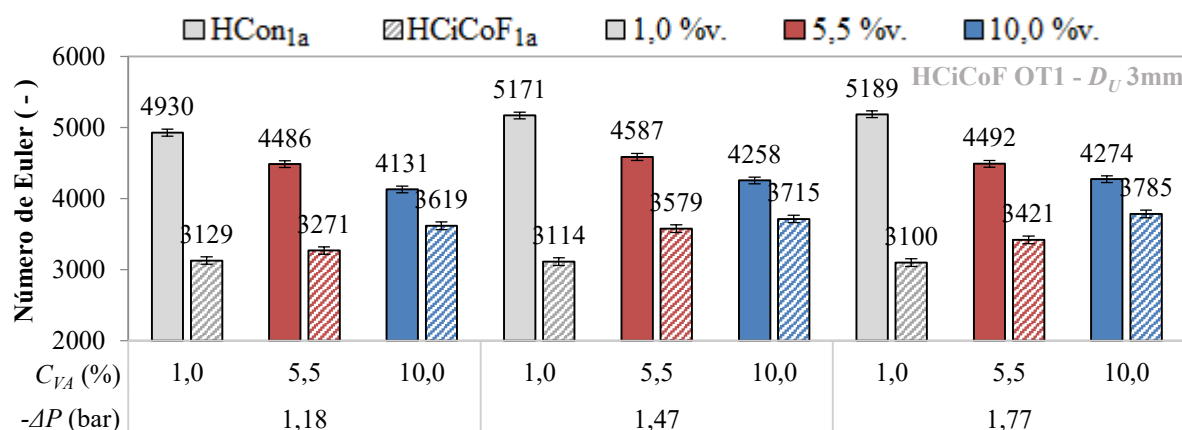


Figura 4.1-4 – Número de Euler para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 3$ mm.

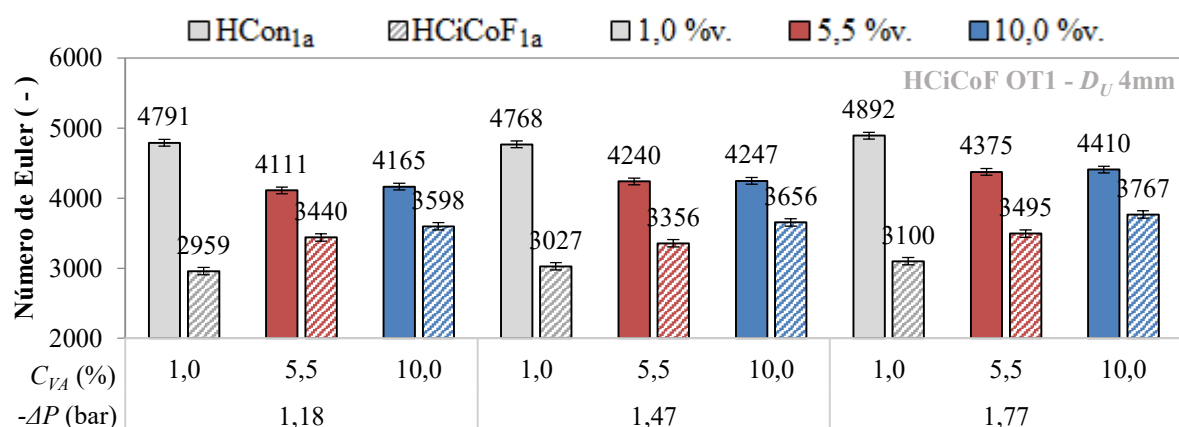


Figura 4.1-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 4$ mm.

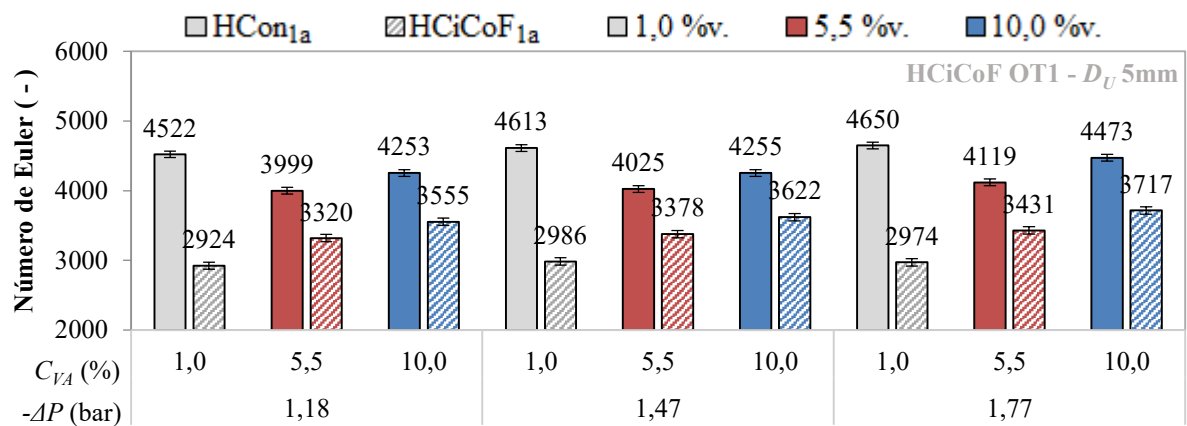


Figura 4.1-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 5$ mm.

Conforme esperado, houve a redução dos valores de número de Euler do equipamento filtrante em relação ao similar convencional (HCon_{1a}) para todas as condições do planejamento experimental proposto. A adição da parede filtrante foi capaz de reduzir, em média, 24 % do número de Euler nas condições experimentais estudadas. O número de Euler variou entre 2924 e 3785 para HCiCoF_{1a} e entre 3999 e 5188 para o hidrociclone convencional de mesma geometria.

O resultado encontrado condiz com estudos anteriores em hidrociclones filtrantes (SOUZA *et al.*, 2000; VIEIRA *et al.*, 2007). A incorporação da parede porosa é responsável pela redução do movimento rotacional do fluido, principalmente na região do vórtice externo, visto que os poros da parede permeável proporcionam uma saída adicional para o fluido. Dessa forma, a retirada de filtrado pelas paredes cilíndrica e cônica filtrantes promove uma redução nas perdas de carga do sistema e, consequentemente, no número de Euler do equipamento filtrante em relação ao convencional.

Para o hidrociclone convencional operando com D_U de 3 mm foi observada uma redução no número de Euler com o aumento da concentração de sólidos da alimentação. Em contrapartida, operando com diâmetros de *underflow* de 4 e 5 mm, foi observada uma redução de Eu ao elevar C_{VA} de 1,0 % para 5,5 %v., seguido de um ligeiro aumento em Eu ao alterar C_{VA} para 10,0 %v.

Analogamente, Kuang *et al.* (2012) observaram que com o aumento de C_{VA} , a queda de pressão inicialmente diminui (correspondendo à diminuição do número de Euler) e, em seguida, aumenta ligeiramente (correspondendo ao aumento do número de Euler), nas condições consideradas pelo autor (1,04 % a 24,45 % em volume de sólidos).

Acredita-se que ao aumentar a concentração de sólidos na alimentação, inicialmente (C_{VA} de 1,0 % para 5,5 %v.) a interação entre as partículas pode resultar em uma redução da velocidade tangencial. Devido a isso, é observada uma redução das perdas de carga do sistema e consequentemente do número de Euler (DAVAILLES *et al.*, 2012). No entanto, ao aumentar mais a concentração (C_{VA} de 5,5 % para 10,0 %v.), aumenta-se a interação entre as partículas, o que pode se tornar um dos principais fatores que contribuem para a fluidodinâmica. Ou seja, a presença de uma quantidade elevada de partículas afeta o escoamento do fluido que por sua vez, afeta o escoamento das partículas, resultando em um aumento da perda de carga (KUMAR *et al.* 2021).

Para o hidrociclone filtrante (HCiCoF_{1a}), foi observado o aumento do número de Euler com o aumento da concentração de sólidos no sistema em todas as condições experimentais estudadas. Também foram observadas tendências diferentes para o número de Euler do equipamento filtrante de acordo com alterações nas demais variáveis estudadas. A fim de quantificar a influência das variáveis C_{VA} , D_U e $-\Delta P$ em relação à vazão de alimentação e número de Euler no hidrociclone HCiCoF_{1a} foi realizada uma regressão múltipla dos dados do planejamento experimental. O efeito das variáveis pode ser observado na Tabela 4.1-1.

Tabela 4.1-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCiCoF_{1a}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	209,0	0,33	0,0000	3370,9	10,34	0,0000
X_1 (Linear)	-20,1	0,84	0,0000	635,6	26,14	0,0000
X_1 (Quadrático)	-2,2	0,68	0,0033	54,9	21,22	0,0165
X_2 (Linear)	3,0	0,84	0,0016	-91,9	26,14	0,0019
X_3 (Linear)	39,0	0,84	0,0000	108,4	26,14	0,0004
$X_1 X_3$ (Cruzado)	-3,3	1,03	0,0041	56,0	32,02	0,0938
R^2	0,99			0,96		

É evidenciado na Tabela 4.1-1 que as variáveis que mais afetaram a vazão de alimentação foram a queda de pressão (X_3), seguido pela concentração de sólidos na alimentação (X_1) e diâmetro de *underflow* (X_2), nesta ordem. Acréscimos na queda de pressão atuam simultaneamente no aumento da vazão de alimentação e número de Euler devido ao aumento da perda de carga do sistema. Em relação às demais variáveis, houve um

comportamento com coeficientes de sinais opostos para o número de Euler, conforme esperado. A variável que mais afetou o adimensional foi a concentração de sólidos na alimentação (X_1), seguido da queda de pressão (X_3) e diâmetro de *underflow* (X_2), nesta ordem. Os efeitos apresentados podem ser observados nas superfícies de resposta para vazão de alimentação e número de Euler da Figura 4.1-7.

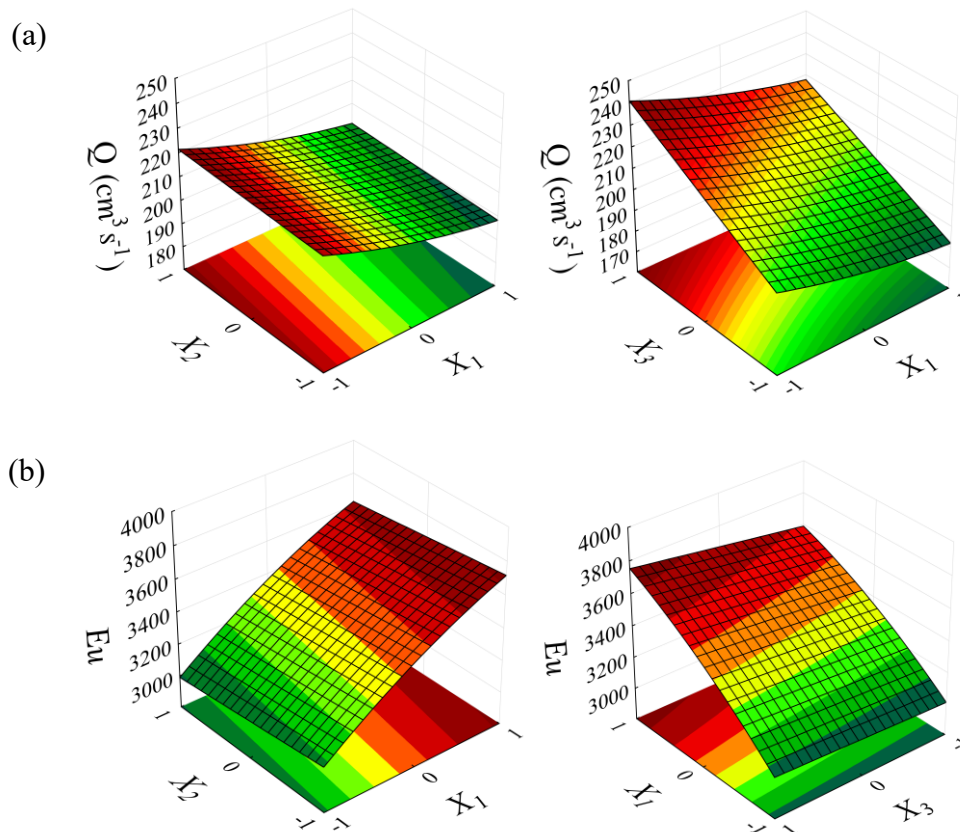


Figura 4.1-7 – Superfícies de Resposta para (a) vazão de alimentação (Q) e (b) número de Euler (Eu) para o hidrociclone HClCoF_{1a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A partir da análise das superfícies de resposta da Figura 4.1-7, constata-se que as condições que diminuem o consumo energético para os equipamentos com a geometria HClCoF_{1a} são encontradas ao reduzir X_1 e X_3 e aumentar a variável X_2 . O aumento da capacidade de operação foi observado para menores níveis de X_1 e maiores níveis de X_3 e X_2 .

Ainda, de acordo com os dados experimentais, foram observadas alterações no comportamento para vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone filtrante em relação ao convencional. A fim de quantificar os efeitos relacionados à adição da filtração, foi realizada a análise de um planejamento combinado com os dados dos equipamentos HClCoF_{1a}

e HCon_{1a}, na forma de um planejamento misto a 2 e 3 níveis. Os resultados dessa análise podem ser observados na Tabela 4.1-2.

Tabela 4.1-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones H₁CoF_{1a} e HCon_{1a}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	195,31	0,424	0,0000	3916,07	16,784	0,0000
X_I (Linear)	-4,55	1,071	0,0001	–	–	–
X_I (Quadrático)	1,85	0,869	0,0381	-116,25	34,437	0,0014
X_2 (Linear)	4,28	1,071	0,0002	-188,98	42,418	0,0000
X_3 (Linear)	36,29	1,071	0,0000	130,61	42,418	0,0034
X_4 (Linear)	27,24	0,844	0,0000	-1077,58	33,418	0,0000
$X_I X_2$ (Cruzado)	-3,77	1,311	0,0060	174,34	51,951	0,0015
$X_I X_4$ (Cruzado)	-15,52	1,071	0,0000	600,78	42,418	0,0000
$X_3 X_4$ (Cruzado)	3,03	1,071	0,0067	100,96	42,418	0,0212
R^2	0,98			0,96		

O sinais opostos dos efeitos da variável X_4 reforçam que as condições que favorecem o aumento da capacidade de processamento também reduzem o consumo energético do hidrociclone. Com isso, é possível observar a significativa influência que a filtração (X_4) exerce na vazão de alimentação e no número de Euler dos hidrociclones. Esses resultados concordam com as análises realizadas em estudos prévios (VIEIRA, 2006; SALVADOR, 2017; ASCENDINO, 2019), nas quais foram relatadas a redução significativa do número de Euler para os hidrociclones filtrantes frente aos convencionais.

Além disso, nota-se um efeito combinado considerável entre a concentração da alimentação (C_{VA} ou X_I) e a filtração (X_4), nas respostas abordadas. Para tanto, a capacidade de processamento dos hidrociclones filtrantes reduziu à medida que se aumentou a concentração de sólidos de alimentação (sinal negativo), já o hidrociclone convencional demonstrou o comportamento oposto, ampliando Q à medida que C_{VA} era aumentada. Vale ressaltar que, para todas as situações estudadas, o hidrociclone H₁CoF_{1a} apresentou maior capacidade de processamento que o convencional (HCon_{1a}).

Os resultados apresentados nesta seção indicam o hidrociclone filtrante, HCiCoF_{1a}, como uma promissora opção para o uso industrial. Por apresentar redução significativa do consumo energético em relação ao convencional, HCon_{1a}, esse equipamento destaca-se inclusive no processamento de suspensões concentradas. Provavelmente, a nova saída produzida pela corrente de filtrado do hidrociclone HCiCoF_{1a} pode ter provocado uma redução nas perdas de carga do sistema (VIEIRA *et al.*, 2007).

Na Figura 4.1-8 apresentam-se os valores para a vazão de filtrado (Q_F) para o hidrociclone HCiCoF_{1a} nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental, concentração de sólidos na alimentação (C_{VA}) de 1,0 % a 10,0 %v., queda de pressão ($-ΔP$) de 1,18 a 1,77 bar e diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm, respectivamente.

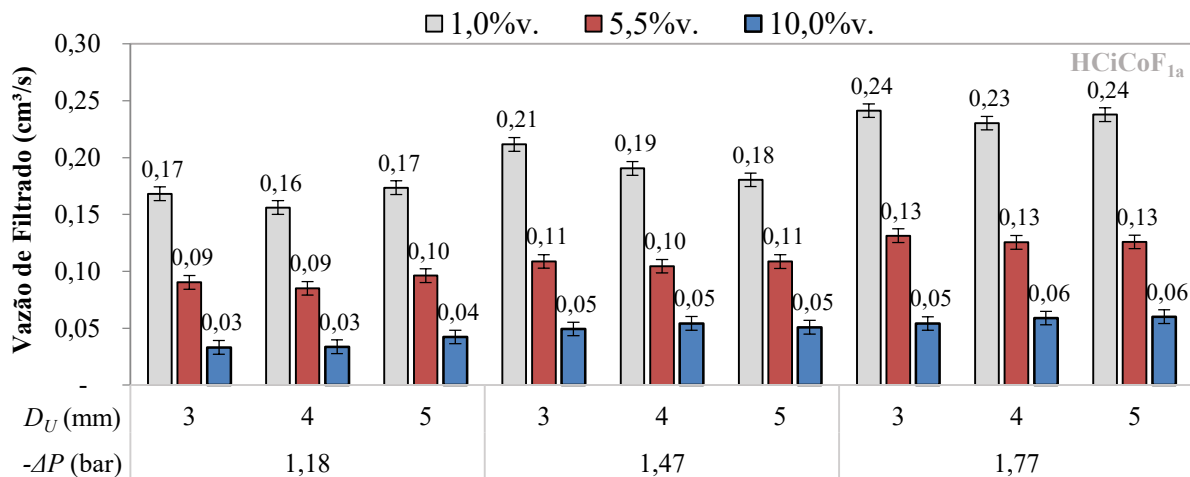


Figura 4.1-8 – Vazão de filtrado para o hidrociclone HCiCoF_{1a}.

Conforme pode ser observado, houve uma variação de 0,03 a 0,24 cm³/s para a vazão de filtrado do equipamento HCiCoF_{1a}. Esses valores indicam que a corrente de filtrado representou, no máximo, 0,10 % da vazão alimentada ao hidrociclone. Mesmo apresentando um valor baixo, a corrente líquida decorrente da filtração nas seções cilíndrica e cônica do equipamento foi responsável pela modificação do comportamento das respostas dos hidrociclones filtrantes em relação aos convencionais. Esse comportamento também foi averiguado em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa (VIEIRA, 2006; FAÇANHA, 2012; SALVADOR, 2013; SALVADOR, 2018; ASCENDINO, 2019).

Além disso, de acordo com os dados da Figura 4.1-8 pode-se notar que a vazão de filtrado respondeu diretamente às variações da vazão de suspensão alimentada (Q) no equipamento, apresentadas nas Figuras 4.1-1, 4.1-2 e 4.1-3. O aumento da concentração de

sólidos na alimentação foi responsável pela redução da intensidade do campo centrífugo e consequentemente, pela redução da vazão de filtrado. A presença de uma quantidade elevada de partículas no fluido afeta o escoamento do fluido, por sua vez o escoamento das partículas é afetado pela interação partícula-partícula, resultando em uma redução da intensidade do campo centrífugo (DAVAILLES *et al.*, 2012; KUMAR *et al.* 2021).

4.1.2. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DO *UNDERFLOW* E RAZÃO DE LÍQUIDO

A concentração de sólidos do *underflow* (C_{VU}) e a razão de líquido (R_L) estão intrinsecamente relacionadas ao poder de espessamento ou concentração em hidrociclones. Nas Figuras 4.1-9, 4.1-10 e 4.1-11 apresentam-se os dados experimentais para C_{VU} obtidos para os hidrociclones HCon_{1a} e HCiCoF_{1a} segundo o planejamento experimental, para os diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm, respectivamente.

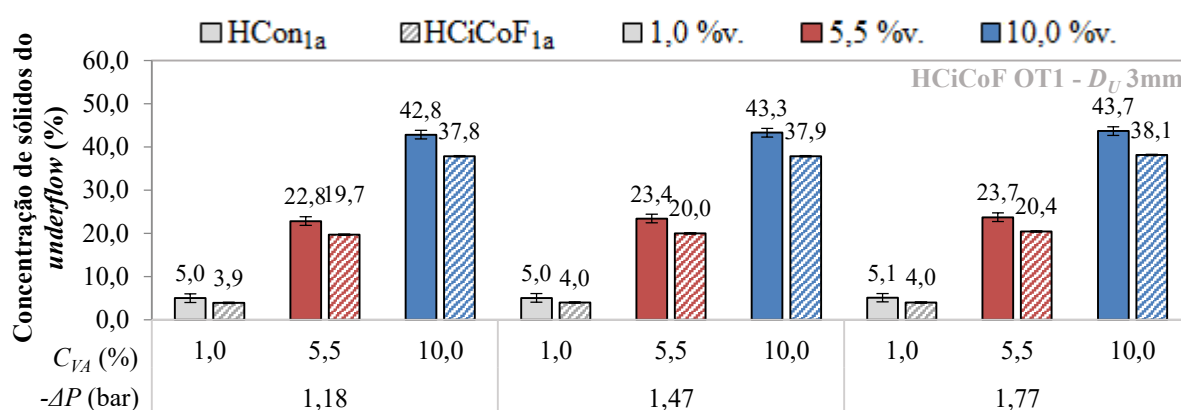


Figura 4.1-9 – Concentração volumétrica de sólidos do *underflow* para os hidrociclones HCon_{1a} e HCiCoF_{1a} com $D_U = 3$ mm.

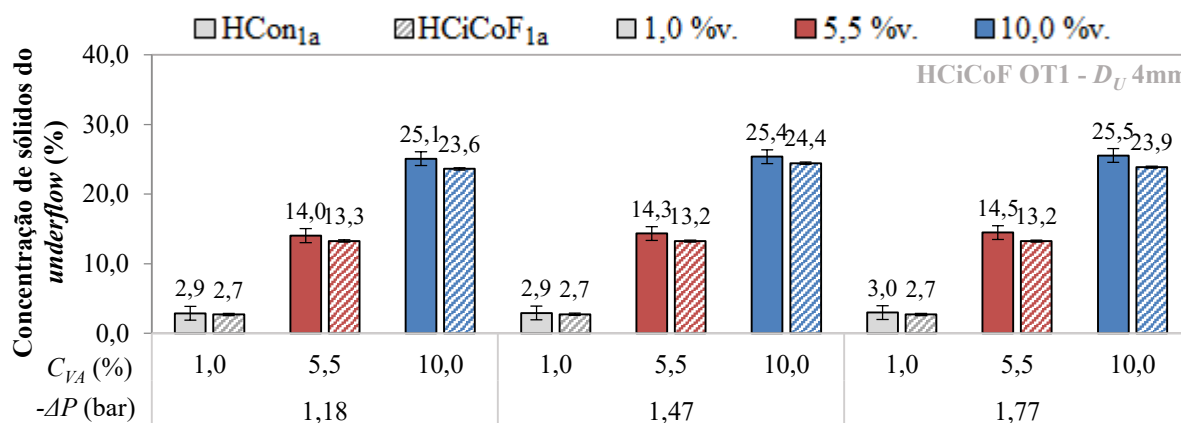


Figura 4.1-10 – Concentração volumétrica de sólidos do *underflow* para os hidrociclones HCon_{1a} e HCiCoF_{1a} com $D_U = 4$ mm.

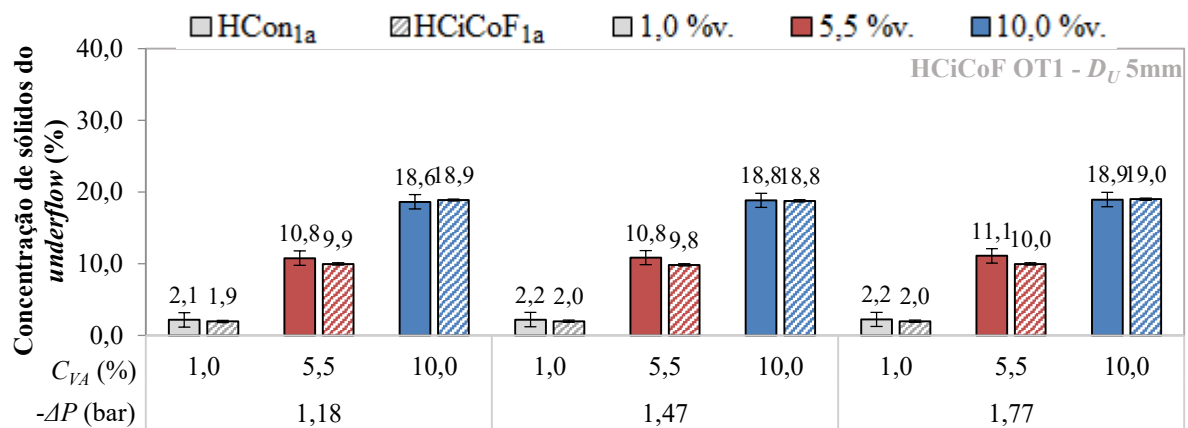


Figura 4.1-11 – Concentração volumétrica de sólidos do *underflow* para os hidrociclones HCon_{1a} e HCiCoF_{1a} com $D_U = 5$ mm.

De acordo com os resultados experimentais, os hidrociclones estudados proporcionaram uma ampla faixa de valores para C_{VU} , que variou de 1,94 % a 38,12 % para o hidrociclone HCiCoF_{1a} e de 2,15 % a 43,68 % para o hidrociclone HCon_{1a}. Foram observados decréscimos médios na concentração do *underflow* de 9,7 % para HCiCoF_{1a} em relação a HCon_{1a}. A concentração de sólidos no *underflow* dos hidrociclones filtrantes foi minorada em 16,0 % relação aos hidrociclones convencionais de mesma geometria para o menor nível de diâmetro de *underflow*. No entanto, notou-se que as diferenças entre C_{VU} dos equipamentos filtrantes e convencionais foram menos pronunciadas ao operar com maiores diâmetros de *underflow*. Assim, foi observado que os dispositivos convencional e filtrante não apresentaram diferenças significativas ao operar com D_U de 4 e 5 mm.

Além disso, pode-se observar que a porcentagem de sólidos no *underflow* foi majorada para todos os equipamentos pela redução de D_U , pois C_{VU} aumenta à medida que o diâmetro de *underflow* diminui. Isso acontece porque quanto menor D_U , maior é a resistência ao escoamento, então a quantidade de líquido direcionada para essa corrente torna-se menor (SILVA *et al.* 2014). Em relação à C_{VA} , constata-se que o aumento do percentual de sólidos na suspensão de alimentação aumenta a concentração destes na corrente de *underflow* (DAVAILLES *et al.*, 2012; GONÇALVES, 2019).

Para a concentração de alimentação de 10 %v. é possível observar que aumentando D_U em 1 mm, de 3 para 4 mm, a concentração volumétrica de sólidos do *underflow* (C_{VU}) diminui, na ordem de 38,1 % a 23,9 % para o equipamento filtrante e de 43,7 % a 25,5 % para o convencional. Isso representa uma redução de cerca de 37 % e 42 %, respectivamente, na concentração de sólidos descarregados na corrente de *underflow* com o aumento de 1 mm em D_U . Já ao aumentar D_U de 4 para 5 mm, a diferença de concentração foi menos expressiva,

aproximadamente 23 %, em média, para ambas as modalidades de separadores. Dessa forma, é evidente que a opção pelo menor diâmetro de *underflow* (3 mm) é responsável pelo aumento do poder de concentração dos hidrociclones.

Esperava-se que as mudanças observadas em C_{VU} refletissem variações na razão de líquido para os hidrociclones filtrantes. Nas Figuras 4.1-12, 4.1-13 e 4.1-14 estão relacionados os dados experimentais para razão de líquido obtidos para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} dotados de diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm, respectivamente, de acordo com as condições operacionais do planejamento experimental. Nas condições estudadas, as razões de líquido variaram entre 8,4 % e 41,0 % para os hidrociclones convencionais (HCon_{1a}) e entre 9,5 % e 43,6 % para a modalidade filtrante.

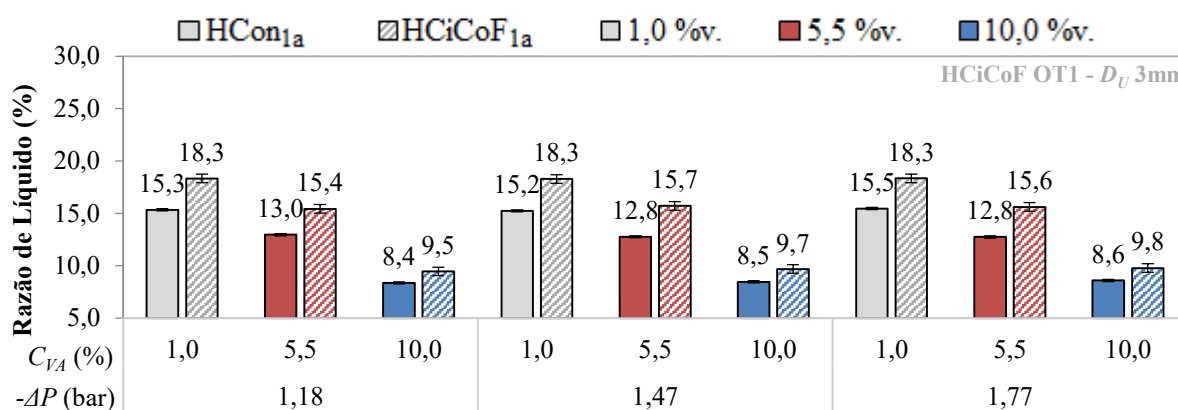


Figura 4.1-12 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 3$ mm.

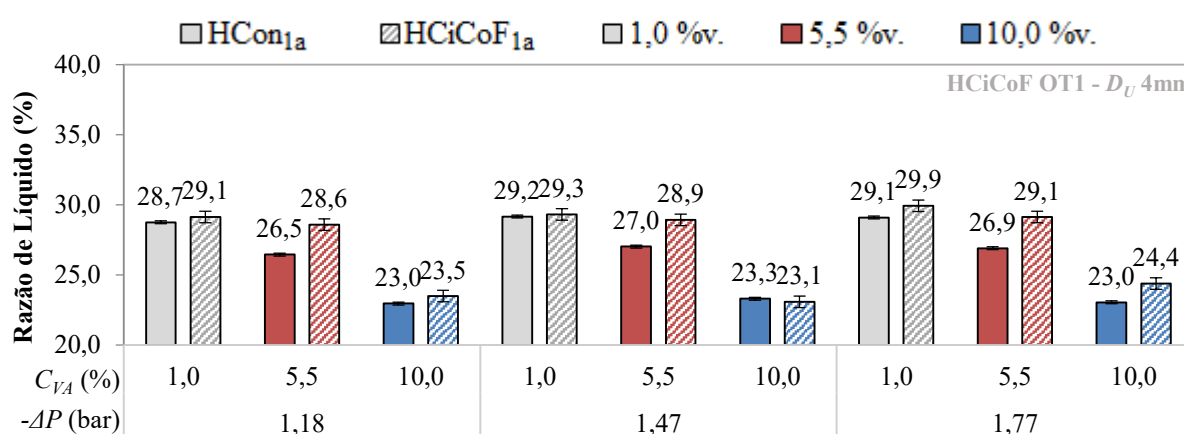


Figura 4.1-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 4$ mm.

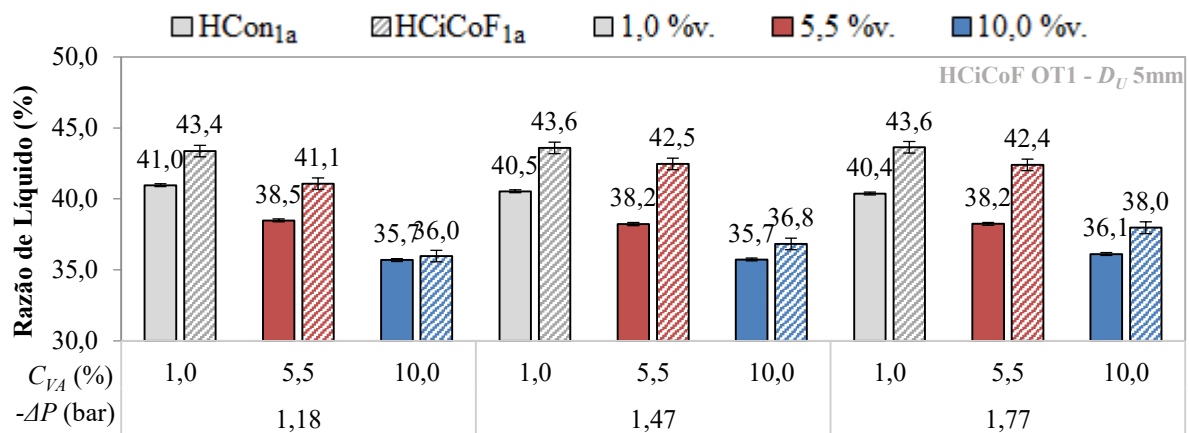


Figura 4.1-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HClCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 5$ mm.

Fazendo uso dos dados experimentais apresentados nas Figuras 4.1-12, 4.1-13 e 4.1-14 foi possível observar que a filtração também influenciou a razão de líquido. A associação da hidrociclonação com esta operação unitária acarretou o aumento da razão de líquido, refletindo o comportamento apresentado pela concentração de sólidos da corrente de *underflow*. Para o hidrociclone filtrante (HClCoF_{1a}), foram observados acréscimos médios em suas razões de líquido na ordem de 9,6 %, em relação ao convencional.

Acredita-se que a presença de meios filtrantes nas seções cilíndrica e cônica, assim como o aumento na capacidade de alimentação dos hidrociclones filtrantes, pode ter alterado a fluidodinâmica no interior do equipamento. Com isso, a relação entre as componentes de velocidade do fluido (axial, radial e tangencial) pode ter sido modificada de forma a direcionar uma maior quantia de fluido do vórtice interno para o externo, o que levaria ao aumento da parcela de líquido descarregada na corrente de *underflow* (SALVADOR, 2013; SALVADOR, 2016).

A fim de averiguar e quantificar os efeitos observados para C_{VU} e R_L do hidrociclone filtrante em relação às variáveis C_{VA} , D_U , $-\Delta P$ foram realizadas regressões múltiplas para os dados do planejamento experimental de HClCoF_{1a}. Na Tabela 4.1-4 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido.

Tabela 4.1-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido do hidrociclone HClCoF_{1a}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%v.)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	14,74	0,172	0,0000	27,54	0,102	0,0000
X_1 (Linear)	24,06	0,435	0,0000	-7,03	0,258	0,0000
X_1 (Quadrático)	–	–	–	1,84	0,211	0,0000
X_2 (Linear)	-10,40	0,435	0,0000	26,30	0,258	0,0000
X_2 (Quadrático)	-2,11	0,353	0,0000	-0,38	0,211	0,0839
X_3 (Linear)	–	–	–	0,70	0,258	0,0122
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-8,54	0,533	0,0000	1,04	0,316	0,0034
R^2	0,99			0,99		

A partir da Tabela 4.1-4 nota-se que a concentração volumétrica de sólidos na alimentação (X_1) foi a variável que mais influenciou em C_{VU} . Em seguida, o diâmetro de *underflow* (X_2) também exerceu efeitos significativos, em que o coeficiente negativo indica uma relação inversamente proporcional entre esta variável e a concentração volumétrica de sólidos do *underflow*. Para a razão de líquido foram observados efeitos significados das variáveis D_U (X_2), C_{VA} (X_1) e $-\Delta P$ (X_3), nesta ordem de relevância.

Também houve um efeito combinado considerável entre a concentração da alimentação e o diâmetro de *underflow* nestas respostas (par X_1 - X_2). Os efeitos citados podem ser melhor observados nas superfícies de resposta para C_{VU} e R_L na Figura 4.1-15. De acordo com as superfícies de resposta, quanto maior a concentração de sólidos na alimentação (C_{VA}) e menor o diâmetro de *underflow* (D_U), maior é a concentração de sólidos do *underflow* (C_{VU}).

De acordo com as superfícies de resposta, Figura 4.1-15, observa-se que para suspensões concentradas ($X_1 = +1$) há um aumento acentuado de C_{VU} com a redução do diâmetro de *underflow*. Esse efeito está relacionado ao fato de que ao aumentar a concentração da alimentação, aumenta-se consideravelmente a concentração de partículas localizadas na seção cônica (DAVAILLES *et al.*, 2012). Com a redução de D_U são impostas restrições ao escoamento, reduzindo em maior escala a quantidade de líquido descarregada no *underflow*.

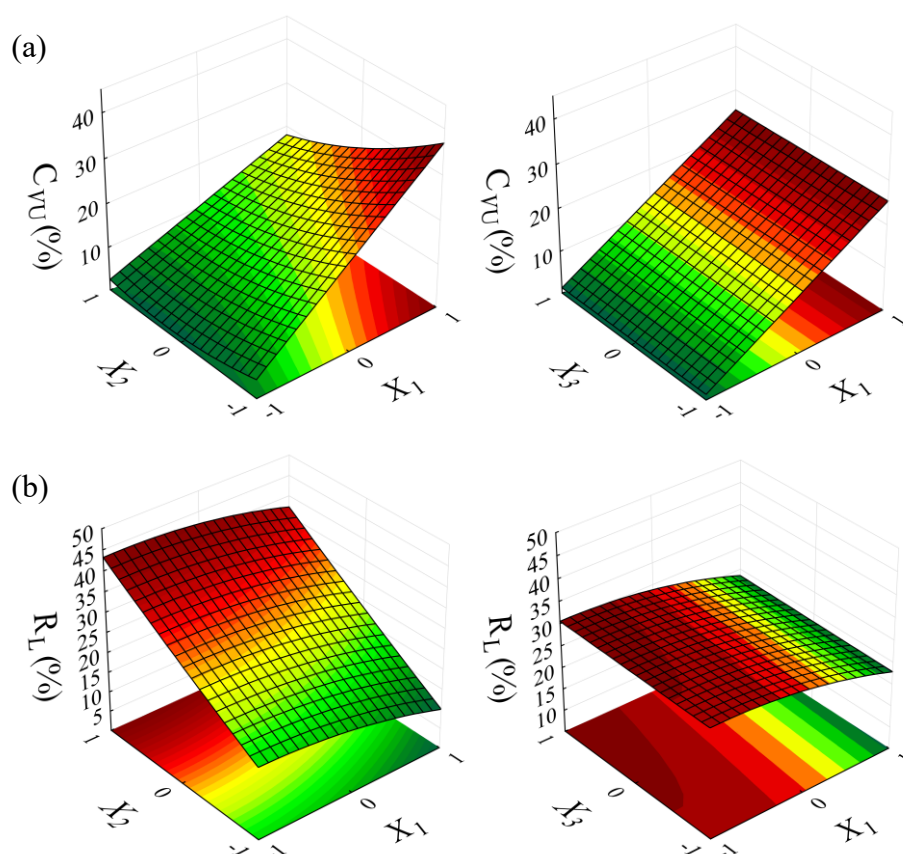


Figura 4.1-15 – Superfícies de Resposta para (a) Concentração do *underflow* (C_{VU}) e (b) razão de líquido (R_L) para o hidrociclone HClCoF_{1a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A fim de averiguar e quantificar os efeitos observados para C_{VU} e R_L em relação à substituição das paredes da seção cilíndrica e cônica por matrizes porosas, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais de HClCoF_{1a} e HCon_{1a} na forma de um planejamento misto a 2 e 3 níveis. Na Tabela 4.1-4 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido.

Tabela 4.1-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido dos hidrociclones HClCoF_{1a} e HCon_{1a}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%v.)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	15,49	0,144	0,0000	26,59	0,086	0,0000
X_I (Linear)	24,90	0,363	0,0000	-6,41	0,216	0,0000
X_I (Quadrático)	–	–	–	1,24	0,176	0,0000
X_2 (Linear)	-11,82	0,363	0,0000	26,16	0,216	0,0000
X_2 (Quadrático)	-2,57	0,295	0,0000	0,40	0,176	0,0270
X_4 (Linear)	-1,46	0,286	0,0000	1,92	0,170	0,0000
$X_I X_2$ (Cruzado)	-9,68	0,445	0,0000	1,01	0,264	0,0004
$X_I X_4$ (Cruzado)	-0,85	0,363	0,0237	-0,57	0,216	0,0114
$X_2 X_4$ (Cruzado)	1,42	0,363	0,0003	–	–	–
R^2	0,99			0,99		

De acordo com a Tabela 4.1-4 nota-se que a filtração (X_4) afetou significativamente a concentração de sólidos do *underflow* e a razão de líquido dos hidrociclones, assim como os seus efeitos combinados entre C_{VA} e D_U , indicado pelos pares X_I - X_4 e X_2 - X_4 , respectivamente.

A interação entre os efeitos dos pares X_I - X_4 e X_2 - X_4 indicam que C_{VU} é majorada para o equipamento convencional ($X_4 = -1$) nas condições de maior C_{VA} ($X_I = +1$) e menor D_U ($X_2 = -1$). Porém, ao operar com baixas C_{VA} ($X_I = -1$), e níveis mais altos de X_4 ($D_U = 4$ e 5 mm) não foram observadas diferenças significativas entre C_{VU} dos equipamentos convencional e filtrante de geometria HClCoF-OT1.

Com isso, analisando apenas a concentração de sólidos no *underflow* e razão de líquido, observa-se que o hidrociclone convencional apresenta uma alternativa mais interessante no processamento de soluções concentradas. Já no caso do processamento de soluções diluídas, ou adotando diâmetros de *underflow* de 4 ou 5 mm, empregar o hidrociclone filtrante pode ser uma opção mais vantajosa. Isto porque, além de alcançar o mesmo patamar de C_{VU} que o equipamento convencional, o HClCoF_{1a} operou com menor consumo energético (menor número de Euler), conforme evidenciado na seção anterior.

4.1.3. EFICIÊNCIA TOTAL E DIÂMETRO DE CORTE

Como indicadores da capacidade de separação centrífuga, as análises da eficiência total de separação e do diâmetro de corte são fundamentais na avaliação de desempenho de hidrociclones. Nas Figuras 4.1-16, 4.1-17 e 4.1-18 apresentam-se os dados experimentais para a eficiência total de separação obtidos para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm, nesta sequência. Também foram variadas a concentração de sólidos na alimentação (C_{VA}) de 1,0 %v. a 10,0 %v. e a queda de pressão ($-\Delta P$) de 1,18 a 1,77 bar, conforme descrito pelo planejamento experimental.

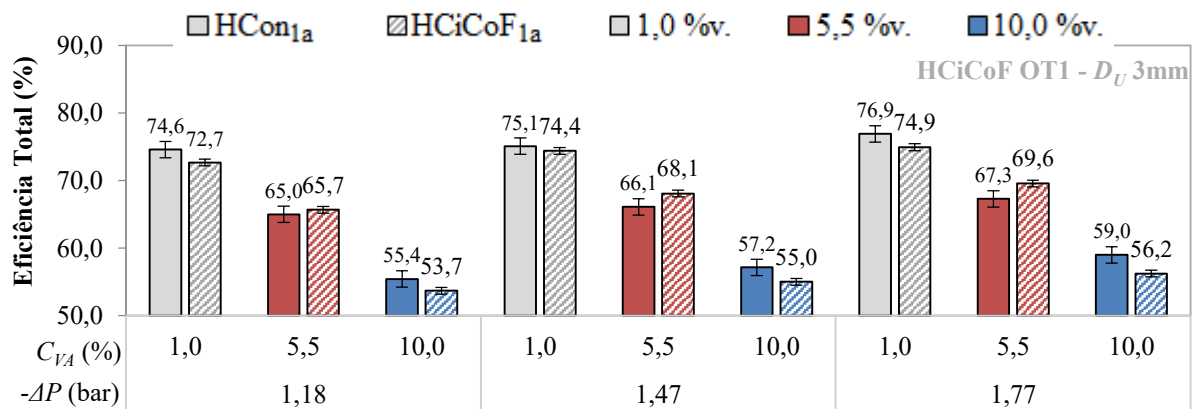


Figura 4.1-16 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 3$ mm.

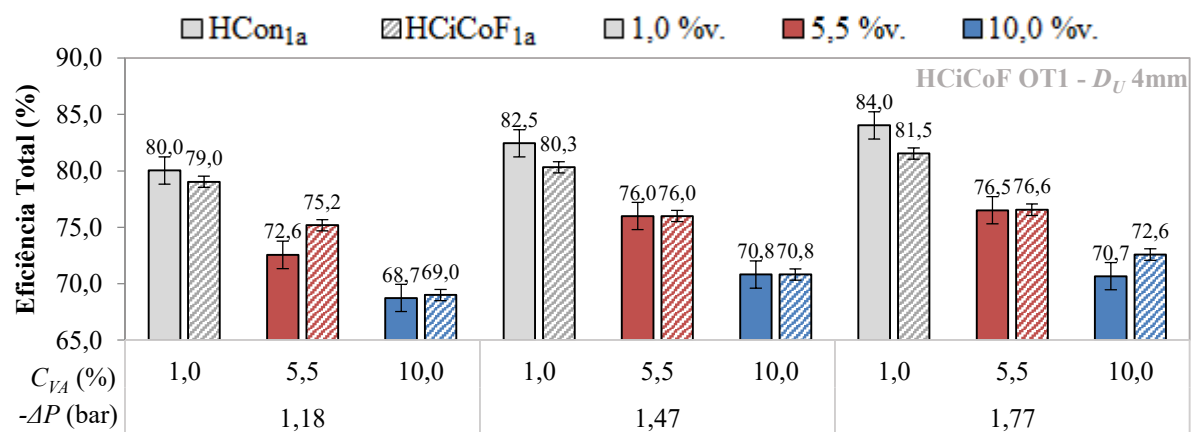


Figura 4.1-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 4$ mm.

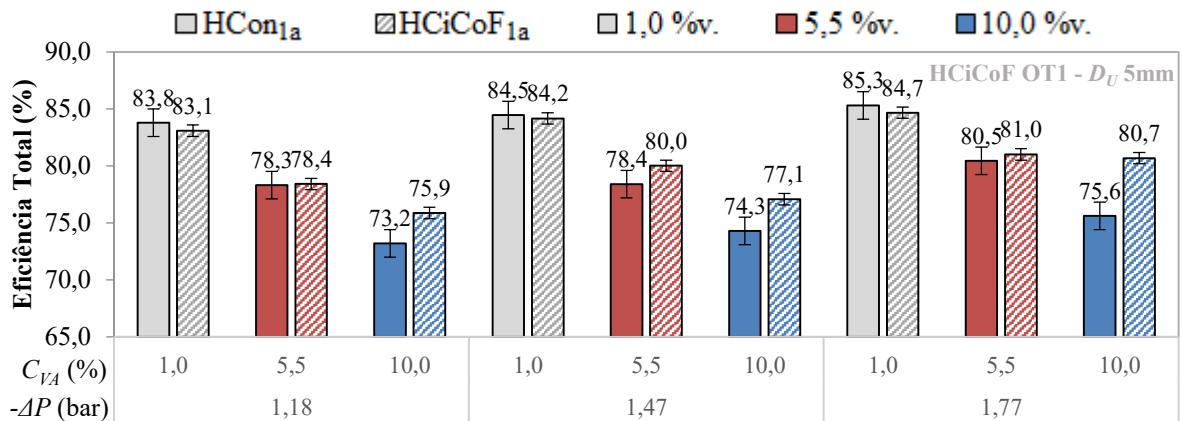


Figura 4.1-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 5$ mm.

De acordo com as informações contidas nas Figuras 4.1-16, 4.1-17 e 4.1-18 verificou-se que as eficiências totais obtidas estiveram entre 54 % a 85 % para o hidrociclone HCiCoF_{1a} e entre 56 % a 85 % para o hidrociclone HCon_{1a}. Através da análise gráfica dos dados experimentais, a eficiência total para o hidrociclone filtrante foi majorada ou minorada, dependendo da combinação dos parâmetros operacionais. Dessa forma, não foi possível identificar variações significativas generalizadas entre a eficiência total para o hidrociclone cilíndrico-cônico filtrante HCiCoF_{1a} e o convencional de mesma geometria HCon_{1a}, nas condições estudadas.

Ainda em relação às Figuras 4.1-16, 4.1-17 e 4.1-18, é possível constatar que a operação com suspensões concentradas acarreta a redução da eficiência total para ambos os hidrociclones estudados, efeitos também observados por Gonçalves (2016) e Ascendino (2019). Foi observada uma redução de aproximadamente 6,3 % ao alterar a concentração de sólidos na suspensão de 1,0 % para 5,5 %v. e de 9,0 % quando C_{VA} foi alterada de 5,5 % para 10,0 %v. A maior quantidade de partículas presente na suspensão ocasiona a redução da velocidade tangencial da suspensão, efeito desfavorável à separação (DAVAILLES *et al.*, 2012; KUANG *et al.*, 2012).

Nas Figuras 4.1-19, 4.1-20 e 4.1-21 apresentam-se os dados experimentais para os diâmetros de corte obtidos para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} para as concentrações de sólidos na alimentação (C_{VA}) de 1,0 % a 10,0 %v., queda de pressão ($-\Delta P$) de 1,18 a 1,77 bar e diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm.

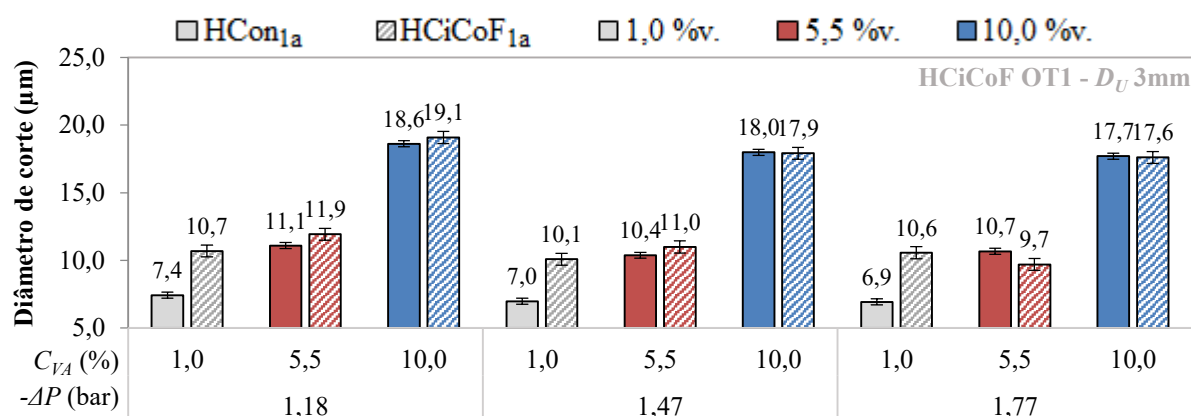


Figura 4.1-19 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 3$ mm.

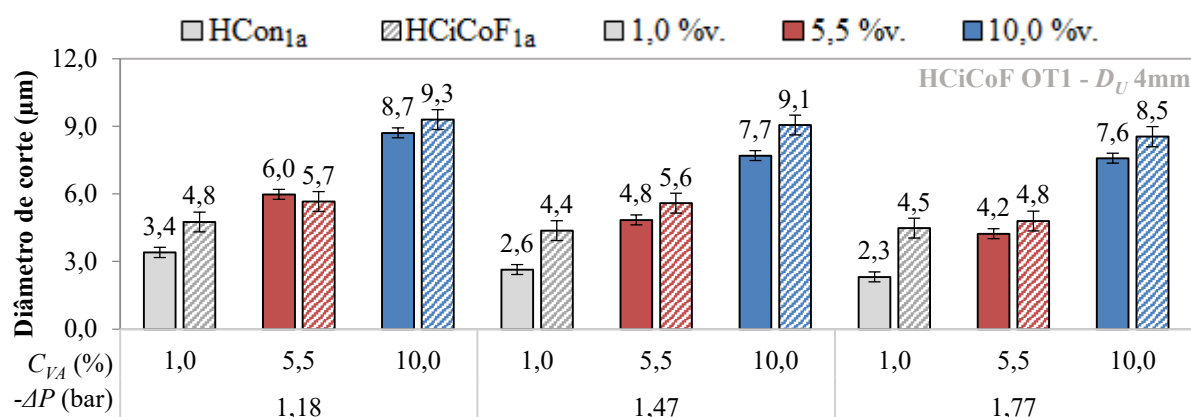


Figura 4.1-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 4$ mm.

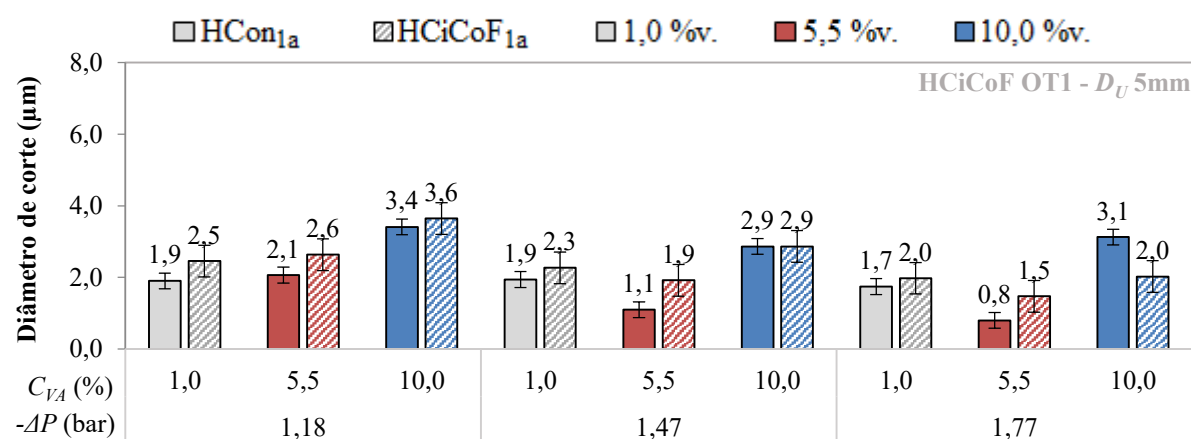


Figura 4.1-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a} com $D_U = 5$ mm.

Conforme os dados obtidos experimentalmente, d_{50} variou entre 1,47 e 19,10 μm para o hidrociclone filtrante HCiCoF_{1a} e entre 0,84 e 18,60 μm para o equipamento convencional HCon_{1a}. Em geral, o diâmetro de corte foi majorado para o hidrociclone filtrante em relação ao convencional em 47 % e 63 % para as condições em que se combinou C_{VA} de 1,0 %v. e diâmetros de *underflow* de 3 e 4 mm, respectivamente. Nas demais condições experimentais

estudadas os equipamentos filtrantes e convencionais não apresentaram diferenças significativas em relação ao diâmetro de corte de acordo com testes estatísticos de comparação entre as médias (*t-Student*) com nível de 5 % de significância.

Também é possível observar a redução do diâmetro de corte com o aumento do diâmetro de *underflow*, com uma redução média de 53 % ao aumentar o diâmetro de *underflow* de 3 para 4 mm, e de 60 % ao alterar D_U de 4 para 5 mm. O aumento do diâmetro de *underflow* promove a redução à resistência ao escoamento, e dessa forma, uma menor quantidade de partículas finas é direcionada ao *overflow*, juntamente com uma parcela de líquido, e o diâmetro de corte (d_{50}) é minorado.

Em relação à concentração de sólidos na alimentação observou-se que um aumento nessa variável resultou em um aumento no diâmetro de corte dos hidrociclones. No entanto, para os hidrociclones operando com D_U de 3 mm na condição de 1,77 bar de queda de pressão e para os equipamentos com D_U de 5 mm e 1,47 e 1,77 bar foi observada uma redução em d_{50} , ao alterar C_{VA} de 1,0 % para 5,5 %v.

A fim de averiguar e quantificar os efeitos observados para E_T e d_{50} em relação às variáveis C_{VA} , D_U e $-\Delta P$, foram realizadas regressões múltiplas para os dados do planejamento experimental para o equipamento filtrante HClCoF_{1a}. Na Tabela 4.1-5 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento para eficiência total e diâmetro de corte.

Tabela 4.1-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone HClCoF_{1a}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (μm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	73,90	0,247	0,0000	7,34	0,146	0,0000
X_1 (Linear)	-11,54	0,625	0,0000	4,27	0,368	0,0000
X_1 (Quadrático)	–	–	–	-1,61	0,301	0,0000
X_2 (Linear)	14,97	0,625	0,0000	-10,81	0,368	0,0000
X_2 (Quadrático)	2,48	0,507	0,0001	-1,30	0,301	0,0003
X_3 (Linear)	2,80	0,625	0,0002	-1,00	0,368	0,0124
$X_1 X_2$ (Cruzado)	6,46	0,765	0,0000	-3,57	0,450	0,0000
R^2	0,98			0,98		

Conforme os resultados da regressão dos dados experimentais apresentados na Tabela 4.1-5, verificou-se que as variáveis diâmetro de *underflow* (X_2), seguida da concentração da alimentação (X_1) e da queda de pressão (X_3) foram as que nessa ordem mais influenciaram na

eficiência total e no diâmetro de corte dos hidrociclones H_{CoF1a} e H_{Con1a}. As duas primeiras apresentaram coeficientes com sinais contrários para eficiência total e diâmetro de corte, comportamento esperado devido à característica inversamente proporcional dessas respostas.

O diâmetro de *underflow* (X_2) influenciou diretamente o poder de classificação das partículas, conforme observado em outros trabalhos do grupo de pesquisa (ALMEIDA, 2008; GONÇALVES, 2016). Através de acréscimos em D_U foi observado um aumento para a eficiência total (coeficiente com sinal positivo) e redução no diâmetro de corte (coeficiente com sinal negativo). Acredita-se que com o aumento de D_U mais partículas eram arrastadas para a corrente de *underflow*, conforme evidenciado pelo aumento da razão de líquido.

Em seu trabalho, Kuang *et al.* (2012) também relataram o aumento do diâmetro de corte com o aumento da concentração de sólidos de alimentação. Para uma faixa de concentração de sólidos semelhante à estudada nesse trabalho (C_{VA} entre 1,0 %v. e 10,0 %v.), os autores observaram que houve uma redução da velocidade tangencial fato este que pode ter influenciado no aumento do diâmetro de corte das partículas coletadas pelo hidrociclone. Além disso, em condições concentradas o conteúdo de sólidos no hidrociclone é relativamente alto, e sob tais condições, a interação entre as partículas pode se tornar um dos principais fatores que contribuem com a fluidodinâmica no interior do hidrociclone. Ou seja, a presença de partículas afeta o fluxo do líquido, que por sua vez afeta o fluxo das partículas, desviando-as da trajetória em direção à corrente de *underflow* (KUANG *et al.*, 2012; KUMAR *et al.* 2021).

Foi estimado um coeficiente positivo para a eficiência total e negativo para o diâmetro de corte, em relação à queda de pressão (X_3), indicando que aumentos em $-AP$ corroboraram com o desempenho de separação dos equipamentos estudados. A queda de pressão é proporcional à eficiência total de separação e ao consumo de energético (BRADLEY, 1965). Assim, quanto maior a queda de pressão adotada, maior é a classificação de partículas e, consequentemente, maior também é o gasto energético do equipamento (TIAN *et al.*, 2018).

Ainda sobre os resultados das regressões para a eficiência total e o diâmetro de corte (Tabela 4.1-5), nota-se que também houve um efeito combinado considerável da concentração da alimentação com o diâmetro de *underflow*, par X_1 - X_2 . Tais comportamentos podem ser melhor observados nas superfícies de resposta para E_T e d_{50} na Figura 4.1-22.

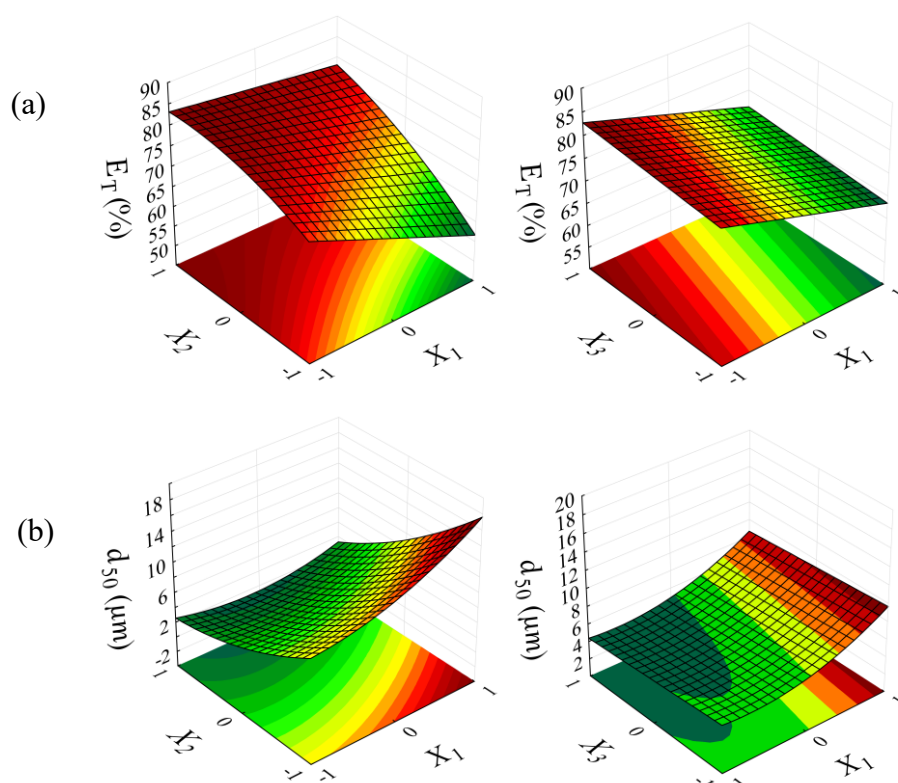


Figura 4.1-22 – Superfícies de Resposta para (a) eficiência total (E_T) e (b) diâmetro de corte (d_{50}) para o hidrociclone HClCoF_{1a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A fim de averiguar e quantificar os efeitos observados para E_T e d_{50} em relação à filtração foram realizadas regressões múltiplas para os dados combinados dos planejamentos experimentais de HClCoF_{1a} e HCon_{1a}, na forma de um planejamento misto a 2 e 3 níveis. Na Tabela 4.1-6 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento para eficiência total e diâmetro de corte para os hidrociclones HClCoF_{1a} e HCon_{1a}.

Tabela 4.1-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF_{1a} e HCon_{1a}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (µm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	73,93	0,152	0,0000	6,88	0,090	0,0000
X_1 (Linear)	-12,41	0,384	0,0000	5,01	0,226	0,0000
X_1 (Quadrático)	–	–	–	-1,35	0,185	0,0000
X_2 (Linear)	13,91	0,384	0,0000	-10,32	0,226	0,0000
X_2 (Quadrático)	2,88	0,312	0,0000	-1,54	0,185	0,0000
X_3 (Linear)	2,67	0,384	0,0000	-0,91	0,226	0,0002
X_4 (Linear)	–	–	–	0,86	0,178	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	5,13	0,470	0,0000	-4,19	0,276	0,0000
$X_1 X_4$ (Cruzado)	1,11	0,384	0,0055	-0,81	0,226	0,0007
$X_2 X_4$ (Cruzado)	0,87	0,384	0,0271	-0,45	0,226	0,0498
R^2	0,98			0,98		

A filtração (X_4) apresentou coeficiente positivo para o d_{50} , mas não foi observado efeito significativo ao avaliar a eficiência total. Assim, observou-se que, ao utilizar o equipamento filtrante ($X_4 = +1$), houve um aumento do diâmetro de corte, mas não foram observadas alterações para a eficiência total de HCiCoF_{1a}. Para hidrociclones filtrantes, pode ocorrer a redução da componente radial da velocidade próximo à parede porosa (nesse caso cilindro e cone); com isso, as partículas presentes no vórtice externo permanecem mais tempo junto à parede do equipamento (seguindo a trajetória do vórtice externo) até serem coletadas no *underflow* (VIEIRA *et al.*, 2007). Isto pode ter ocasionado a coleta de partículas grandes em maior proporção, elevando o valor de d_{50} para a modalidade filtrante.

Através das análises realizadas nesta seção, foi possível constatar que os hidrociclones filtrante e convencional de geometria HCiCoF-OT1 são boas alternativas de equipamentos classificadores, pois, em níveis adequados de queda de pressão e diâmetro de *underflow*, foram capazes de proporcionar alta eficiência total para todas as concentrações de sólidos estudadas. Ao mesmo tempo, o hidrociclone HCiCoF_{1a} com seções cilíndrica e cônica porosas apresentou vantagens em relação ao hidrociclone convencional geometricamente similar (HCon_{1a}). Para todas as condições operacionais analisadas, adotar o equipamento filtrante HCiCoF_{1a} reduz significativamente o consumo energético da operação de hidrociclonagem sem alterar estatisticamente a eficiência total de separação. Além disso, não foram observadas diferenças

na concentração de sólidos no *underflow* entre os equipamentos filtrante e convencional ao processar suspensões concentradas ($X_I = +1$ ou $C_{VA} = 10,0$ %v.). O equipamento filtrante também promoveu a redução da presença de finos da corrente de *underflow* sem alterar significativamente a eficiência total, quando comparado ao equipamento convencional.

4.2. ESTUDO DE DESEMPENHO DOS HIDROCICLONES PERTENCENTES AO CASO 1B (MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA TOTAL PARA HIDROCICLONES HCoF)

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais para os hidrociclones cônico-filtrante (HCoF_{1b}) e convencional (HCon_{1b}) de geometria HCoF-OT1. Esta geometria foi otimizada por Salvador (2017) através de uma base de dados de hidrociclones cônico-filtrantes, com o objetivo de maximização da eficiência total com $Eu < 5000$, denominado neste trabalho como Caso 1b. Na Figura 4.2-1 apresentam-se os valores para a vazão de filtrado (Q_F) obtidos para o hidrociclone HCoF_{1b} nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental.

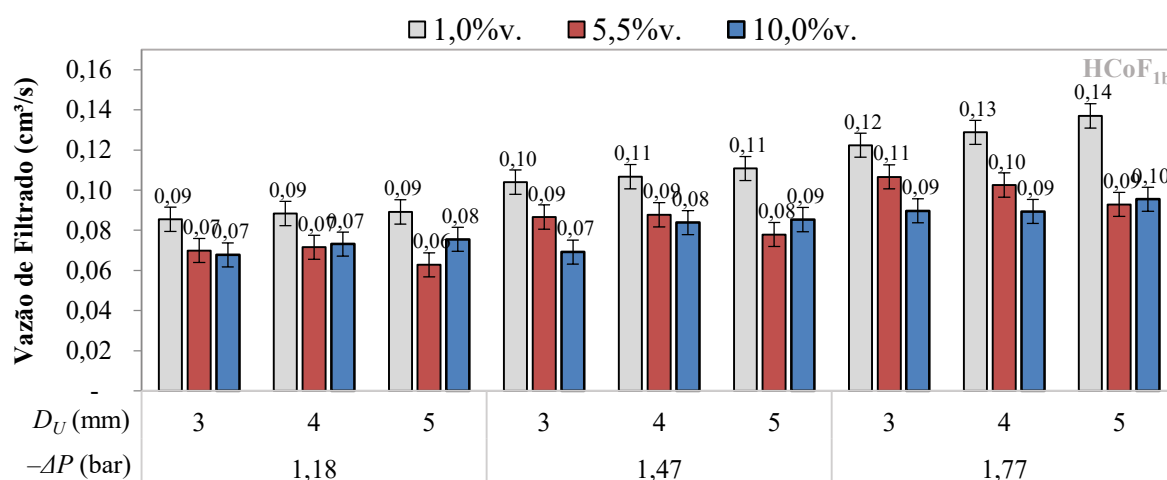


Figura 4.2-1 – Vazão de filtrado HCoF_{1b}.

Observando a Figura 4.2-1 verificou-se que houve uma variação de 0,06 a 0,14 cm³/s para a vazão de filtrado do equipamento HCoF_{1b}. Essa corrente representou, no máximo, 0,04 % da vazão alimentada no hidrociclone. Assim como discutido na seção anterior, estima-se que mesmo apresentando valores muito pequenos, a vazão de filtrado seja capaz de promover reduções significativas no número de Euler e aumentos na vazão de alimentação para o equipamento cônico-filtrante.

4.2.1. VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO E NÚMERO DE EULER

Nas Figuras 4.2-2, 4.2-3 e 4.2-4 apresentam-se os valores obtidos experimentalmente para a vazão de alimentação para o hidrociclone HCoF_{1b} e para o hidrociclone de mesma geometria na modalidade convencional, HCon_{1b}, nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental.

Conforme pode ser observado, a vazão de alimentação variou de 209 a 291 cm³/s para o hidrociclone convencional e de 240 a 352 cm³/s para o equipamento filtrante. A vazão de alimentação foi majorada para o hidrociclone filtrante frente aos convencionais, observando-se um aumento de 19 % na média da vazão de suspensão alimentada para HCoF_{1b} em relação a HCon_{1b}. No entanto, assim como observado para HCoF_{1a}, essa diferença foi maior a depender das condições operacionais empregadas. Para estes casos, em que se utilizou $C_{VA} = 1,0$ %v., a vazão de alimentação para o equipamento filtrante foi majorada em 26 %, em média, em relação a HCon_{1b}.

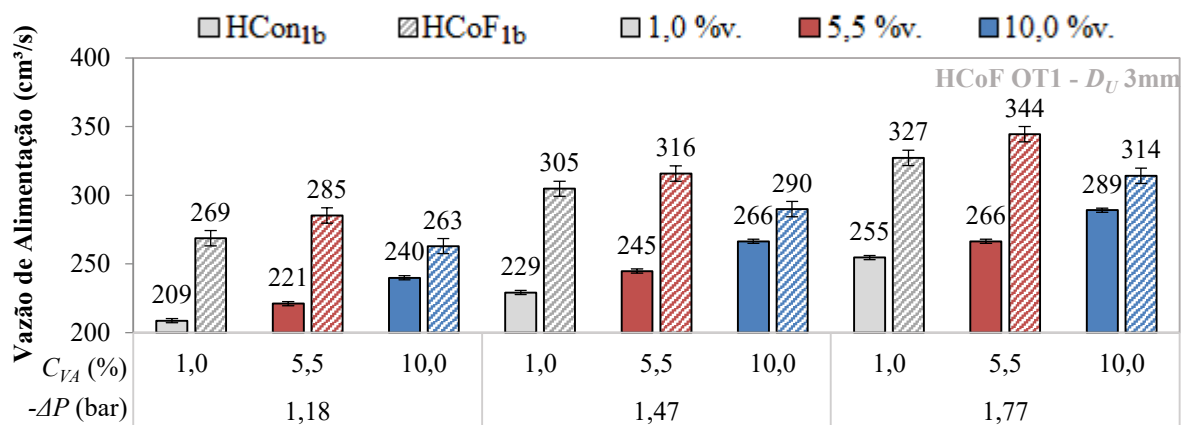


Figura 4.2-2 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 3$ mm.

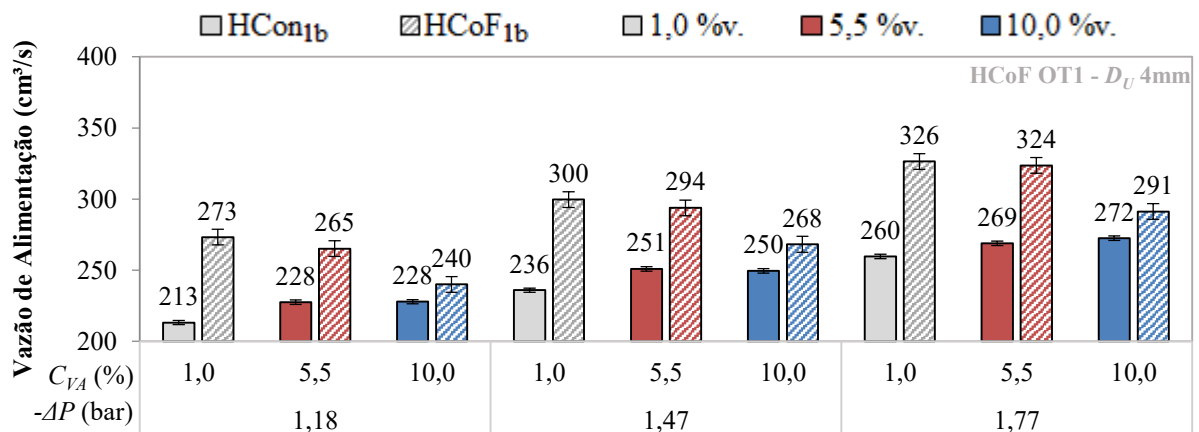


Figura 4.2-3 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 4$ mm.

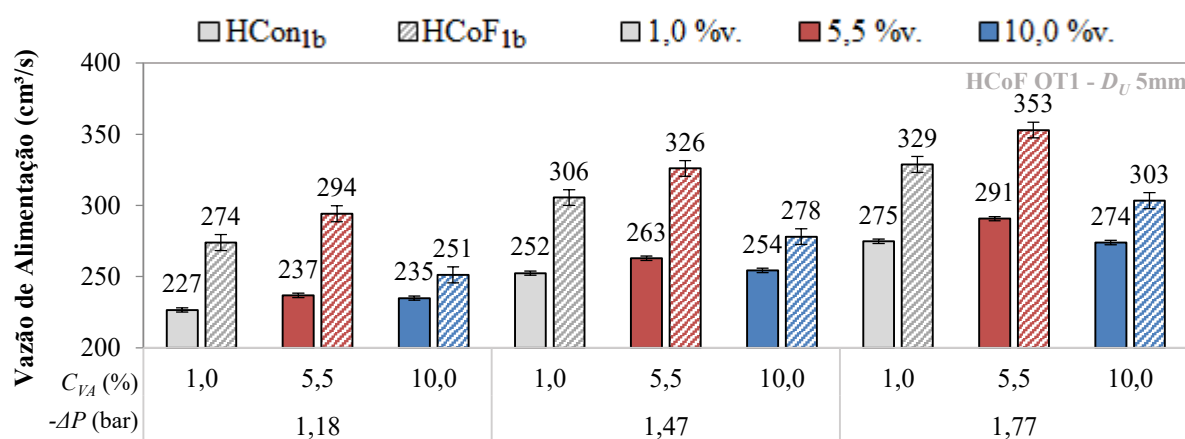


Figura 4.2-4 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 5$ mm.

O aumento da capacidade observado para HCoF_{1b} deve resultar em alterações para o número de Euler desses equipamentos. Nas Figuras 4.2-5, 4.2-6 e 4.2-7 apresentam-se os resultados obtidos para os equipamentos cônico-filtrante (HCoF_{1b}) e convencional (HCon_{1b}) nas condições propostas no planejamento experimental.

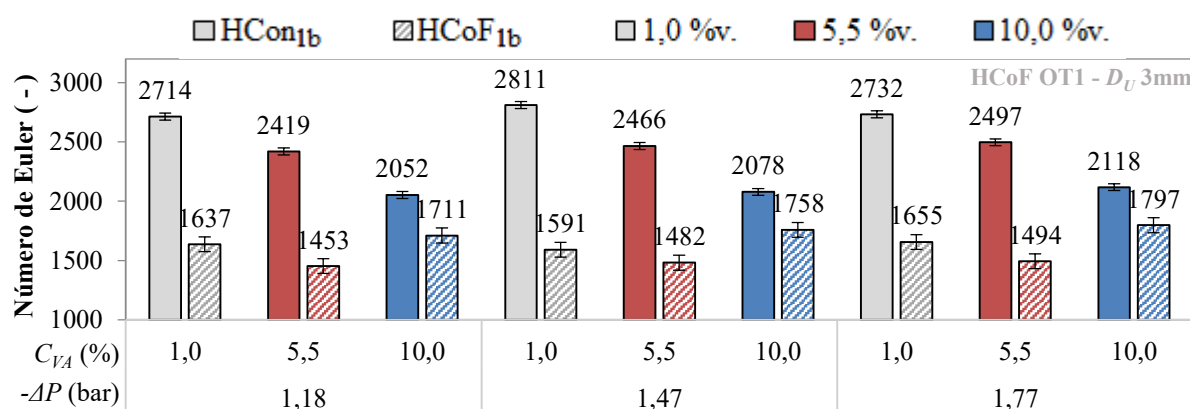


Figura 4.2-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 3$ mm.

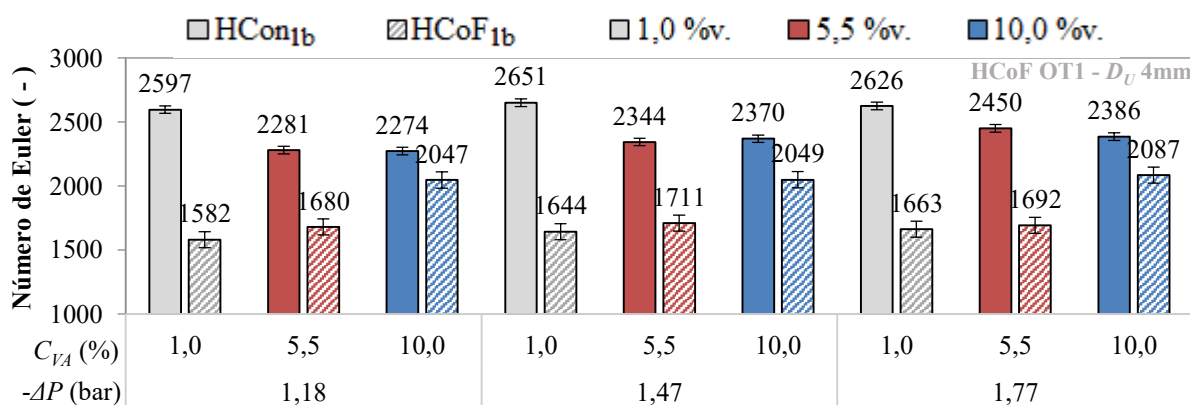


Figura 4.2-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 4$ mm.

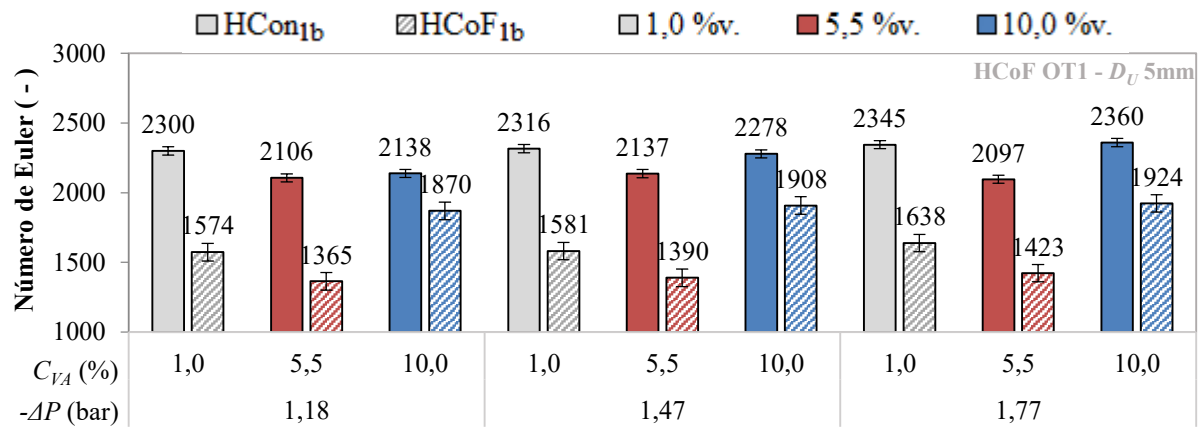


Figura 4.2-7 – Número de Euler para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 5$ mm.

De acordo com as Figuras 4.2-5, 4.2-6 e 4.2-7, o número de Euler variou de 1385 a 2086 para HCoF_{1b} e de 2052 a 2811 para o convencional HCon_{1b}. Assim como fora observado na seção anterior (HCiCoF_{1a}), houve a redução dos valores de número de Euler do equipamento filtrante em relação ao similar convencional para todas as condições do planejamento experimental proposto. Foi observada uma redução de 28,4 % no número de Euler, em média, para HCoF_{1b} em comparação a HCon_{1b} para as mesmas configurações operacionais estudadas experimentalmente. Além disso, para o sistema mais diluído estudado ($C_{VA} = 1,0$ %v.) operando com D_U de 3mm, a diferença de Eu entre os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} chegou a 41 %.

A fim de quantificar a influência das variáveis estudadas (C_{VA} , D_U e $-ΔP$) em relação à vazão de alimentação e número de Euler no hidrociclone HCoF_{1b}, foi realizada uma regressão não linear dos dados. O efeito das variáveis pode ser observado na Tabela 4.2-1.

Tabela 4.2-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCoF_{1b}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	296,67	1,154	0,0000	1684,8	11,11	0,0000
X_1 (Linear)	-23,19	2,907	0,0000	276,3	27,98	0,0000
X_1 (Quadrático)	22,08	2,378	0,0000	-247,9	22,88	0,0000
X_2 (Quadrático)	-14,52	2,378	0,0000	179,5	22,88	0,0000
X_3 (Linear)	55,23	2,907	0,0000	39,5	27,98	0,0916
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-7,04	3,561	0,0601	87,5	34,27	0,0294
R^2	0,95			0,90		

Fica evidente pela avaliação dos valores dos parâmetros da Tabela 4.2-1 que a queda de pressão ($-ΔP$ ou X_3) do hidrociclone teve o maior efeito no comportamento da vazão de alimentação, seguido do diâmetro de *underflow* (D_U ou X_2). Os coeficientes positivos dos dois primeiros fatores indicam que seus efeitos foram diretamente proporcionais a Q , ou seja, o aumento de $-ΔP$ e D_U , para os hidrociclones dessa geometria, aumenta a vazão de suspensão alimentada.

Além disso, observa-se uma interação entre as variáveis concentração de alimentação (X_1), diâmetro de *underflow* (X_2) e filtração (X_4), através dos efeitos combinados entre os pares X_1 - X_2 , X_1 - X_4 e X_2 - X_4 . Os efeitos citados podem ser observados nas superfícies de resposta para vazão de alimentação e número de Euler (Figura 4.2-8 e Figura 4.2-9, respectivamente).

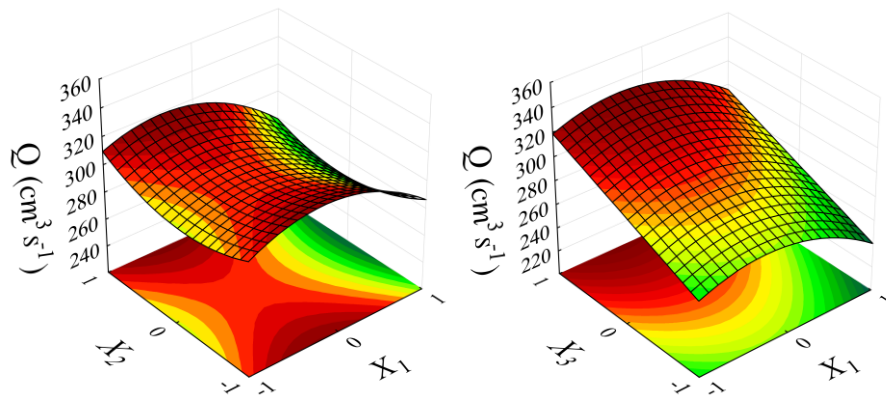


Figura 4.2-8 – Superfícies de Resposta para a vazão de alimentação (Q) do hidrociclone HCoF_{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

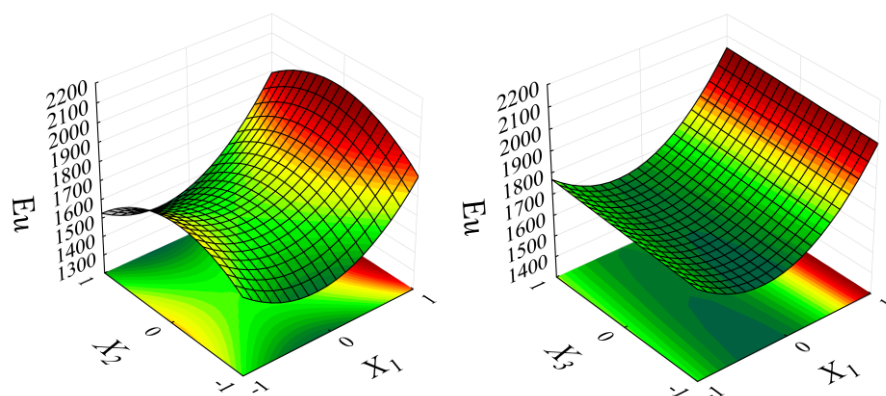


Figura 4.2-9 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HCoF_{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A partir da análise das superfícies de resposta, nota-se que há uma coincidência entre as faixas operacionais que maximizam a capacidade de processamento e minimizam o número de

Euler. Nota-se que as condições que minimizam o consumo energético para os equipamentos com a geometria HCoF-OT1 são encontradas ao majorar a variável X_2 e minorar a variável X_1 .

De acordo com os dados analisados, tem-se que a filtração (X_4) afetou significativamente o número de Euler e a vazão de alimentação dos hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} (Figuras 4.2-5, 4.2-6 e 4.2-7). A fim de quantificar a influência da filtração e efeitos relacionados às demais variáveis estudadas (C_{VA} , D_U e $-\Delta P$) quanto à vazão de alimentação e número de Euler nos hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}, foi realizada uma regressão não linear dos dados do planejamento experimental combinado com as respostas de vazão de alimentação e número de Euler obtidas para o hidrociclone cônico-filtrante e convencional, em que o efeito das variáveis pode ser observado na Tabela 4.2-2.

Tabela 4.2-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	272,84	1,231	0,0000	2026,4	11,20	0,0000
X_1 (Quadrático)	–	–	–	-167,1	23,07	0,0000
X_2 (Linear)	12,39	2,536	0,0000	-95,2	28,20	0,0014
X_2 (Quadrático)	-11,91	2,536	0,0000	145,0	23,07	0,0000
X_3 (Linear)	51,16	3,101	0,0000	60,2	28,20	0,0378
X_4 (Linear)	48,03	2,443	0,0000	-687,3	22,22	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-13,68	3,798	0,0007	195,5	34,54	0,0000
$X_1 X_4$ (Cruzado)	-20,26	3,101	0,0000	306,0	28,20	0,0000
$X_2 X_4$ (Cruzado)	–	–	–	105,8	28,20	0,0005
R^2	0,94			0,96		

O efeito da filtração (X_4) também foi significativo para Q e Eu de acordo com a regressão. A incorporação de uma parede filtrante na seção cônica para os hidrociclones dessa geometria aumentam a vazão de suspensão alimentada. Além disso, o sinal negativo indica que incorporação de paredes filtrantes (HCoF_{1b}) reduziu o consumo energético, evidenciado pela redução do número de Euler para a modalidade cônico-filtrante.

Além disso, observa-se uma interação entre as variáveis concentração de alimentação (X_1) e filtração (X_4), nas respostas abordadas. Desta forma, o processamento de suspensões

diluídas aumentou a capacidade de processamento no hidrociclone filtrante, em relação ao convencional, enquanto para as suspensões concentradas a filtração não interferiu em Q .

4.2.2. RAZÃO DE LÍQUIDO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DO *UNDERFLOW*

Nas Figuras 4.2-10, 4.2-11 e 4.2-12 apresentam-se os dados experimentais para a concentração volumétrica de sólidos do *underflow* obtidos para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

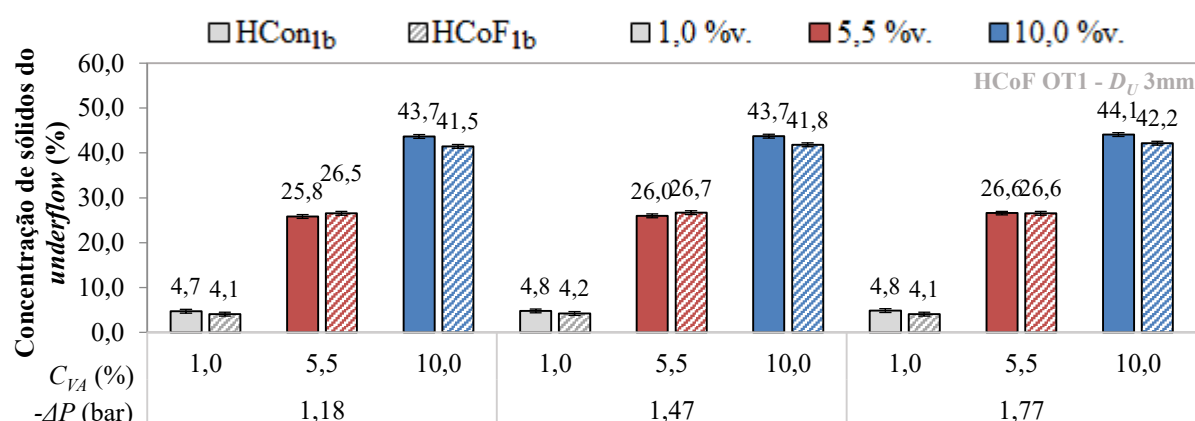


Figura 4.2-10 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 3$ mm.

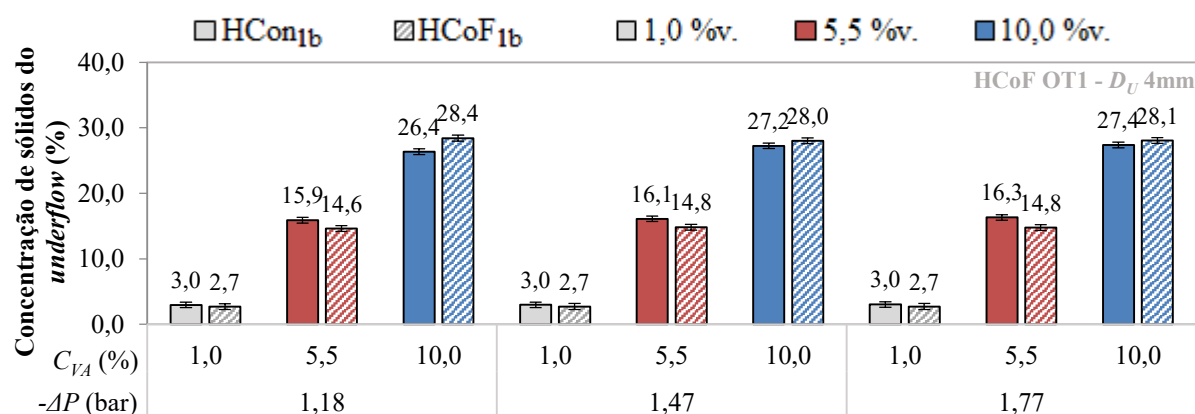


Figura 4.2-11 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 4$ mm.

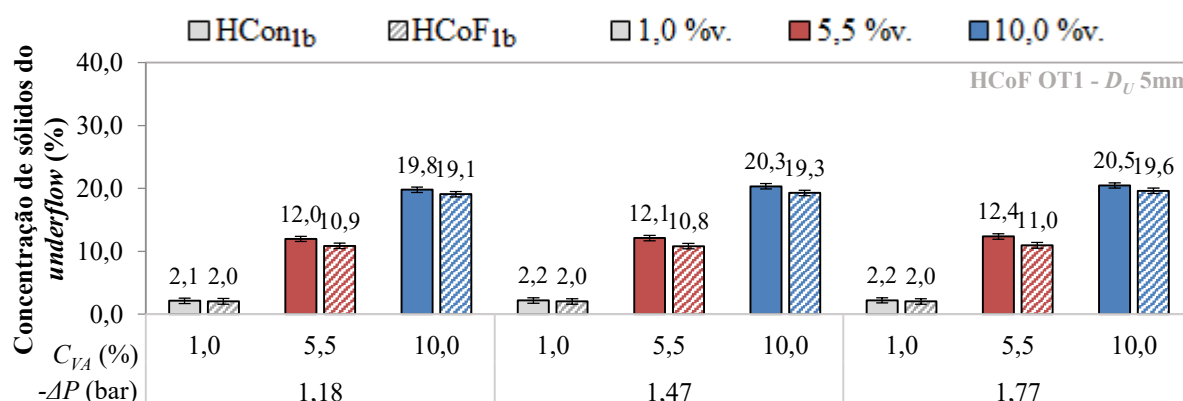


Figura 4.2-12 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 5$ mm.

Através dos dados apresentados é possível observar que a concentração de sólidos do *underflow* do hidrociclone filtrante HCoF_{1b} foi muito próxima àquela obtida pelo hidrociclone convencional HCon_{1b}, nas mesmas condições estudadas. Em média foram observados decréscimos de 5 % na concentração do *underflow* para HCoF_{1b} em relação a HCon_{1b}.

Nas Figuras 4.2-13, 4.2-14 e 4.2-15 apresentam-se os dados experimentais para razão de líquido obtidos para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} para as condições do planejamento experimental.

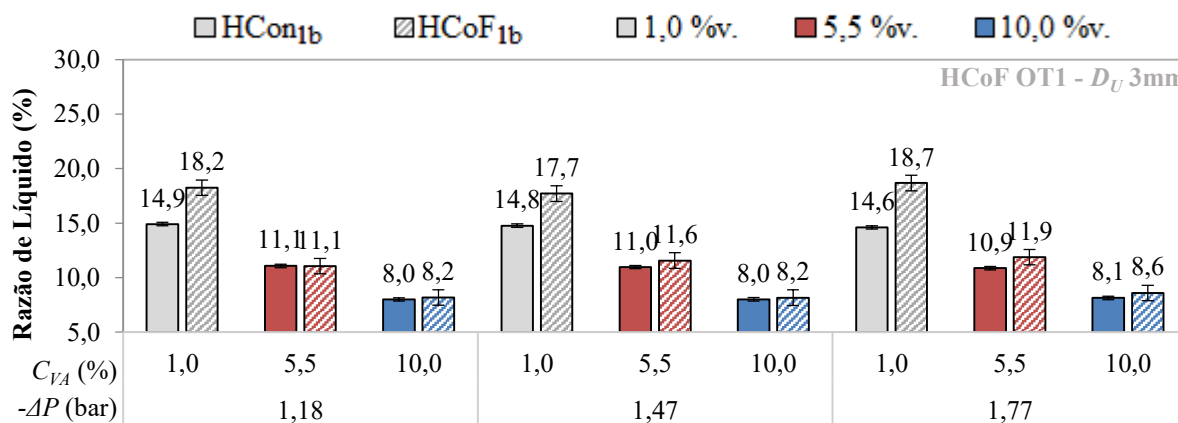
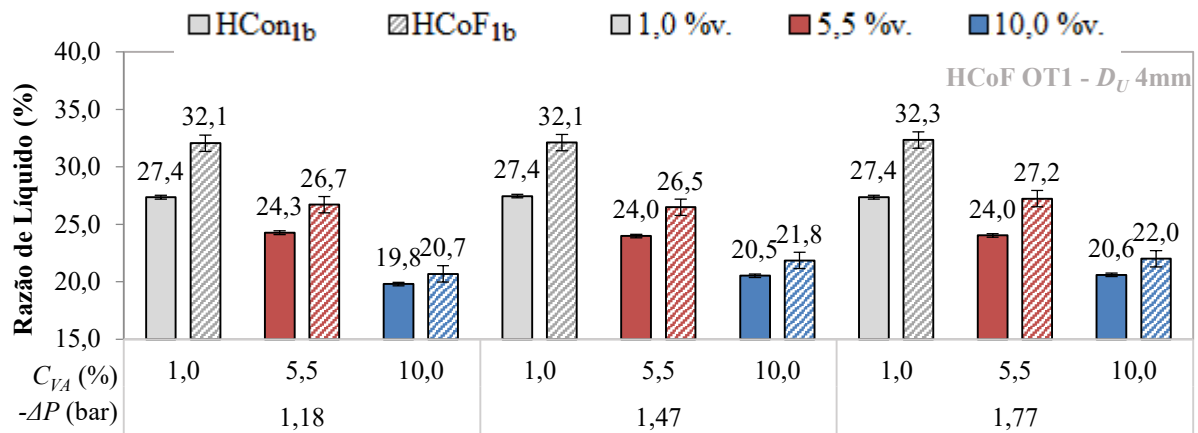
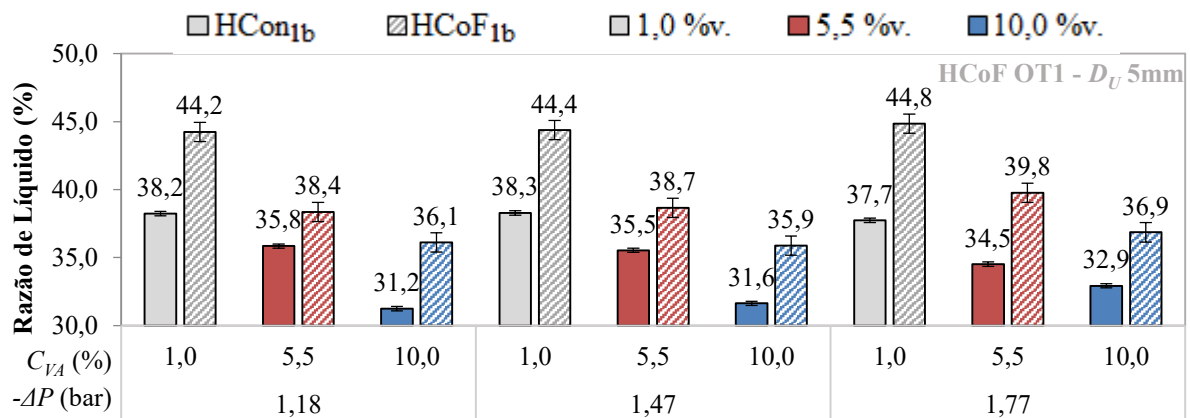


Figura 4.2-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCon_{1b} e HCoF_{1b} com $D_U = 3$ mm.


 Figura 4.2-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCon1b e HCoF1b com $D_U = 4$ mm.

 Figura 4.2-15 – Razão de líquido para os hidrociclones HCon1b e HCoF1b com $D_U = 5$ mm.

A razão de líquido variou de 8,35 % a 44,85 % para o hidrociclone HCoF1b e de 7,75 % a 38,29 % para HCon1b. De acordo com os dados experimentais apresentados foi possível observar que a filtração também foi um fator que influenciou a razão de líquido dos equipamentos HCoF-OT1. O aumento em R_L está em concordância à redução de C_{VU} . Para o hidrociclone filtrante (HCoF1b), foram observados acréscimos médios em suas razões de líquido na ordem de 11 % em relação ao convencional de mesma geometria.

Acredita-se que também houve uma interação entre os efeitos da filtração e C_{VA} para a R_L desses equipamentos. Nas condições em que se operou com 10,0 %v. de sólidos na alimentação e D_U de 3 mm foi observado um aumento médio de 3,6 % em R_L enquanto essa diferença subiu para 23 % ao utilizar uma suspensão com C_{VA} de 1,0 %v. Assim sendo, os equipamentos filtrantes e convencionais obtiveram valores semelhantes de R_L para as condições em que se operou com C_{VA} de 5,5 %v. e D_U de 3 mm e para C_{VA} de 10,0 %v. com diâmetros de *underflow* de 3 e 4 mm.

A fim de quantificar e confirmar os efeitos observados para C_{VU} e R_L no equipamento HCoF_{1b}, foram realizadas regressões múltiplas para os dados do planejamento experimental para as variáveis C_{VA} (X_1), D_U (X_2), $-\Delta P$ (X_3). Na Tabela 4.2-3 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido para os hidrociclones HCoF_{1b}.

Tabela 4.2-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido do hidrociclone HCoF_{1b}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	16,62	0,211	0,0000	26,59	0,175	0,0000
X_1 (Linear)	26,82	0,532	0,0000	-9,58	0,443	0,0000
X_1 (Quadrático)	0,77	0,435	0,0863	-0,68	0,362	0,0708
X_2 (Linear)	-13,41	0,532	0,0000	27,22	0,443	0,0000
X_2 (Quadrático)	-2,51	0,435	0,0000	0,94	0,362	0,0180
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-10,20	0,651	0,0000	–	–	–
R^2	0,99			0,99		

As variáveis que mais influenciaram na concentração volumétrica de sólidos do *underflow* dos equipamentos HCoF_{1b} e HCon_{1b} foram, respectivamente, X_1 e X_2 . Para a razão de líquido foram X_2 e X_1 , nesta ordem de relevância. Resultado similar ao observado para HCoF_{1a} e HCon_{1a}. Sendo que para estas variáveis foram observados efeitos de sinais opostos entre C_{VU} e R_L .

Em consonância com as análises realizadas para HCoF_{1a}, observou-se um efeito oposto para variações de C_{VA} (X_1), na concentração do *underflow* (C_{VU}) e na razão de líquido (R_L). O mesmo foi observado para a variável D_U (X_2) uma vez que menores diâmetros de *underflow* atuam restringindo o escoamento e reduzindo a quantidade de líquido direcionado ao duto de *underflow*. Os efeitos citados podem ser melhor observados nas superfícies de resposta para C_{VU} e R_L (Figura 4.2-16).

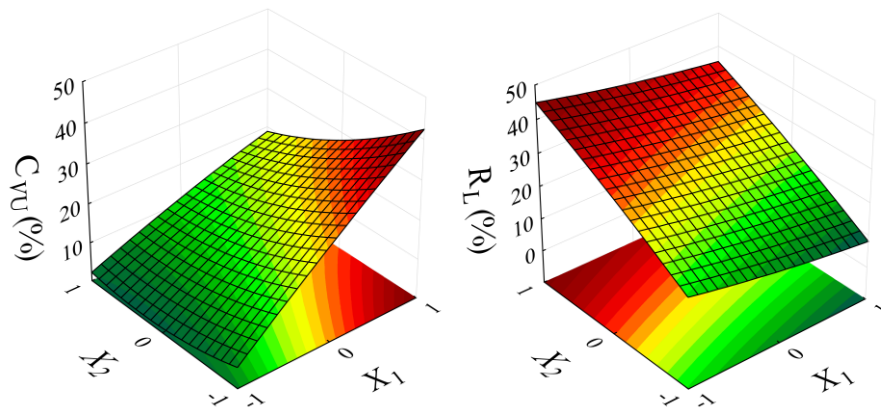


Figura 4.2-16 – Superfícies de Resposta para Concentração do *underflow* e razão de líquido do hidrociclone HCoF_{1b} segundo o par X_1 - X_2 , nos níveis centrais dos demais fatores.

De acordo com a Figura 4.2-16, em sistemas com alta concentração de sólidos na alimentação ($X_1 = +1$) o aumento do diâmetro de *underflow* (X_2), reduziu drasticamente C_{VU} , já no processamento de suspensões mais diluídas, também houve o aumento de C_{VU} , porém de forma menos intensa.

A fim de quantificar e confirmar os efeitos da filtração nas respostas de C_{VU} e R_L nos equipamentos HCoF_{1b} e HCon_{1b}, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais desses equipamentos, na forma de um planejamento combinado para as variáveis C_{VA} (X_1), D_U (X_2), $-\Delta P$ (X_3) e filtração (X_4). Na Tabela 4.2-4 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

De acordo com os efeitos da Tabela 4.2-4 nota-se que a filtração afetou significativamente tanto a concentração de sólidos do *underflow* quanto a razão de líquido dos hidrociclones, conforme foi previsto a partir da análise dos dados experimentais. Para a razão de líquido também houve um efeito combinado considerável entre a filtração e a concentração da alimentação, par X_1 - X_4 , e também com o diâmetro de *underflow*, par X_2 - X_4 . É possível constatar que ao operar sistemas diluídos ($X_1 = -1$), apesar de haver o aumento da razão de líquido não foram observadas reduções significativas em C_{VU} .

Tabela 4.2-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido dos hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	16,94	0,136	0,0000	25,05	0,093	0,0000
X_1 (Linear)	26,92	0,343	0,0000	-8,04	0,236	0,0000
X_1 (Quadrático)	1,05	0,281	0,0004	-0,33	0,193	0,0954
X_2 (Linear)	-13,44	0,343	0,0000	25,54	0,236	0,0000
X_2 (Quadrático)	-2,71	0,281	0,0000	0,97	0,193	0,0000
X_4 (Linear)	-0,66	0,270	0,0188	3,05	0,185	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-10,36	0,421	0,0000	0,62	0,289	0,0368
$X_1 X_4$ (Cruzado)	–	–	–	-1,55	0,236	0,0000
$X_2 X_4$ (Cruzado)	–	–	–	1,68	0,236	0,0000
R²	0,99			0,99		

A interação entre os efeitos dos pares X_1 - X_4 e X_2 - X_4 indicam que R_L é minorada para o equipamento convencional ($X_4 = -1$) nos níveis mais altos de X_2 ($D_U = 4$ e 5 mm). Porém, ao operar com D_U de 3 mm ($X_2 = -1$), e níveis mais altos de X_1 ($C_{VA} = 5,5$ e $10,0$ %v.) não foram observadas diferenças significativas entre R_L dos equipamentos convencional e filtrante de geometria HCoF-OT1.

4.2.3. EFICIÊNCIA TOTAL E DIÂMETRO DE CORTE

Nas Figuras 4.2-17, 4.2-18 e 4.2-19 apresentam-se os dados experimentais para a eficiência total de separação obtidos para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

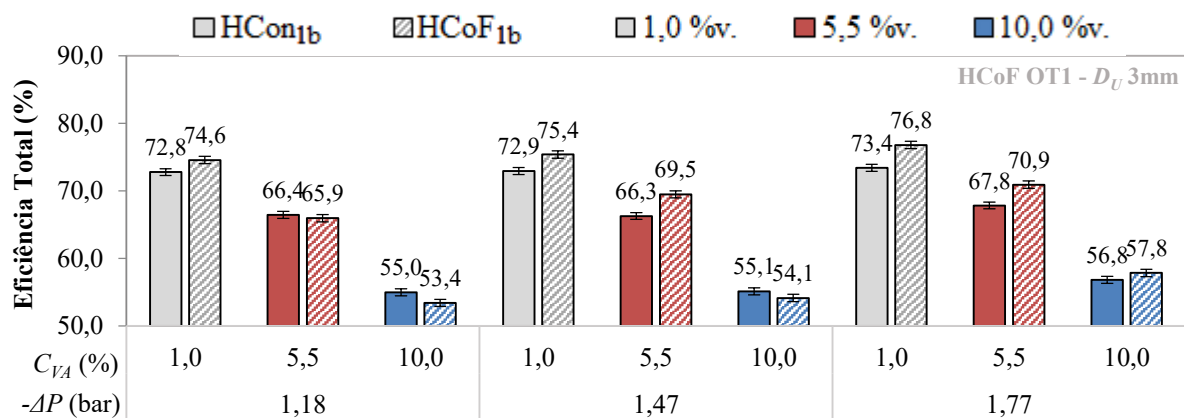


Figura 4.2-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} com $D_U = 3$ mm.

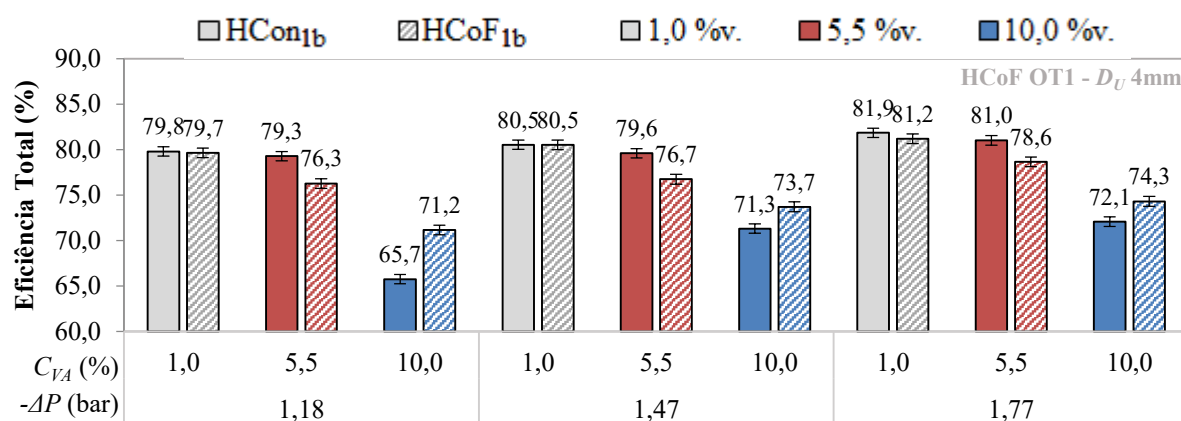


Figura 4.2-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} com $D_U = 4$ mm.

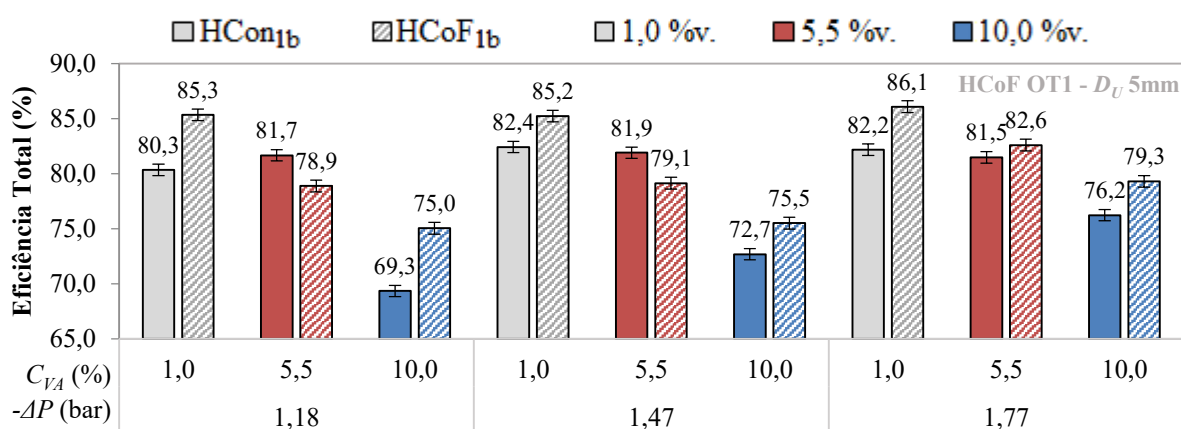


Figura 4.2-19 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} com $D_U = 5$ mm.

Para o hidrociclone HCoF_{1b} notou-se uma variação entre 54 % e 86 %, enquanto que, para o hidrociclone convencional, foi observada uma variação de 53 % a 82 %. A eficiência total aumentou ou diminuiu para o hidrociclone cônico filtrante em relação ao convencional HCon_{1b}, a depender das condições operacionais. No entanto, não foi possível identificar variações significativas gerais para as eficiências totais entre os hidrociclones filtrante e convencional. Além disso, é possível observar uma forte dependência entre a eficiência total e a concentração de sólidos da alimentação (C_{VA}), assim como abordado na seção anterior.

Nas Figuras 4.2-20, 4.2-21 e 4.2-22 apresentam-se os dados experimentais para os diâmetros de corte obtidos para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

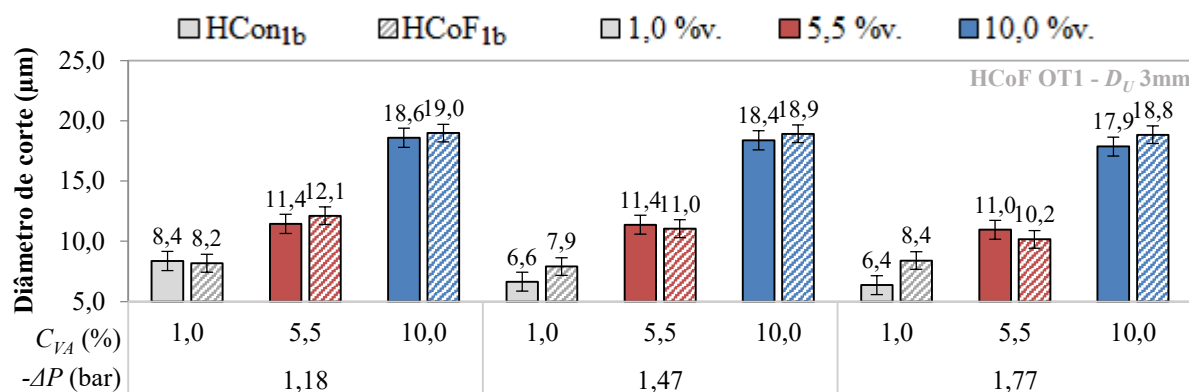


Figura 4.2-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b} com $D_U = 3 \text{ mm}$.

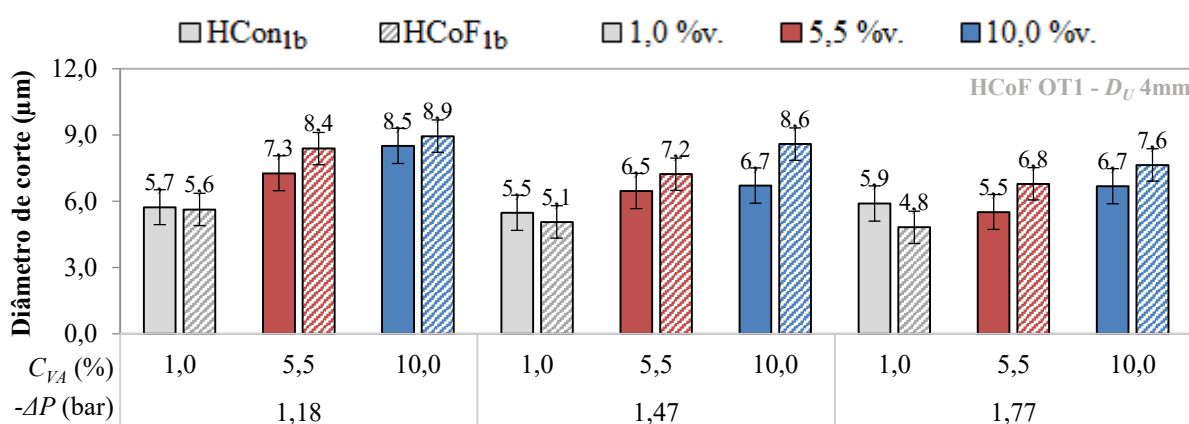


Figura 4.2-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{1b} e Hcon_{1b} com $D_U = 4 \text{ mm}$.

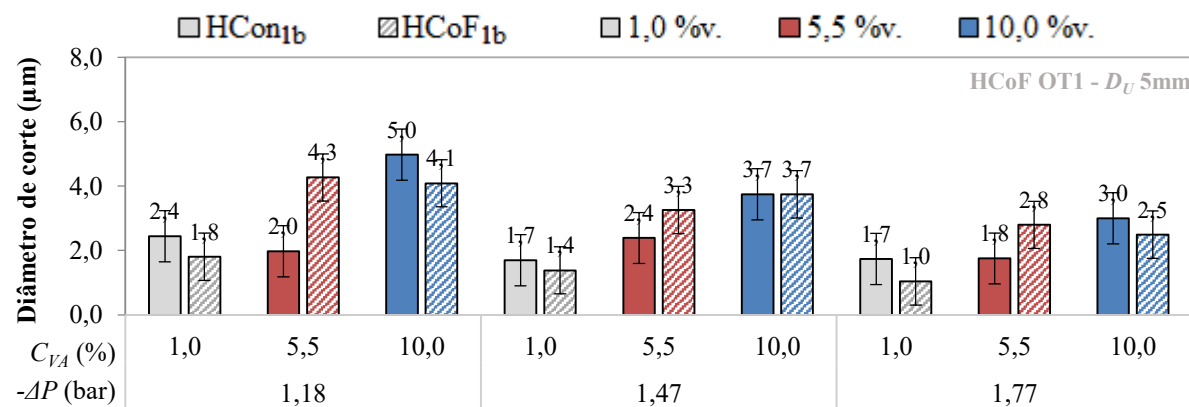


Figura 4.2-22 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HcoF_{1b} e Hcon_{1b} com $D_U = 5 \text{ mm}$.

De acordo com os dados obtidos pelo planejamento experimental o diâmetro de corte dos hidrociclones estudados variou entre 1,04 e 19,04 μm para HCoF_{1b} e de 1,70 a 18,95 μm para HCon_{1b}. Os valores para diâmetros de corte dos equipamentos filtrantes aumentaram ou diminuíram em comparação ao convencional de acordo com as condições experimentais

adotadas. No entanto, de acordo com as Figuras 4.2-20, 4.2-21 e 4.2-22, não houve diferença significativa entre o equipamento filtrante e o convencional para d_{50} .

A fim de averiguar e quantificar os efeitos observados para E_T e d_{50} em relação às variáveis C_{VA} , D_U , $-\Delta P$, foram realizadas regressões múltiplas para os dados do planejamento experimental de HCoF_{1b}. Na Tabela 4.2-5 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e o diâmetro de corte para o hidrociclone HCoF_{1b}.

Tabela 4.2-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte do hidrociclone HCoF_{1b}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (µm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	74,87	0,397	0,0000	7,37	0,233	0,0000
X_1 (Linear)	-12,26	0,999	0,0000	5,33	0,589	0,0000
X_2 (Linear)	1,44	0,818	0,0922	-9,96	0,589	0,0000
X_2 (Quadrático)	14,30	0,999	0,0000	-1,13	0,478	0,0268
X_3 (Linear)	3,72	0,818	0,0002	-1,05	0,589	0,0894
$X_1 X_2$ (Cruzado)	3,04	0,999	0,0059	-4,36	0,722	0,0000
R^2	0,95			0,95		

As variáveis que mais influenciaram na eficiência total dos equipamentos HCoF_{1b} e HCon_{1b} foram C_{VA} (X_1), $-\Delta P$ (X_3) e D_U (X_2), ao passo que no diâmetro de corte foram D_U (X_2), C_{VA} (X_1) e $-\Delta P$ (X_3), nesta ordem.

O diâmetro de *underflow* (D_U ou X_2) e a queda de pressão ($-\Delta P$) apresentam efeitos favoráveis à separação (efeito positivo sobre E_T e negativo em relação a d_{50}). Sendo assim, essas variáveis atuaram aumentando a eficiência total e reduzindo o diâmetro de corte. A concentração de sólidos na alimentação (C_{VA} ou X_1) atuou reduzindo a eficiência total e aumentando o diâmetro das partículas coletadas no *underflow*.

Ainda sobre a Tabela 4.2-5, nota-se que houve um efeito combinado considerável da concentração da alimentação com o diâmetro de *underflow*, por X_1 - X_2 . Tais comportamentos podem ser melhor observados nas superfícies de resposta para E_T e d_{50} (Figura 4.2-23 e Figura 4.2-24, respectivamente).

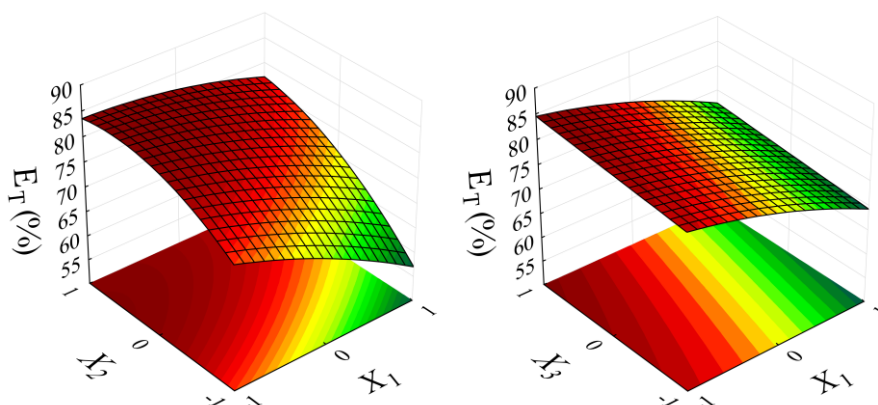


Figura 4.2-23 – Superfícies de Resposta para eficiência total (E_T) do hidrociclone HCoF_{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 nos níveis centrais dos demais fatores.

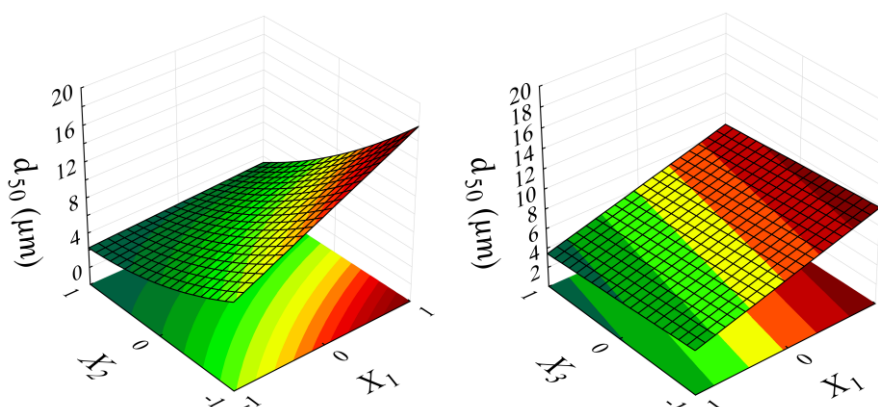


Figura 4.2-24 – Superfícies de Resposta para o diâmetro de corte (d_{50}) do hidrociclone HCoF_{1b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A fim de verificar a existência de efeitos para E_T e d_{50} em relação à filtração e às variáveis C_{VA} , D_U , $-\Delta P$, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais de HCoF_{1b} e HCon_{1b}, na forma de um planejamento combinado. Na Tabela 4.2-6 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento misto para a eficiência total e o diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

Tabela 4.2-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF_{1b} e HCon_{1b}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (µm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	74,35	0,273	0,0000	7,23	0,166	0,0000
X_1 (Linear)	-12,21	0,688	0,0000	5,06	0,420	0,0000
X_1 (Quadrático)	2,91	0,563	0,0000	-0,66	0,343	0,0586
X_2 (Linear)	13,86	0,688	0,0000	-9,76	0,420	0,0000
X_2 (Quadrático)	4,66	0,563	0,0000	-1,05	0,343	0,0034
X_3 (Linear)	2,79	0,688	0,0002	-1,04	0,420	0,0163
$X_1 X_2$ (Cruzado)	5,39	0,840	0,0000	-4,56	0,514	0,0000
R^2	0,95			0,94		

Diferentemente do observado na seção anterior, a análise dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento não identificou efeito significativo para a variável X_4 . Conforme indicado pela análise das Figuras 4.2-20, 4.2-21 e 4.2-22, os intervalos de confiança já haviam sinalizado que não havia diferença significativa para os diâmetros de corte para os equipamentos filtrante e convencional (HCoF_{1b} e HCon_{1b}). Já para a eficiência total, as variações positivas e negativas da inserção do meio poroso nos diversos experimentos explicam a nulidade do efeito de X_4 .

Salvador (2017) também observou que a eficiência total foi mantida no mesmo patamar ao comparar hidrociclones HCoF e HCon com as mesmas configurações geométricas. Conforme constatado por Vieira (2006) através de estudos via CFD, a filtração promove a redução do movimento espiralado dentro do hidrociclone (condição desfavorável à separação), no entanto, esse efeito pode ter sido neutralizado pelo aumento da razão de líquido (condição favorável à separação) observado na Tabela 4.2-3.

Os resultados apresentados nesta seção também indicam o hidrociclone cônico filtrante HCoF_{1b} como uma opção mais vantajosa para o uso industrial em operações de classificação que o convencional HCon_{1b}, inclusive no processamento de suspensões concentradas, devido à redução significativa do consumo energético observada para todas as condições operacionais abordadas nesse estudo. Assim, o equipamento HCoF_{1b} também pode ser proposto como uma ótima opção para operações de classificação.

4.3. ESTUDO DE DESEMPENHO DOS HIDROCICLONES PERTENCENTES AO CASO 3A (MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE EULER PARA HIDROCICLONES HCiCoF)

Nesta seção apresentam-se os resultados experimentais para os hidrociclones cilíndrico-cônico filtrante e convencional na geometria otimizada HCiCoF-OT3 obtida por Salvador (2017) para o Caso 3a (Minimização do Número de Euler com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$). No presente estudo denominou-se HCiCoF_{3a} o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante e HCon_{3a} o hidrociclone convencional dessa geometria.

Apresentam-se, na Figura 4.3-1, os valores para a vazão de filtrado obtidos para o hidrociclone HCiCoF_{3a} nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental.

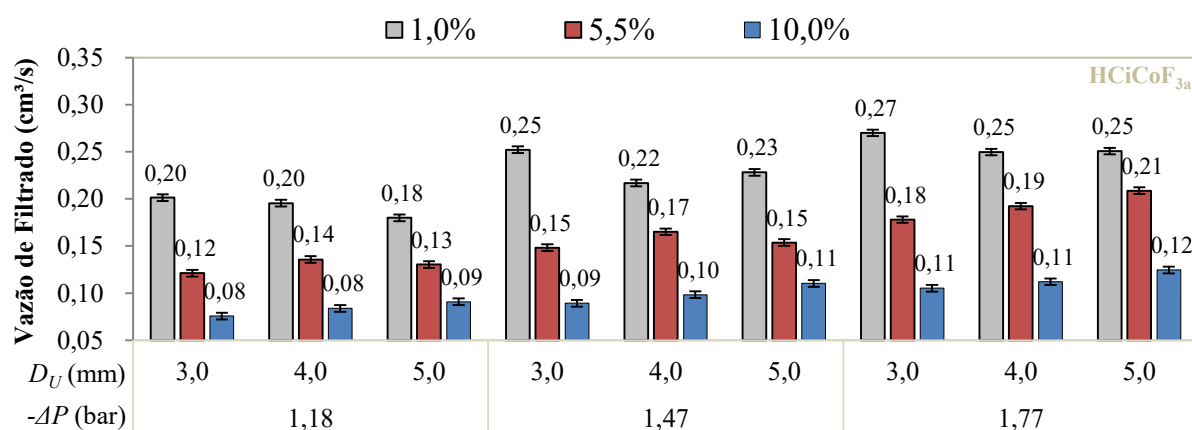


Figura 4.3-1 – Vazão de filtrado para os hidrociclones HCiCoF_{3a}.

Através da Figura 4.3-1, é possível observar que a vazão de filtrado atingiu valores de 0,08 a 0,27, representando no máximo 0,05 % da vazão de alimentação. Para essa geometria também foi possível observar a redução da vazão de filtrado com o aumento da concentração de sólidos na alimentação. Este comportamento pode estar relacionado com a redução da velocidade tangencial do fluido, provocada pelo aumento da interação partícula-partícula que ocorre com o aumento da concentração de sólidos no interior do equipamento. Além disso, é possível observar que o aumento da queda de pressão atuou aumentando a vazão de filtrado para o equipamento cilíndrico-cônico-filtrante.

4.3.1. VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO E NÚMERO DE EULER

A vazão de alimentação para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}, nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental são apresentadas nas Figuras 4.3-2, 4.3-3 e 4.3-4.

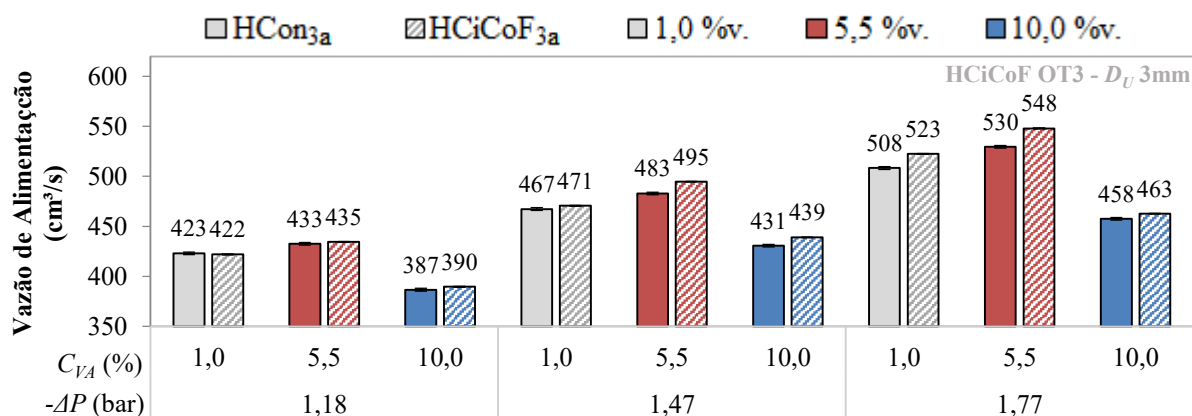


Figura 4.3-2 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}, $D_U = 3$ mm.

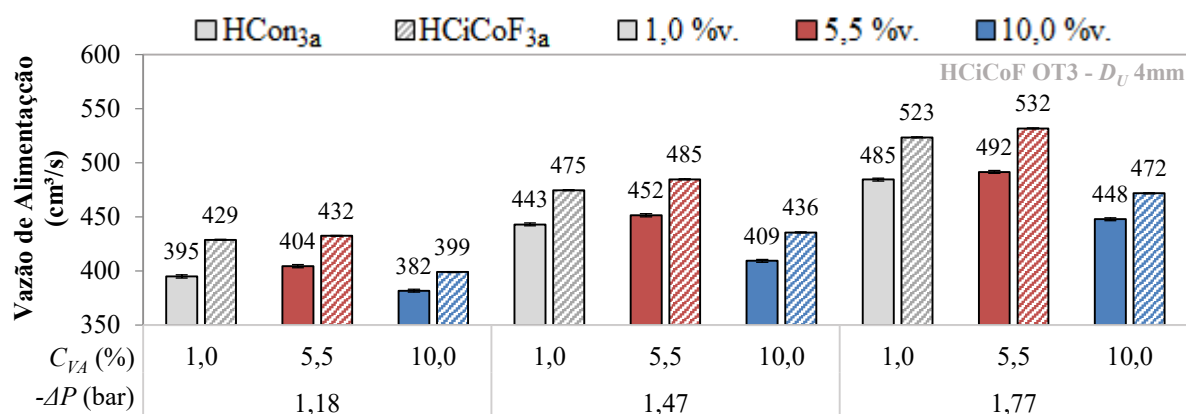


Figura 4.3-3 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}, $D_U = 4$ mm.

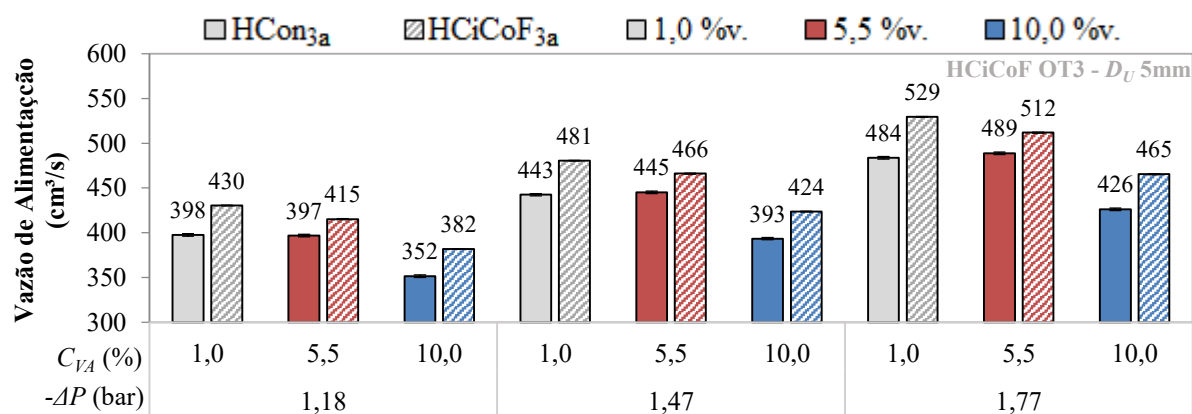


Figura 4.3-4 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}, $D_U = 5$ mm.

Conforme pode ser observado nas Figuras 4.3-2, 4.3-3 e 4.3-4, a operação do hidrociclone HClCoF_{3a} também provocou o aumento da vazão de suspensão alimentada no separador, em comparação ao seu similar convencional, para todas as condições experimentais estudadas. A vazão de alimentação variou de 351 a 529 cm³/s para o hidrociclone convencional e de 382 a 548 cm³/s para o equipamento filtrante. Foi observado um aumento de 5,3 % em média na vazão de alimentação para o hidrociclone HClCoF_{3a} em comparação com o convencional.

Nas Figuras 4.3-5, 4.3-6 e 4.3-7 apresentam-se os resultados de número de Euler obtidos para os equipamentos filtrante (HClCoF_{3a}) e convencional (HCon_{3a}). De acordo com os resultados experimentais, o número de Euler variou de 590 a 828 para HClCoF_{3a} e de 631 a 974 para o convencional HCon_{3a}.

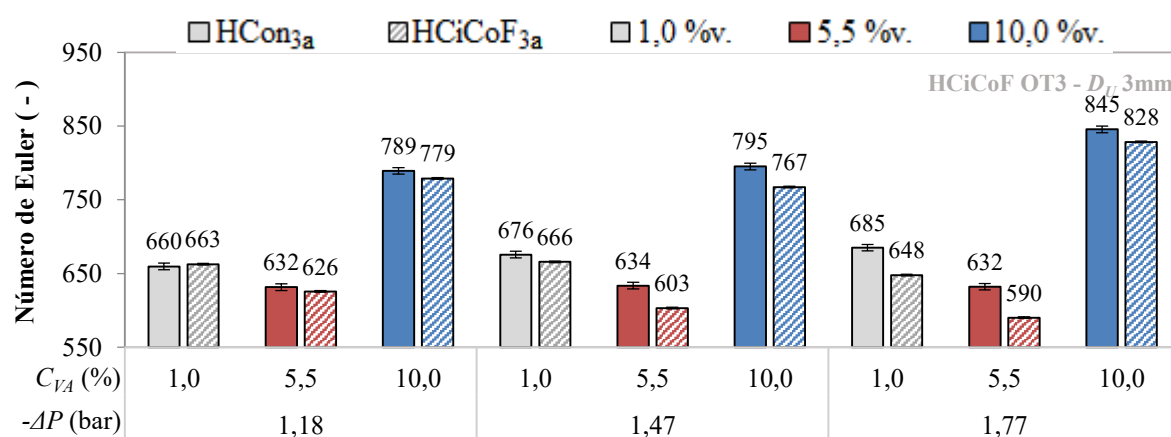


Figura 4.3-5 – Número de Euler para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 3$ mm.

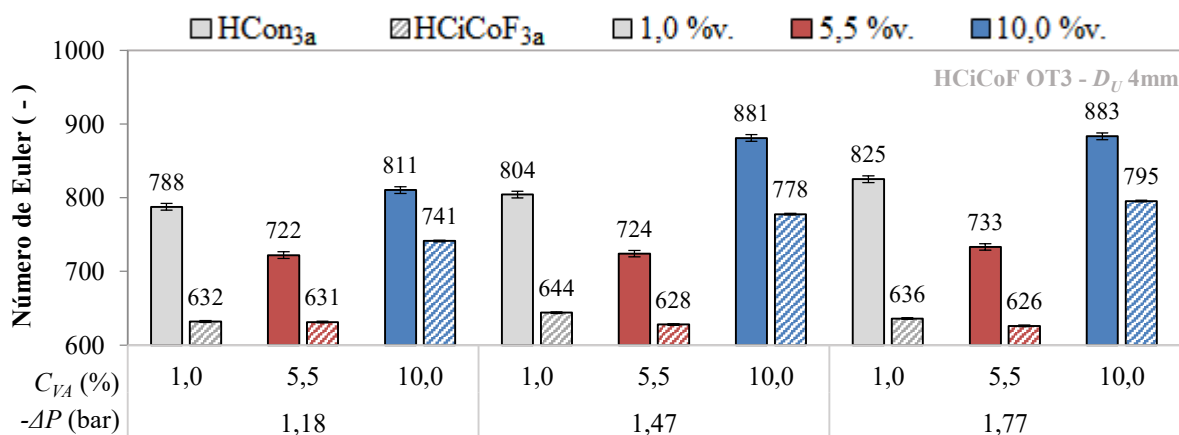


Figura 4.3-6 – Número de Euler para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 4$ mm.

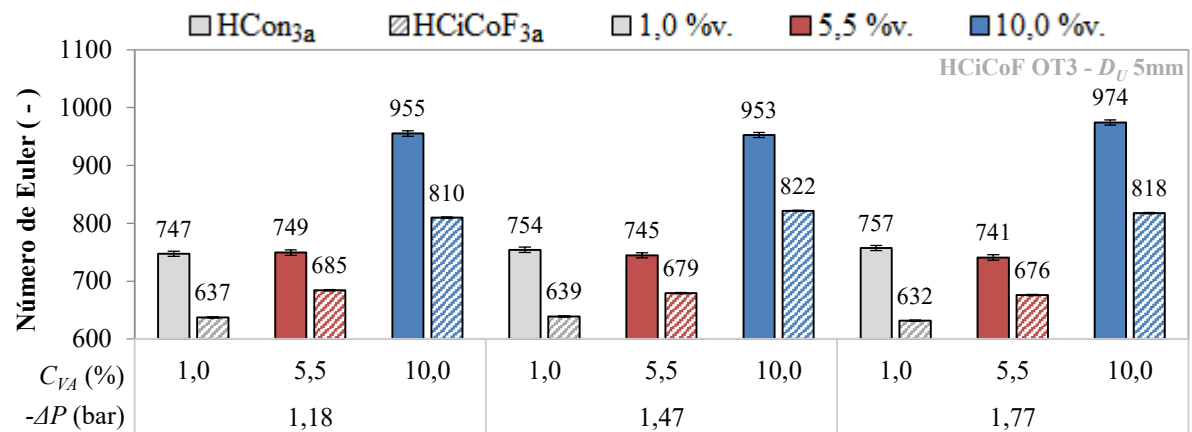


Figura 4.3-7 – Número de Euler para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 5$ mm.

Assim como fora observado nas seções anteriores, houve a redução nos valores de número de Euler para o equipamento filtrante em comparação ao equipamento convencional. Neste caso, foi observada uma redução média de 10,3 % no número de Euler para o equipamento cilíndrico-cônico filtrante HClCoF_{3a}.

Ainda, através dos gráficos é possível observar que a vazão de alimentação e o número de Euler também sofreram alterações de acordo com os níveis de concentração de sólidos na alimentação, diâmetros de *underflow* e queda de pressão utilizados. A fim de quantificar a influência das variáveis estudadas em relação à vazão de alimentação (Q) e ao número de Euler (Eu) dos hidrociclones HClCoF_{3a}, foram realizadas regressões múltiplas dos dados dos planejamentos experimentais. Os efeitos das variáveis podem ser consultados na Tabela 4.3-1.

Tabela 4.3-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HClCoF_{3a}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	462,16	1,616	0,0000	691,9	3,82	0,0000
X_1 (Linear)	-45,98	4,085	0,0000	149,1	9,62	0,0000
X_1 (Quadrático)	27,97	3,316	0,0000	-79,9	7,87	0,0000
X_2 (Linear)	-8,77	4,085	0,0425	25,2	9,62	0,0158
X_2 (Quadrático)	–	–	–	-18,6	7,87	0,0275
X_3 (Linear)	92,58	4,085	0,0000	–	–	–
$X_1 X_2$ (Cruzado)	–	–	–	23,9	11,79	0,0543
$X_1 X_3$ (Cruzado)	-10,84	5,003	0,0408	21,3	11,79	0,0843
R^2	0,97			0,94		

De acordo com os valores dos efeitos, a variável que mais influenciou na vazão de alimentação foi a queda de pressão (X_3). Em seguida, as variáveis concentração de sólidos na alimentação (C_{VA} ou X_1) e o diâmetro de *underflow* (D_U ou X_2), nessa ordem, foram aquelas que apresentaram efeito sobre a vazão de alimentação.

Em relação à variação da queda de pressão, incrementos em X_3 aumentaram a vazão volumétrica alimentada para o hidrociclone filtrante. Para a concentração de alimentação de 1,0 %v., ao se passar da condição de 1,18 bar de queda de pressão para 1,47 bar, houve um acréscimo de aproximadamente 11,3 % na vazão alimentada, e de 10,5 % quando a queda de pressão foi alterada de 1,47 para 1,77 bar. Comportamento semelhante foi observado ao operar com a suspensão de alimentação mais concentrada. Para C_{VA} igual a 10,0 %v., houve um acréscimo de aproximadamente 10,9 % na vazão alimentada ao variar a queda de pressão de 1,18 bar para 1,47 bar, e de 7,8 % quando a queda de pressão foi alterada de 1,47 a 1,77 bar.

Incrementos em C_{VA} inicialmente aumentaram a vazão volumétrica alimentada, no entanto, aumentar mais a concentração da suspensão alimentada acarretou uma redução nessa resposta. Esse comportamento não linear é expresso pelo efeito quadrático da variável X_1 sobre a resposta Q . Para os hidrociclones com diâmetro de *underflow* de 3 mm foi observado um aumento médio na vazão de alimentação de 4,3 % ao se passar da condição de 1,0 %v. para 5,5 %v. de C_{VA} . Já, nas condições em que a concentração de sólidos na alimentação foi alterada de 5,5 % para 10,0 %, em volume, houve uma redução de 12,4 % em Q . Para um diâmetro de *underflow* de 5 mm houve uma redução de 3,3 % ao alterar a concentração de sólidos da suspensão alimentada de 1,0 %v. para 5,5 %v. e de 8,7 % quando C_{VA} foi incrementada de 5,5 % para 10,0 %, em volume.

O número de Euler também foi afetado por essa variável, sendo que X_1 teve o maior efeito sobre essa resposta. Para o nível superior de C_{VA} (10,0 %v.), o número de Euler atingiu o maior patamar para todas as condições. Sabe-se que ao aumentar a quantidade de sólidos na suspensão, regiões densas podem ser formadas dentro do hidrociclone, principalmente em direção à parte inferior da seção cônica, que dissipam energia por meio de efeitos viscosos (Davailles *et al.* 2012; Kuang *et al.*, 2012). Esse efeito pode ter sido intensificado para este equipamento devido à sua geometria, na qual a altura da seção cônica era 1,8 vezes menor que a seção cilíndrica.

O número de Euler e a vazão de alimentação também foram modificados pelo diâmetro de *underflow*. Era de se esperar que menores diâmetros de *underflow* aumentassem as restrições ao escoamento na base do troco de cone, promovendo o aumento da perda de carga no

equipamento e, por conseguinte, o aumento do número de Euler e a redução da vazão de suspensão alimentada ao equipamento. O que de fato aconteceu para a menor concentração de sólidos na alimentação. No entanto, na operação de suspensões mais concentradas utilizando os hidrociclones de geometria HCiCoF-OT3 foi observado o comportamento oposto. A vazão de alimentação respondeu inversamente às variações em D_U (efeito de sinal negativo), enquanto o número de Euler respondeu diretamente às variações no diâmetro de *underflow* (efeito de sinal positivo) com comportamento não linear.

Houve um acréscimo de aproximadamente 0,9 % na vazão alimentada ao se passar da condição de 3 mm de diâmetro de *underflow* para 4 mm, e de 0,9 % quando o D_U foi alterado de 4 para 5 mm, para as condições em que se operou com 1,0 %v. de concentração de sólidos na alimentação. Para a condição mais concentrada ($C_{VA} = 10,0$ %v.) foi observado um aumento médio de 1,2 % ao alterar de 3 para 4 mm o diâmetro de *underflow*; já ao aumentar D_U de 4 para 5 mm houve redução média de 2,8 % na vazão de alimentação. Para a condição intermediária de C_{VA} (5,5 %v.) também foram observadas reduções na vazão de alimentação com o aumento do diâmetro de *underflow*, sendo que Q foi reduzida em 1,8 % ao trocar o D_U de 3 para 4 mm, e em 3,9 % ao se passar de um D_U de 4 mm para 5 mm.

Um comportamento similar foi relatado por Gonçalves (2016) ao estudar o hidrociclone HFOT3 e por Ascendino (2019) para o equipamento HCiF-OT2. Ambos são equipamentos com características de um hidrociclone concentrador, assim como os hidrociclones de geometria HCiCoF-OT3. Logo, acredita-se que a influência do diâmetro de *underflow* neste resultado esteja diretamente associada com a geometria do hidrociclone.

Conforme indicado na Tabela 3.2-1, esse equipamento tem a maior seção cilíndrica e menor seção cônica dentre os estudados. Com o aumento de D_U mais partículas são direcionadas para o *underflow*. Em condições de maior C_{VA} , esse comportamento pode levar a um extensivo aumento da concentração de partículas na região cônica do hidrociclone e a velocidade tangencial do fluido seria reduzida em virtude desse efeito de concentração. Esse efeito ainda pode ter sido intensificado devido à pequena seção cônica do equipamento. Segundo Silva (2014), acredita-se que a filtração na região cônica é um fator determinante para a fluidodinâmica do escoamento da suspensão, para a migração de correntes na direção radial do hidrociclone, para a perda de carga e consumo energético durante a operação.

Além disso, observa-se uma interação entre a concentração de alimentação (X_1) e as variáveis diâmetro de *underflow* (X_2) e queda de pressão (X_3), através dos efeitos combinados entre os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 . Os efeitos citados podem ser observados nas superfícies de

resposta para a vazão de alimentação e o número de Euler das Figura 4.3-9 e 4.3-9, respectivamente.

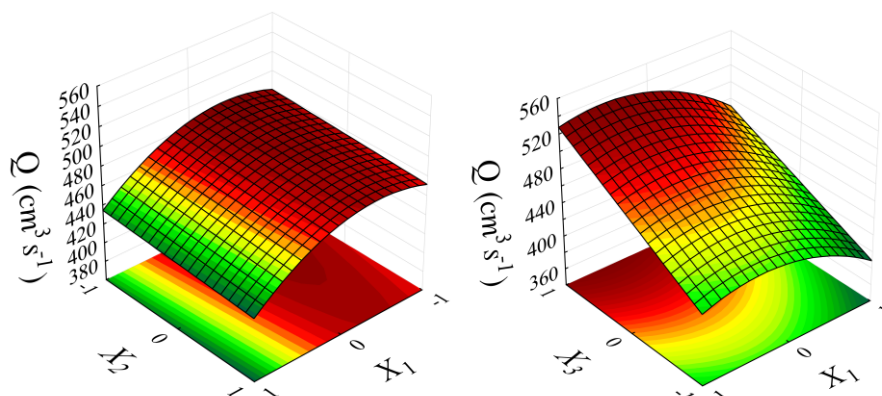


Figura 4.3-8 – Superfícies de Resposta para vazão de alimentação (Q) do hidrociclone HCiCoF_{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

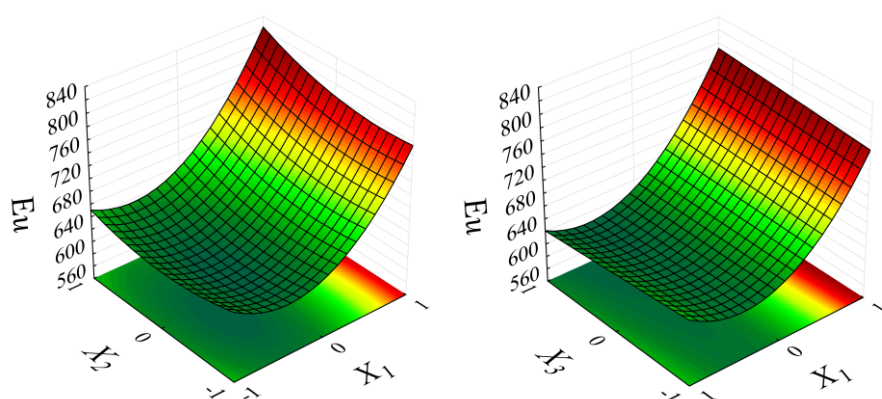


Figura 4.3-9 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HCiCoF_{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A partir da análise das superfícies de resposta, nota-se que há uma coincidência entre as faixas operacionais que minimizam Euler e aumentam a capacidade de processamento, conforme esperado. As condições que minimizam o consumo energético para os equipamentos com a geometria HCiCoF_{3a} são encontradas ao diminuir X_2 , utilizando menores diâmetros de *underflow*, e para os níveis intermediários da variável X_1 . Sendo assim, o menor número de Euler praticado para equipamentos de geometria HCiCoF-OT3 ($Eu = 590$) foi obtido para o equipamento filtrante operando com suspensão com 5,5 %v. de sólidos ($X_1 = 0$), D_U de 3 mm ($X_2 = -1$) e 1,77 bar ($X_3 = +1$).

Visando quantificar a influência da filtração para o número de Euler e vazão de alimentação dos equipamentos de geometria HCiCoF-OT3, foi realizada uma análise dos dados obtidos pelos planejamentos para o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante e convencional na

forma de um planejamento combinado. O efeito da filtração (X_4) e de interação com as demais variáveis podem ser observados na Tabela 4.3-2.

Tabela 4.3-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	450,33	1,055	0,0000	733,43	3,914	0,0000
X_1 (Linear)	-42,99	2,666	0,0000	140,69	9,891	0,0000
X_1 (Quadrático)	27,56	2,164	0,0000	-92,87	8,030	0,0000
X_2 (Linear)	-20,63	2,666	0,0000	69,71	9,891	0,0000
X_3 (Linear)	87,89	2,666	0,0000	–	–	–
X_4 (Linear)	23,69	2,100	0,0000	-83,46	7,793	0,0173
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-6,18	3,265	0,0642	29,81	12,114	0,0126
$X_1 X_3$ (Cruzado)	-9,54	3,265	0,0053	–	–	–
$X_1 X_4$ (Cruzado)	11,86	2,666	0,0001	-44,53	-44,532	0,0000
R^2	0,97			0,91		

Assim como observado para os demais equipamentos, o efeito da variável X_4 também foi significativo para Q e Eu de acordo com a regressão. O sinal negativo indica que a incorporação de paredes filtrantes (HClCoF_{3a}) reduziu o consumo energético desses equipamentos, evidenciado pela redução do número de Euler para a modalidade cilíndrico-cônico-filtrante (Figuras 4.3-5, 4.3-6 e 4.3-7).

Além disso, observa-se uma interação entre as variáveis concentração de alimentação (X_1) e filtração (X_4), através do efeito cruzado para o par X_1 - X_4 . Para tanto, no processamento de suspensões diluídas há um grande aumento da capacidade de processamento para o hidrociclone filtrante em comparação ao convencional, enquanto para as suspensões concentradas essa diferença é reduzida consideravelmente. O aumento da quantidade de sólidos no equipamento e formação de regiões de alta densidade, principalmente na parte cônica do equipamento, conforme C_{VA} é aumentada, pode explicar esse comportamento.

4.3.2. RAZÃO DE LÍQUIDO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DO *UNDERFLOW*

Nas Figuras 4.3-10, 4.3-11 e 4.3-12 apresentam-se os dados experimentais para a concentração volumétrica de sólidos do *underflow* obtidos para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a}. Observa-se um extenso intervalo de valores encontrados para a concentração do *underflow*, que variou entre 4,3 % a 45,5 % para o equipamento cilíndrico-cônico-filtrante e de 7,2 % a 46,2 % para o convencional.

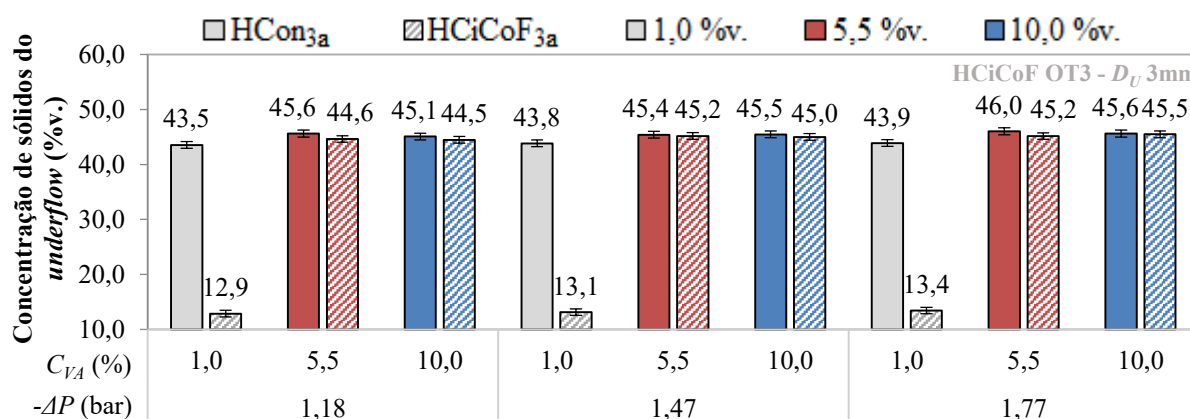


Figura 4.3-10 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 3$ mm.

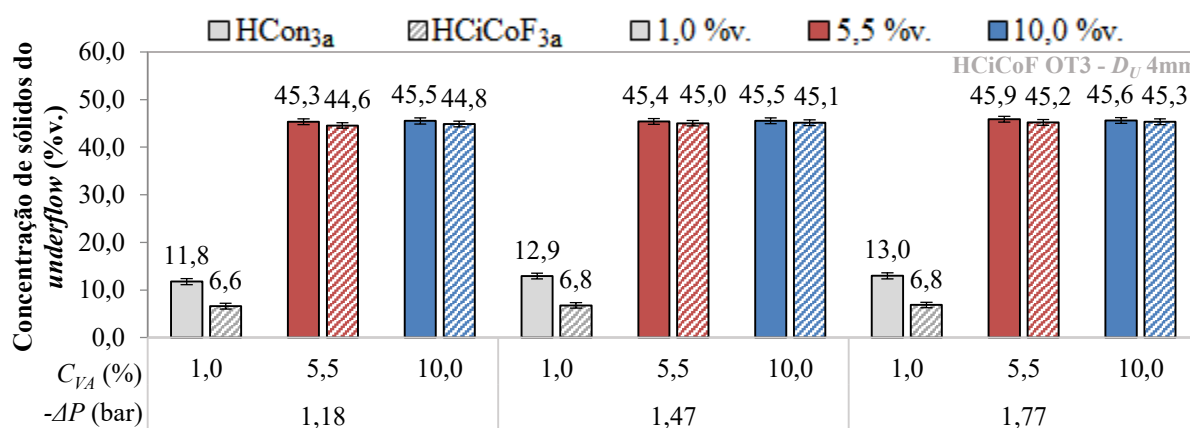


Figura 4.3-11 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 4$ mm.

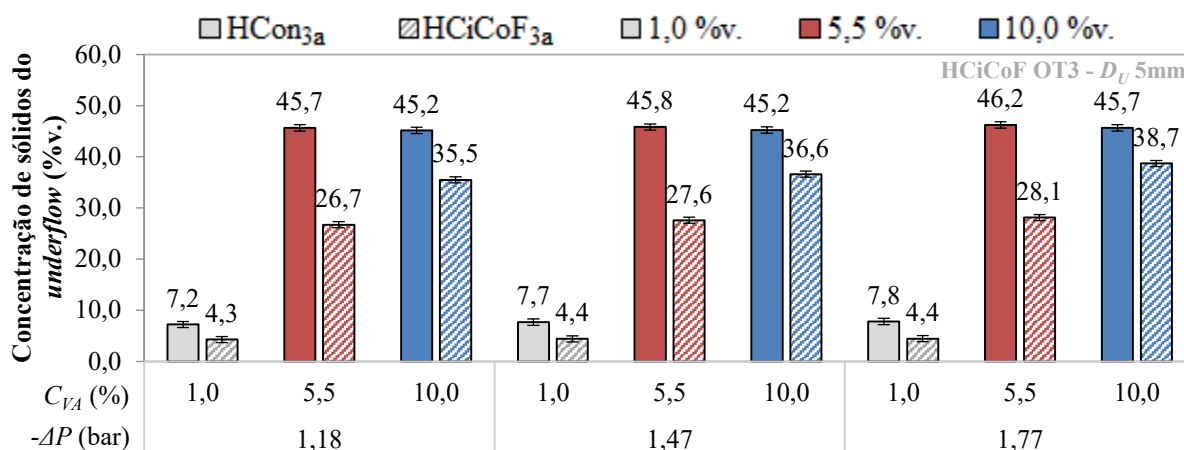


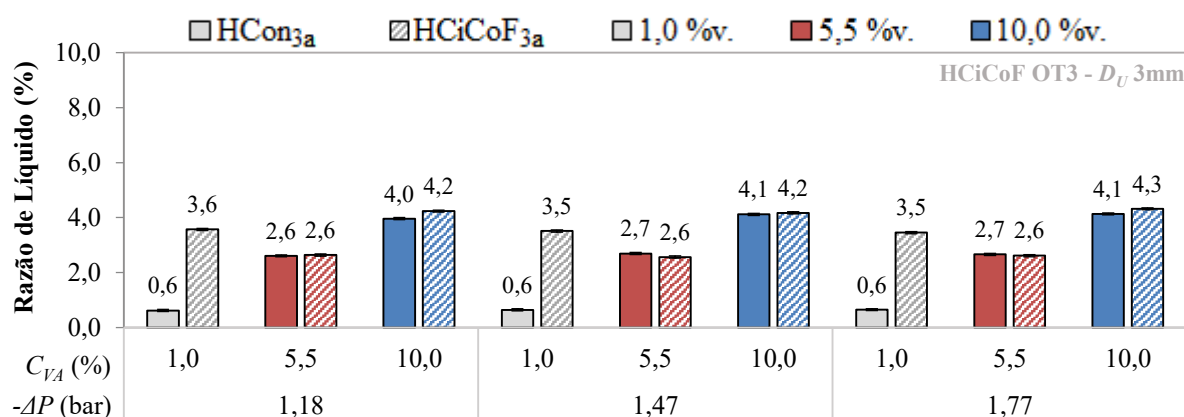
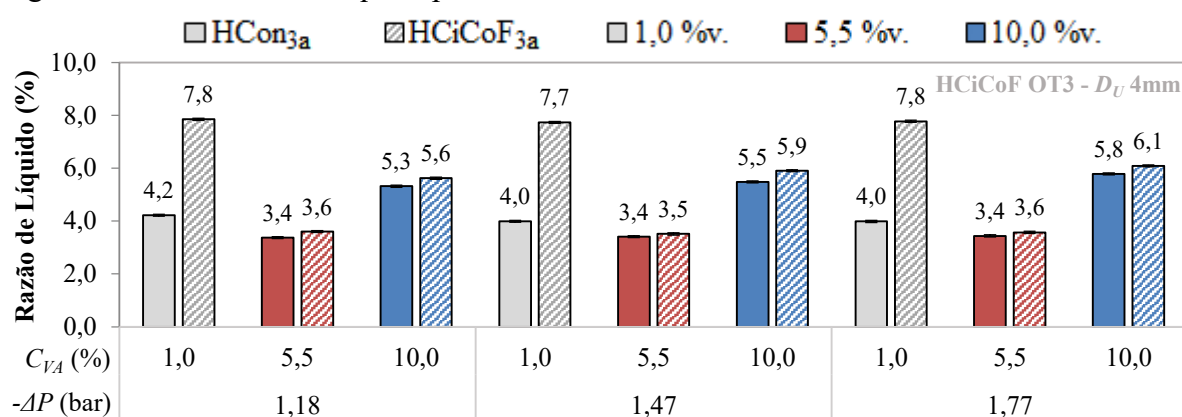
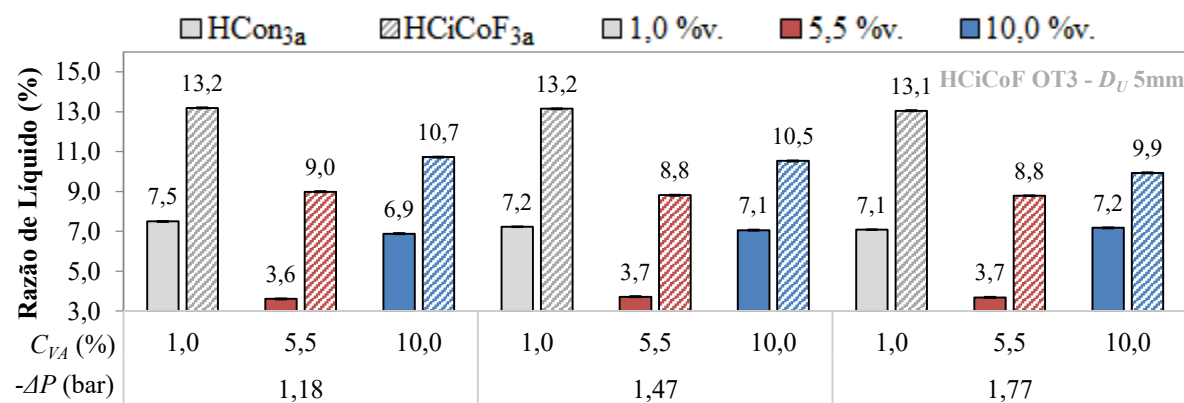
Figura 4.3-12– Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 5$ mm.

Através dos dados apresentados é possível observar que, em média, foram observados decréscimos de 24 % na concentração do *underflow* para o HCiCoF_{3a} em relação ao HCon_{3a}. No entanto, nota-se que esse efeito foi menos pronunciado ao operar com sistemas contendo maiores concentrações de sólidos. Foi observado um acréscimo de 52,8 % na concentração de sólidos do *underflow* do equipamento convencional em comparação ao filtrante para o sistema mais diluído ($C_{VA} = 1,0$ %v.), enquanto para o sistema mais concentrado ($C_{VA} = 10,0$ %v.) a diferença foi apenas de 6,8 %.

Ainda, observa-se que C_{VU} foi estatisticamente igual entre os hidrociclones filtrante e o convencional quando utilizados menores diâmetros de *underflow* ($D_U = 3$ e 4 mm) e maiores percentagens de sólidos na alimentação ($C_{VA} = 5,5$ % e 10,0 %v.). Conforme discutido anteriormente acredita-se que o acúmulo de partículas sólidas na região cônica que ocorre com o aumento da concentração do sistema seja responsável por esse comportamento.

Nas Figuras 4.3-13, 4.3-14 e 4.3-15 apresentam-se os dados experimentais para a razão de líquido obtidos para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm, respectivamente.

Nota-se que a razão de líquido variou de 2,6 % a 13,2 % para o hidrociclone HCiCoF_{3a} e de 0,6 % a 7,5 % para HCon_{3a}. Em todas as condições estudadas os equipamentos apresentaram baixos valores de razão de líquido, indicativo de que somente uma pequena parcela do fluido alimentado deixou o equipamento através do orifício de *underflow*, uma característica marcante em hidrociclones concentradores.


 Figura 4.3-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 3$ mm.

 Figura 4.3-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 4$ mm.

 Figura 4.3-15 – Razão de líquido para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 5$ mm.

De acordo com os dados experimentais apresentados nas Figuras 4.3-13, 4.3-14 e 4.3-15, foi possível observar que a filtração também foi um fator que influenciou a razão de líquido dos equipamentos HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} no sentido de aumentá-la, comportamento esperado devido à redução de C_{vu} . Para o hidrociclone filtrante (HCiCoF_{3a}), foram observados acréscimos médios 92 % na razões de líquido, em relação ao convencional de mesma geometria. No entanto, também foi observado que para as condições de menores diâmetros de *underflow*

($D_U = 3$ e 4 mm) e maiores percentagens de sólidos na alimentação ($C_{VA} = 5,5$ % e $10,0$ %v.) os valores de R_L do equipamento filtrante foram estatisticamente iguais aos do convencional.

Acredita-se que também houve uma interação entre os efeitos da filtração e C_{VA} para a R_L desses equipamentos, visto que nas condições em que se operou com $1,0$ %v. de sólidos na alimentação foi observado um aumento médio de $208,5$ % em R_L para os separadores filtrantes, enquanto que essa diferença caiu para 48 % ao se utilizar uma suspensão com C_{VA} de $5,5$ %v. Ao elevar novamente a percentagem de sólidos na alimentação ($C_{VA} = 10,0$ %v.) a diferença média entre R_L nas duas modalidades foi de $19,4$ %.

A fim de quantificar e confirmar os efeitos observados para C_{VU} e R_L nos equipamentos HClCoF_{3a} e HCon_{3a}, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais desses equipamentos para as variáveis C_{VA} (X_1), D_U (X_2) e $-ΔP$ (X_3). Na Tabela 4.3-3 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a}.

Tabela 4.3-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração do *underflow* e razão de líquido do hidrociclone HClCoF_{3a}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	30,04	0,572	0,0000	6,631	0,0985	0,0000
X_1 (Linear)	34,25	1,440	0,0000	-1,305	0,2481	0,0000
X_1 (Quadrático)	14,48	1,178	0,0000	-2,574	0,2029	0,0000
X_2 (Linear)	-11,45	1,439	0,0000	7,346	0,2481	0,0000
X_2 (Quadrático)	4,17	1,178	0,0016	-1,481	0,2029	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	–	–	–	-1,732	0,3039	0,0000
R^2	0,97			0,98		

As variáveis que mais influenciaram na concentração volumétrica de sólidos do *underflow* dos equipamentos HClCoF_{3a} e HCon_{3a} foram, respectivamente, X_1 (C_{VA}) e X_2 (D_U). Já para a razão de líquido, foram X_2 (D_U) e X_1 (C_{VA}). Em consonância com as análises realizadas anteriormente, observou-se um efeito oposto na concentração do *underflow* e na razão de líquido para variações da concentração de sólidos na alimentação (X_1), no entanto esse foi mais pronunciado para C_{VU} . O mesmo foi observado para a variável D_U (X_2), uma vez que menores diâmetros de *underflow* tendem a restringir o escoamento e reduzir a quantidade de líquido direcionado ao duto de *underflow*. No entanto, o comportamento observado dessas variáveis

sobre as respostas C_{VU} e R_L não é linear, devido aos efeitos quadráticos estatisticamente significativos de X_1 e de X_2 . Esse comportamento também foi relatado por Almeida (2008) e Silva (2014), aparentemente esse fenômeno pode ter ocorrido em virtude das migrações de correntes que compõem os vórtices do hidrociclone, ocasionadas pela retirada de líquido na parede cônica.

Também pode ser observado que houve um efeito combinado considerável entre a concentração da alimentação e o diâmetro de *underflow*, par X_1 - X_2 , para R_L . Os efeitos citados podem ser melhor observados nas superfícies de resposta para C_{VU} e R_L na Figura 4.3-16.

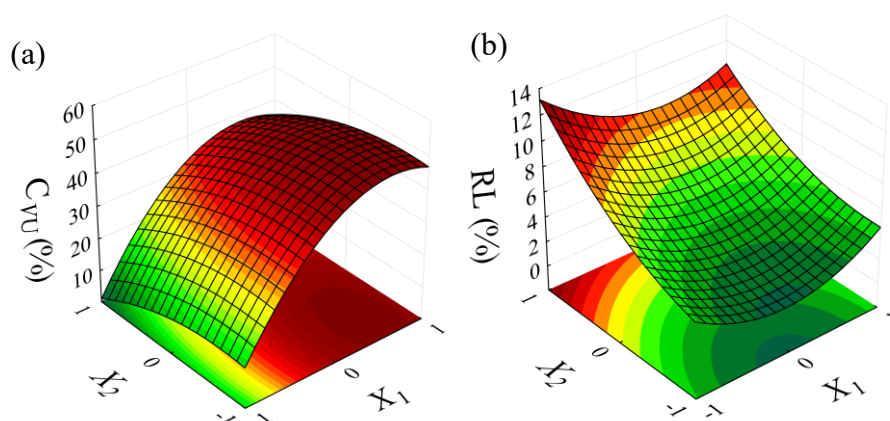


Figura 4.3-16 – Superfícies de Resposta para (a) concentração de sólidos do *underflow* e (b) razão de líquido do hidrociclone HCiCoF_{3a} segundo o par X_1 - X_2 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A fim de quantificar e confirmar os efeitos da filtração (X_4) observados para C_{VU} e R_L nos equipamentos HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais desses equipamentos, na forma de um planejamento combinado para as variáveis C_{VA} (X_1), D_U (X_2), $-\Delta P$ (X_3) e filtração (X_4). Na Tabela 4.3-4 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido.

Tabela 4.3-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido dos hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	33,84	0,719	0,0000	5,45	0,111	0,0000
X_I (Linear)	29,19	1,818	0,0000	–	–	–
X_I (Quadrático)	13,67	1,476	0,0000	-2,04	0,229	0,0000
X_2 (Linear)	-11,72	1,818	0,0000	5,44	0,280	0,0000
X_2 (Quadrático)	–	–	–	-0,68	0,229	0,0046
X_4 (Linear)	-7,15	1,432	0,0000	2,24	0,221	0,0000
$X_I X_2$ (Cruzado)	9,22	2,227	0,0001	-1,78	0,343	0,0000
$X_I X_4$ (Cruzado)	5,05	1,818	0,0076	-1,43	0,280	0,0000
R^2	0,90			0,93		

Na Tabela 4.3-4 nota-se que a filtração afetou significativamente tanto a concentração de sólidos do *underflow* quanto a razão de líquido dos hidrociclones, conforme foi previsto a partir da análise dos dados experimentais. Também pode ser observado que houve um efeito combinado considerável entre a concentração da alimentação e a filtração, par X_I - X_4 . É possível constatar que ao operar sistemas concentrados ($X_I = +1$), o efeito observado de aumento da razão de líquido e redução em C_{VU} devido à filtração ($X_4 = +1$) é menos expressivo.

Tendo em vista que todos os equipamentos filtrantes foram beneficiados com a redução de consumo energético (Euler), esse resultado corrobora a aplicabilidade dos hidrociclones de geometria HCiCoF-OT3 em operações de espessamento para sistemas com alta concentração de sólidos na alimentação.

4.3.3. EFICIÊNCIA TOTAL E DIÂMETRO DE CORTE

Nas Figuras 4.3-17, 4.3-18 e 4.3-19 apresentam-se os dados experimentais para a eficiência total de separação obtidos para os equipamentos HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}. De acordo com as informações apresentadas, a eficiência total alcançou patamares de 29,6 % a 59,5 % para o hidrociclone filtrante, enquanto que para o hidrociclone convencional foi observada uma variação de 29,9 % a 62,6 %. A eficiência total foi majorada para o hidrociclone HCiCoF_{3a} em relação ao convencional de mesma geometria a depender das condições operacionais, sendo

que em média foi observado um aumento de 1,5 % em E_T para HCiCoF_{3a} em comparação com HCon_{3a} .

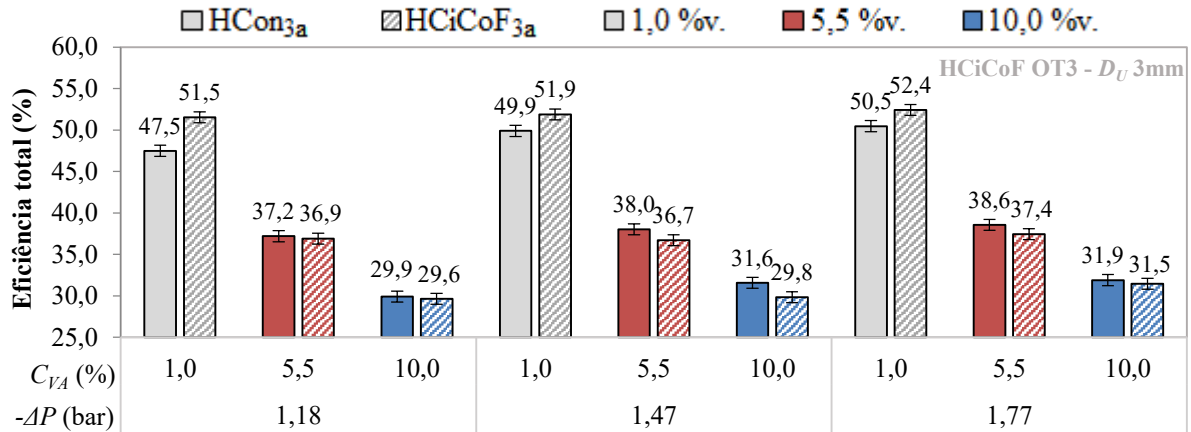


Figura 4.3-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 3$ mm.

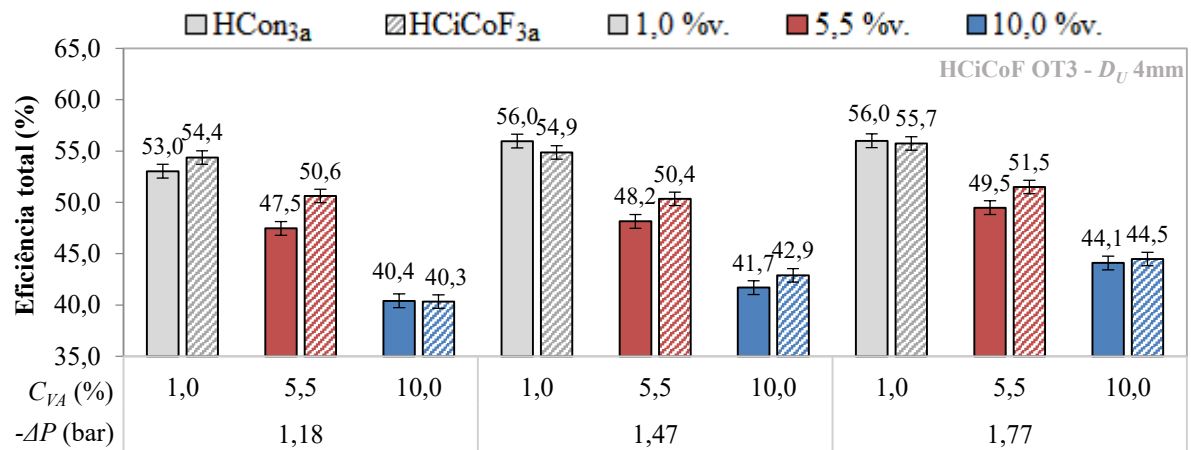


Figura 4.3-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 4$ mm.

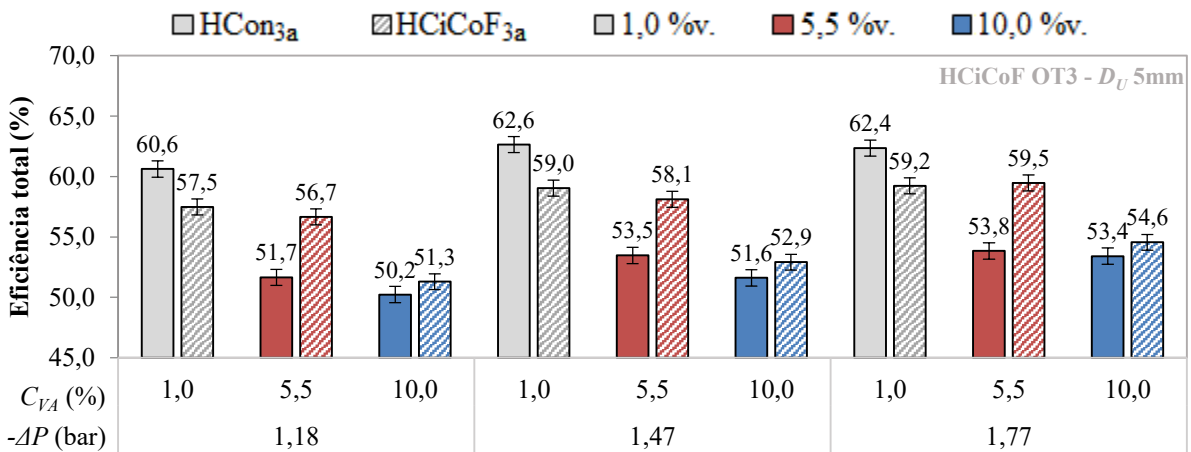


Figura 4.3-19 – Eficiência total para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 5$ mm.

Para a condição mais diluída ($C_{VA} = 1,0$ %v.) o equipamento filtrante apresentou um aumento médio de 5,4 % na eficiência total ao operar com o nível inferior de D_U (3mm), por outro lado, o equipamento convencional promoveu uma eficiência média 5,3 % maior para operação com D_U de 5mm. Para o nível intermediário de C_{VA} (5,5 %) foram obtidas eficiências totais 5,1 % (para $D_U = 4$ mm) e 9,6 % (para $D_U = 5$ mm) maiores para o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante. Nas demais condições operacionais os equipamentos filtrante e convencional apresentaram eficiências totais estatisticamente semelhantes.

Além disso, é possível observar uma forte dependência entre a eficiência total e a concentração de sólidos da alimentação (C_{VA}). Devido ao aumento da concentração de sólidos de alimentação, a eficiência total diminui, haja vista a redução da velocidade tangencial.

Os dados experimentais para os diâmetros de corte obtidos para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a}, são apresentados nas Figuras 4.3-20, 4.3-21 e 4.3-22.

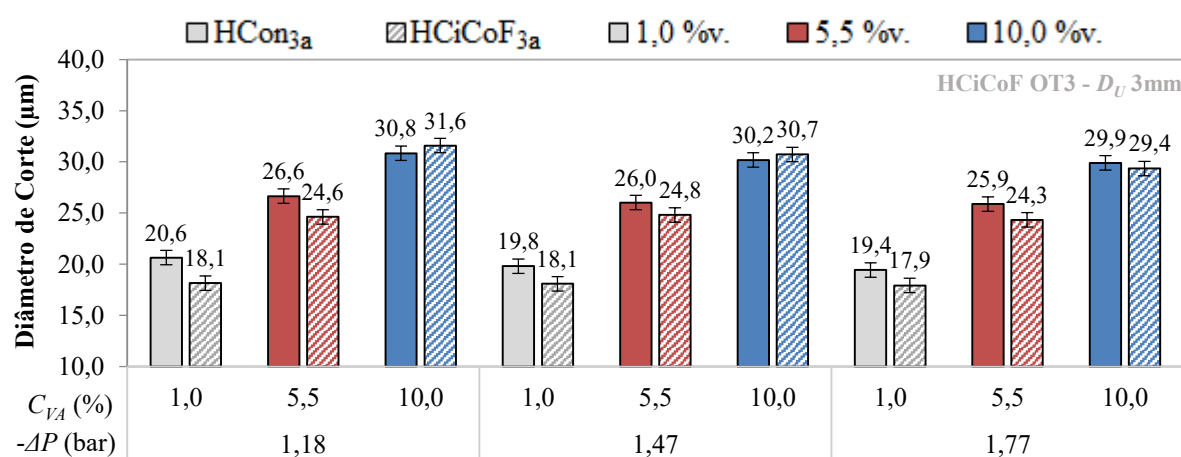


Figura 4.3-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 3$ mm.

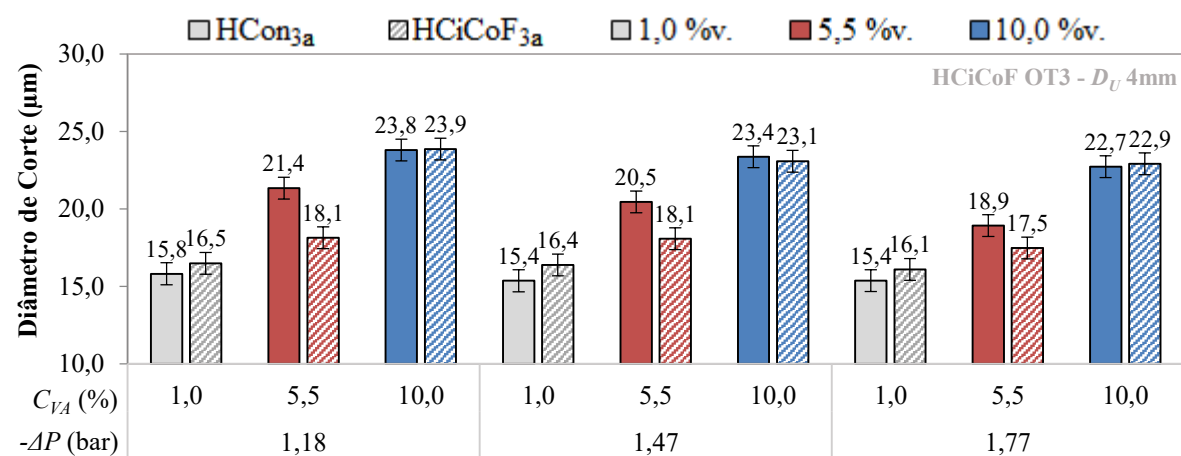


Figura 4.3-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 4$ mm.

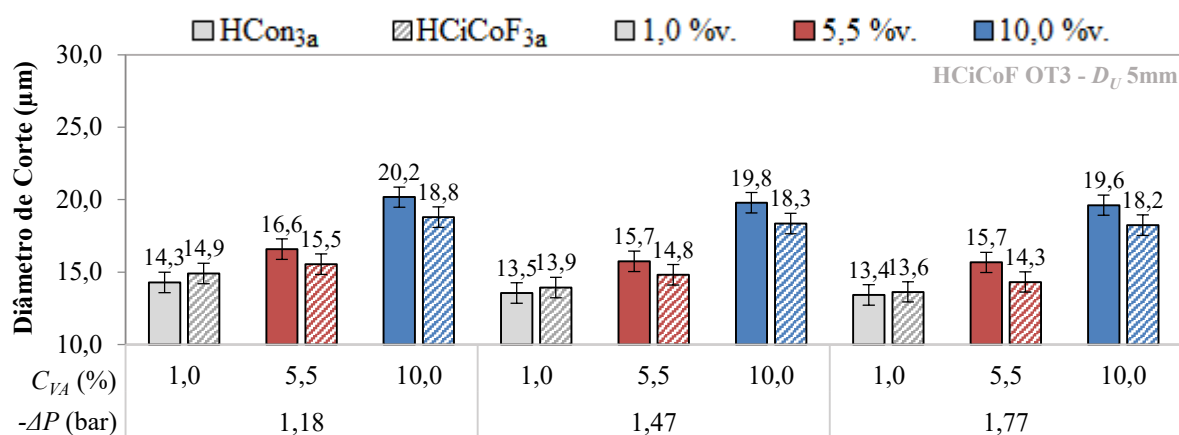


Figura 4.3-22 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a} com $D_U = 5$ mm.

Os valores de diâmetro de corte obtidos variaram entre 13,63 e 31,59 μm para HClCoF_{3a} e de 13,41 a 30,84 μm para HCon_{3a}. O equipamento filtrante foi capaz de coletar partículas com diâmetro de corte 3,6 % menor que o similar convencional, em média. Porém, em algumas condições o diâmetro de corte para o equipamento filtrante em comparação ao convencional foi ainda mais diminuído, observando-se reduções de 9,6 % para operação com $C_{VA} = 1,0$ %v. e $D_U = 3$ mm, 11,6 % para $C_{VA} = 5,5$ %v. e $D_U = 4$ mm, e 7,0 % para $C_{VA} = 10,0$ % e $D_U = 5$ mm.

A fim de averiguar e quantificar os efeitos observados para E_T e d_{50} em relação às variáveis C_{VA} , D_U e $-ΔP$, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais de HClCoF_{3a} e HCon_{3a}. Na Tabela 4.3-5 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte para os hidrociclones HClCoF_{3a} e HCon_{3a}.

Tabela 4.3-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a eficiência total e diâmetro de corte do hidrociclone HClCoF_{3a}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (μm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	73,90	0,247	0,0000	7,34	0,146	0,0000
X_1 (Linear)	-11,54	0,625	0,0000	4,27	0,368	0,0000
X_1 (Quadrático)	–	–	–	-1,61	0,300	0,0000
X_2 (Linear)	14,97	0,625	0,0000	-10,81	0,368	0,0000
X_2 (Quadrático)	2,48	0,507	0,0001	-1,30	0,300	0,0003
X_3 (Linear)	2,80	0,625	0,0001	-1,00	0,367	0,0124
$X_1 X_2$ (Cruzado)	6,46	0,765	0,0000	-3,57	0,450	0,0000
R^2	0,98			0,98		

As variáveis que mais influenciaram a eficiência total e o diâmetro de corte dos equipamentos HClCoF_{3a} e HCon_{3a} foram D_U (X_2), C_{VA} (X_1) e $-\Delta P$ (X_3), nesta ordem.

O diâmetro de *underflow* (D_U ou X_2) e a queda de pressão ($-\Delta P$ ou X_3) apresentaram efeitos favoráveis à separação, coeficiente de sinal positivo para E_T e negativo em relação a d_{50} . Sendo assim, ao aumentá-las eram observados aumentos nas eficiências totais e reduções para os diâmetros de corte, conforme esperado.

Em contrapartida, a concentração de sólidos na alimentação (C_{VA} ou X_1) atuou reduzindo a eficiência total e aumentando o diâmetro das partículas coletadas no *underflow*. Conforme observado por Kuang *et al.* (2012), a redução do movimento espiralado é intensificada com o aumento da concentração de sólidos no sistema.

Os comportamentos da eficiência total e do diâmetro de corte com a alteração das variáveis do planejamento podem ser graficamente observados nas superfícies de resposta das Figura 4.3-23 e Figura 4.3-24.

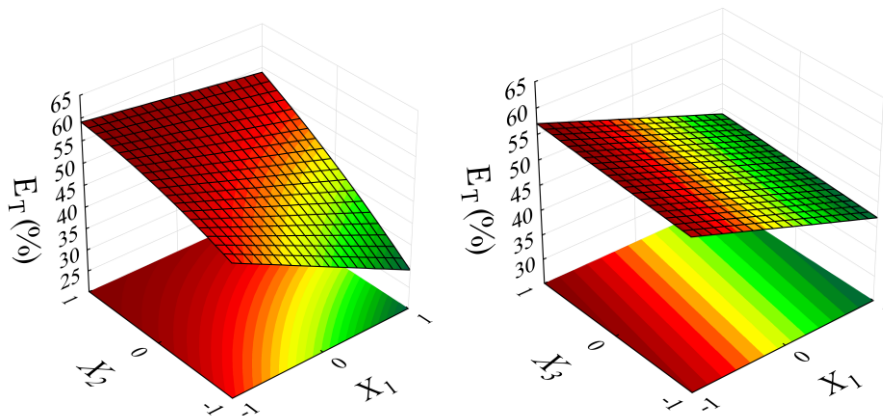


Figura 4.3-23 – Superfícies de Resposta para eficiência total (E_T) do hidrociclone HClCoF_{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

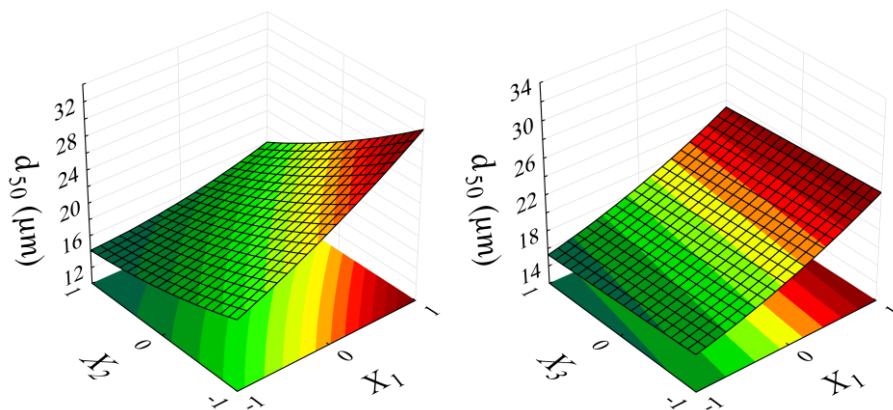


Figura 4.3-24 – Superfícies de Resposta para diâmetro de corte (d_{50}) do hidrociclone HClCoF_{3a} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A fim de averiguar e quantificar os efeitos da filtração observados para E_T e d_{50} , foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais de HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}, na forma de um planejamento combinado. Na Tabela 4.3-6 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte para os hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}.

Tabela 4.3-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCiCoF_{3a} e HCon_{3a}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (µm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	21,06	229,0704	0,0000	20,23	0,103	0,0000
X_1 (Linear)	53,05	-25,4173	0,0000	8,00	0,260	0,0000
X_1 (Quadrático)	43,39	-1,9485	0,0570	—	—	—
X_2 (Linear)	53,05	30,9681	0,0000	-8,75	0,260	0,0000
X_2 (Quadrático)	43,39	3,0021	0,0042	-1,00	0,211	0,0000
X_3 (Linear)	53,05	4,1354	0,0001	-0,94	0,260	0,0007
X_4 (Linear)	41,79	1,7561	0,0852	-0,73	0,205	0,0008
$X_1 X_2$ (Cruzado)	64,97	9,2329	0,0000	-3,11	0,319	0,0000
R^2	0,97			0,98		

Conforme indicado na Tabela 4.3-6, os coeficientes para a variável X_4 indicam que a filtração se apresentou favorável à separação em relação ao aumento da eficiência total (sinal positivo) e redução de d_{50} (sinal negativo). De acordo com o apresentado por Vieira (2006), a saída adicional da corrente de filtrado atua na redução da componente radial da velocidade próximo à parede porosa. Com isso, a migração de partículas entre o vórtice externo e interno é mitigada, mais partículas presentes no vórtice externo permanecem junto à parede do equipamento por mais tempo, aumentando assim suas chances de serem coletadas.

Os resultados apresentados nesta seção indicam os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrante HCiCoF_{3a} e convencional HCon_{3a} como opções vantajosas para o uso industrial. Esses equipamentos apresentaram alta concentração de sólidos e baixas razões de líquido para as três condições de concentração de sólidos em suspensão estudadas.

4.4. ESTUDO DE DESEMPENHO DOS HIDROCICLONES PERTENCENTES AO CASO 3B (MINIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE EULER PARA HIDROCICLONES HCoF)

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais para os hidrociclones cônico-filtrante (HCoF_{3b}) e convencional (HCon_{3b}) de geometria determinada por Salvador (2017) a partir do Caso 3b de otimização (Minimização do Número de Euler com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$) realizado através de uma base de dados de hidrociclones cônico-filtrantes.

Na Figura 4.4-1 apresentam-se os valores para a vazão de filtrado (Q_F) para o hidrociclone HCoF_{3b} nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental. Nota-se que houve uma variação de 0,03 a 0,09 cm^3/s para a vazão de filtrado do equipamento HCoF-OT3, o que representou, no máximo, 0,02 % da vazão alimentada no hidrociclone. O aumento da queda de pressão atuou significativamente sobre a vazão de filtrado, no sentido de aumentá-la. Também é possível observar que o acréscimo à concentração de sólidos na alimentação atuou sobre a vazão de filtrado reduzindo a quantidade de líquido descarregada através das paredes porosas do equipamento. Assim como observado para os demais equipamentos, estima-se que a vazão de filtrado seja capaz de modificar o escoamento do interior do equipamento cônico-filtrante.

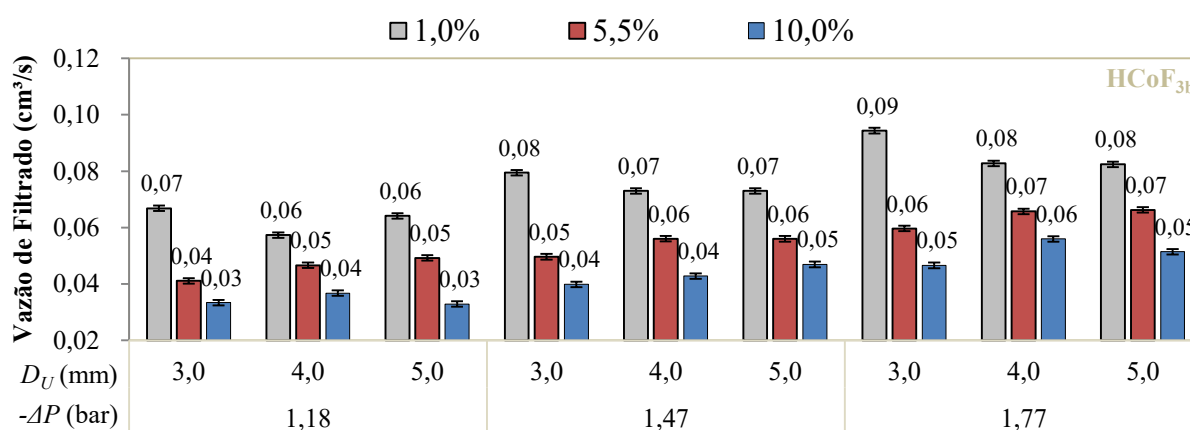


Figura 4.4-1 – Vazão de filtrado para o hidrociclone HCoF_{3b}.

4.4.1. VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO E NÚMERO DE EULER

Nas Figuras 4.4-2, 4.4-3 e 4.4-4 relacionam-se os valores obtidos experimentalmente para a vazão de alimentação para o hidrociclone HCoF_{3b} e para o hidrociclone de mesma geometria na modalidade convencional, HCon_{3b}, nas condições operacionais descritas pelo planejamento experimental. Conforme pode ser observado, a operação do hidrociclone HCoF_{3b}

provocou o aumento da vazão de suspensão alimentada no separador, em comparação ao seu similar convencional, para todas as condições experimentais estudadas.

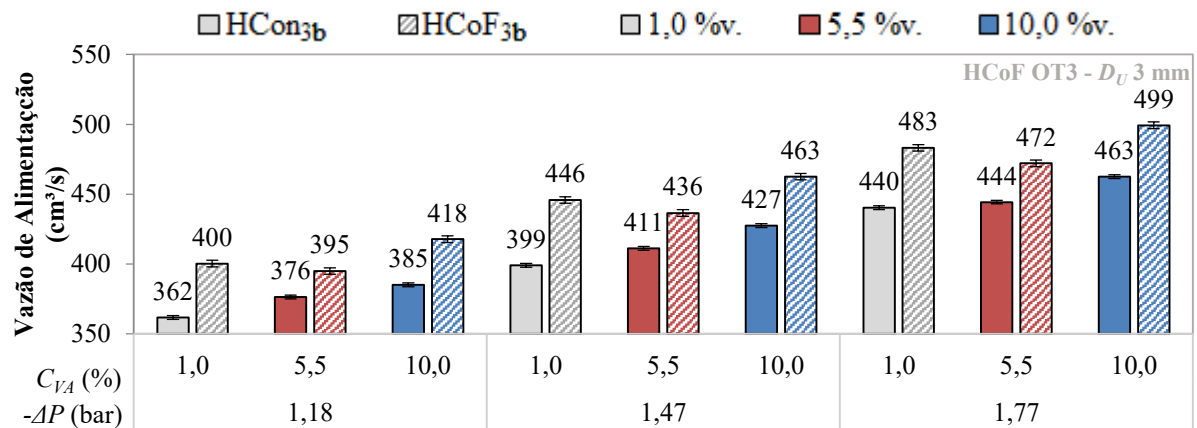


Figura 4.4-2 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} $D_U = 3$ mm.

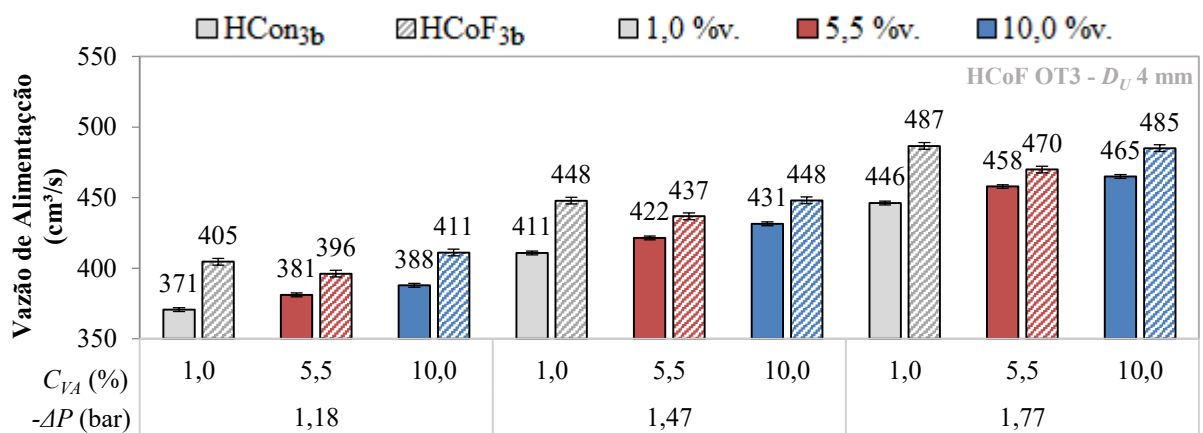


Figura 4.4-3 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} $D_U = 4$ mm.

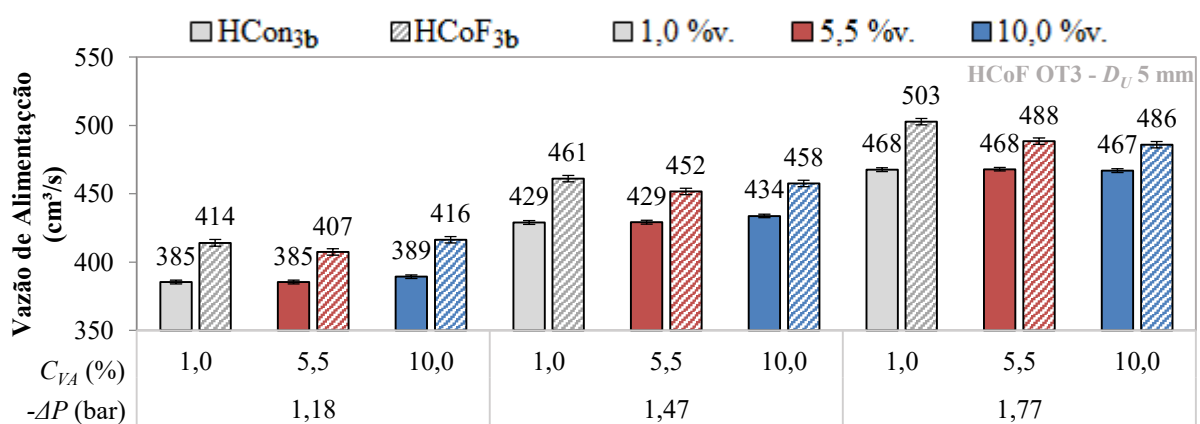


Figura 4.4-4 – Vazão de alimentação para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} $D_U = 5$ mm.

A vazão de alimentação variou de 361,6 a 467,9 cm³/s para o hidrociclone convencional e de 395,0 a 502,7 cm³/s para o equipamento filtrante, sendo observado um aumento de 6,6 % em média na vazão de alimentação para o hidrociclone HCoF_{3b}.

Devido ao aumento da capacidade observado para HCoF_{3b} em relação a HCon_{3b}, espera-se que isso se reflita no número de Euler, que está relacionado com os custos de bombeamento em uma unidade de hidrociclonagem. Nas Figuras 4.4-5, 4.4-6 e 4.4-7 apresentam-se os resultados obtidos para os equipamentos filtrante (HCoF_{3b}) e convencional (HCon_{3b}).

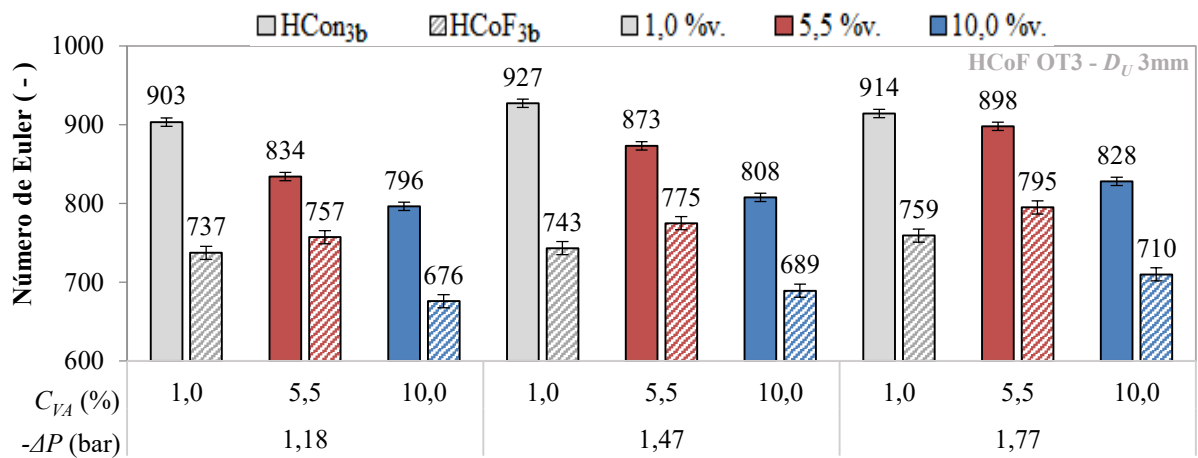


Figura 4.4-5 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 3$ mm.

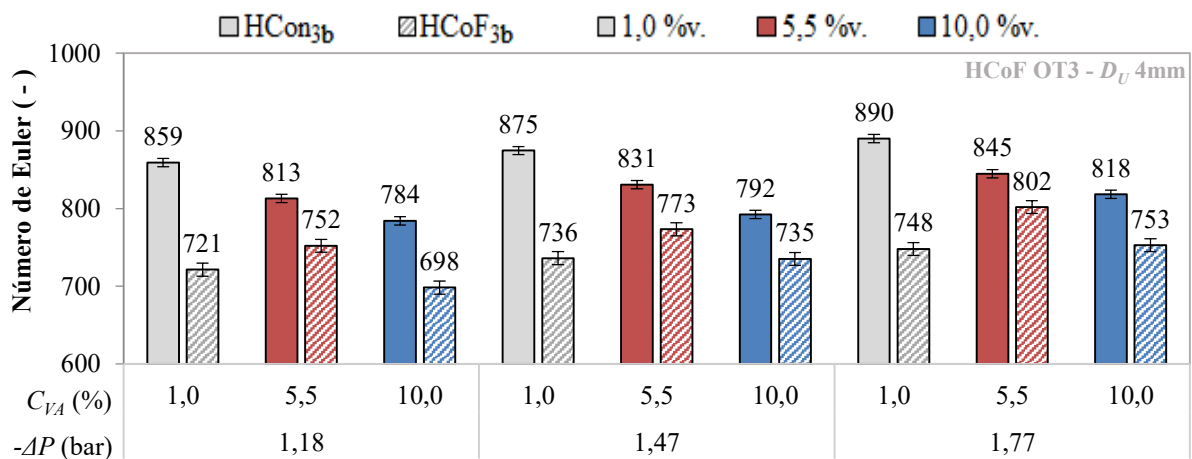


Figura 4.4-6 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 4$ mm.

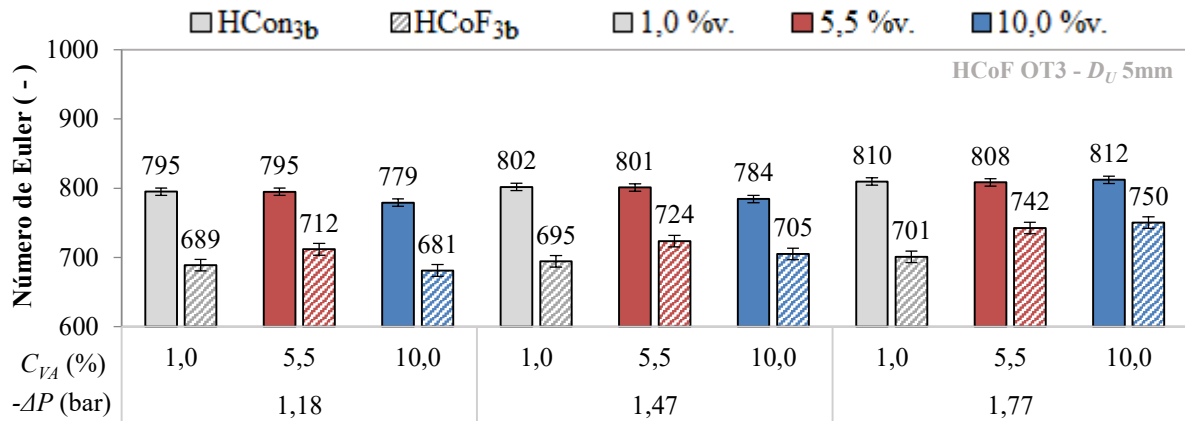


Figura 4.4-7 – Número de Euler para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 5$ mm.

De acordo com as figuras, o número de Euler variou de 675,9 a 801,9 para HCoF_{3b} e de 779,2 a 927,2 para o convencional HCon_{3b}. Assim como fora observado para os demais hidrociclones filtrantes estudados, houve redução dos valores de número de Euler em relação ao similar convencional para todas as condições do planejamento experimental proposto. Para este caso foi observada uma redução média de 12,0 % no número de Euler entre HCoF_{3b} em comparação a HCon_{3b} para todas as configurações operacionais estudadas experimentalmente. A fim de quantificar a influência das variáveis estudadas (C_{VA} , D_U e $-\Delta P$) em relação à vazão de alimentação e número de Euler no hidrociclone HCoF_{3b}, foi realizada uma regressão múltipla dos dados do planejamento experimental. Os efeitos das variáveis do planejamento em relação às respostas de vazão de alimentação e número de Euler obtidas para o hidrociclone cônico-filtrante, podem ser observados na Tabela 4.4-1.

Tabela 4.4-1 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a vazão de alimentação e número de Euler do hidrociclone HCoF_{3b}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	445,22	0,887	0,0000	731,7	1,897	0,000
X_1 (Linear)	–	–	–	-14,6	4,777	0,0059
X_1 (Quadrático)	-17,88	1,827	0,0000	40,6	3,907	0,000
X_2 (Linear)	4,91	2,234	0,0386	-27,0	4,777	0,000
X_2 (Quadrático)	–	–	–	21,8	3,907	0,000
X_3 (Linear)	79,12	2,234	0,0000	37,4	4,777	0,000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-8,54	2,736	0,0049	36,2	5,850	0,000
$X_1 X_3$ (Cruzado)	-5,51	2,736	0,0562	16,1	5,850	0,012
R²	0,98			0,93		

De acordo com os valores dos parâmetros, evidencia-se na Tabela 4.4-1 que a queda de pressão ($-ΔP$ ou X_3) do hidrociclone teve o maior efeito no comportamento da vazão de alimentação. Os coeficientes positivos indicam que seus efeitos foram diretamente proporcionais à vazão de alimentação (Q), ou seja, o aumento de $-ΔP$ contribui para o aumento da capacidade de processamento para os hidrociclones dessa geometria.

Em relação ao diâmetro de *underflow* (X_2) houve um efeito significativo para vazão de alimentação e número de Euler quando combinado à concentração da alimentação, evidenciado pelo par X_1 - X_2 na Tabela 4.4-1. Dessa forma, para soluções diluídas ($X_1 = -1$) há o aumento da vazão de alimentação, e consequente redução de Eu com o aumento de D_U . Ao se operar com soluções mais concentradas ($X_1 = +1$), o aumento do diâmetro de *underflow* levou à redução da vazão de alimentação. Isso pode ocorrer devido ao aumento das velocidades tangenciais nestas condições. Os efeitos citados podem ser observados nas superfícies de resposta para vazão de alimentação e número de Euler na Figura 4.4-8.

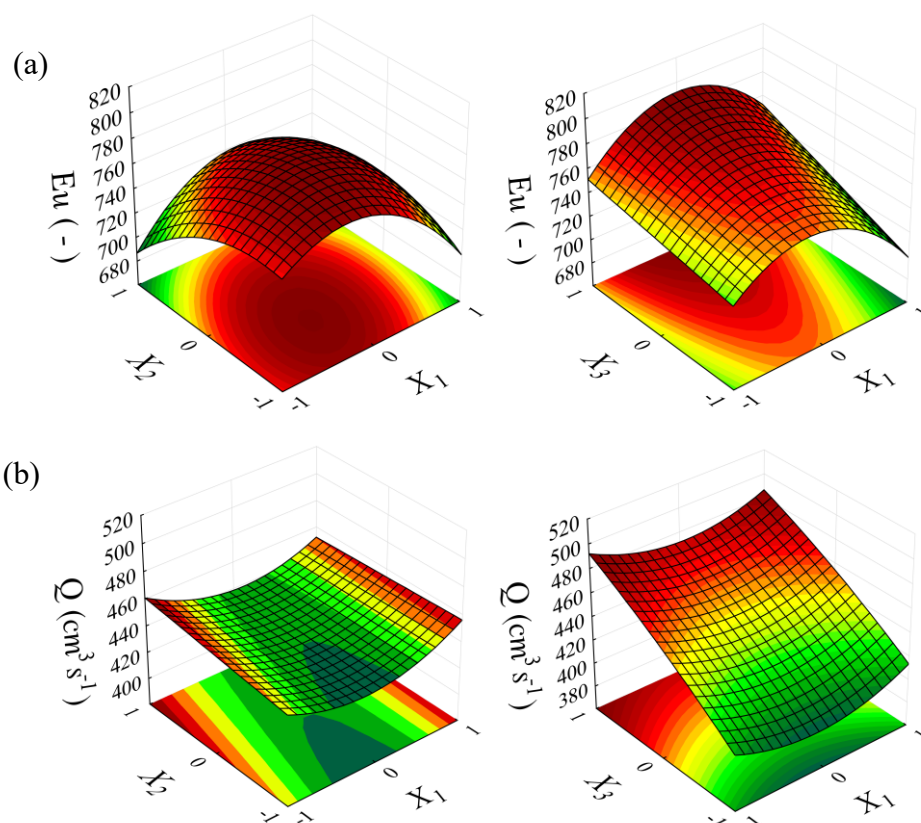


Figura 4.4-8 – Superfícies de Resposta para (a) número de Euler (Eu) e (b) vazão de alimentação (Q) do hidrociclone HCoF_{3b} segundo os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , nos níveis centrais dos demais fatores.

A partir da análise das superfícies de resposta nota-se que há uma coincidência entre as faixas operacionais que minimizam Euler e aumentam a capacidade de processamento. Voltando aos resultados experimentais das Figuras 4.4-2 a 4.4-7, observa-se que as condições que minimizam o consumo energético para os equipamentos com a geometria HCoF_{3b} são encontradas ao utilizar o equipamento filtrante e para níveis intermediários de X_1 .

A fim de quantificar a influência da filtração (X_4) em relação à vazão de alimentação e ao número de Euler nos hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}, foi realizada uma regressão múltipla dos dados do planejamento experimental misto a 2 e 3 níveis. Os efeitos das variáveis do planejamento composto para as respostas de vazão de alimentação e número de Euler obtidas para o hidrociclone cônico filtrante e convencional podem ser observados na Tabela 4.4-2.

Tabela 4.4-2 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a vazão de alimentação e número de Euler dos hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

Variável	Vazão de alimentação (cm ³ /s)			Número de Euler (–)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	436,63	1,390	0,0000	782,12	2,100	0,0000
X_1 (Linear)	15,21	3,512	0,0001	-39,10	5,290	0,0000
X_1 (Quadrático)	-5,75	2,851	0,0492	20,87	4,327	0,0000
X_2 (Linear)	–	–	–	-46,61	5,290	0,0000
X_2 (Quadrático)	–	–	–	12,19	4,327	0,0071
X_3 (Linear)	80,02	3,512	0,0000	33,38	5,290	0,0000
X_4 (Linear)	16,59	2,767	0,0000	-97,91	4,168	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	-28,48	4,302	0,0000	41,56	6,479	0,0000
$X_1 X_4$ (Cruzado)	-11,77	3,512	0,0015	24,47	5,290	0,0000
$X_2 X_4$ (Cruzado)	10,80	3,512	0,0034	19,59	5,290	0,0006
R²	0,93			0,95		

Ainda de acordo com a Tabela 4.4-2 os valores dos parâmetros indicam que a filtração (X_4) teve o maior efeito em relação ao número de Euler, indicando que a substituição da seção cônica resultou na redução do consumo energético para essa geometria. O efeito de X_1 também foi significativo, e o coeficiente negativo desse fator indica que seus efeitos foram inversamente proporcionais a Eu , ou seja, o aumento da concentração de alimentação (X_1) reduziu o consumo energético, evidenciado pela redução do número de Euler.

4.4.2. RAZÃO DE LÍQUIDO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DO UNDERFLOW

Nas Figuras 4.4-9, 4.4-10 e 4.4-11 apresentam-se os dados experimentais para a concentração volumétrica de sólidos do *underflow* obtidos para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

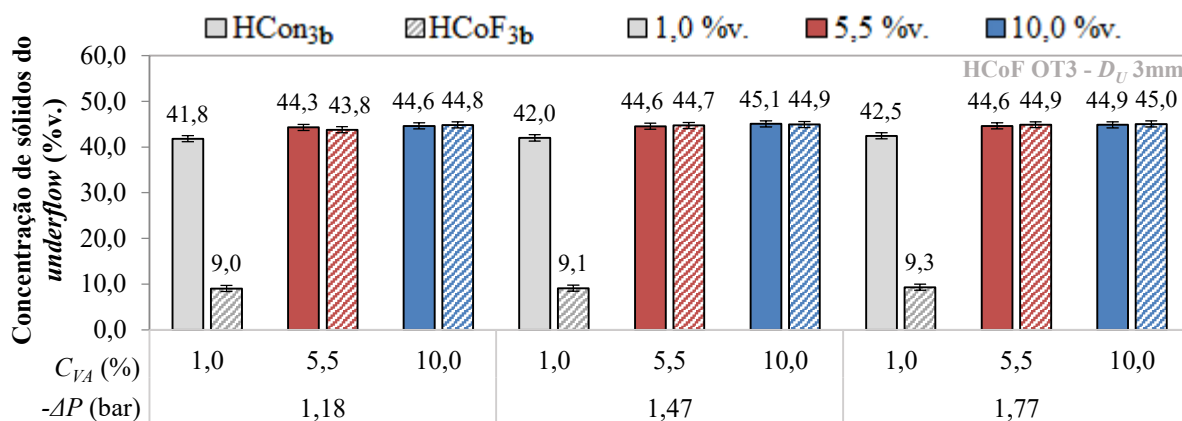


Figura 4.4-9 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 3$ mm.

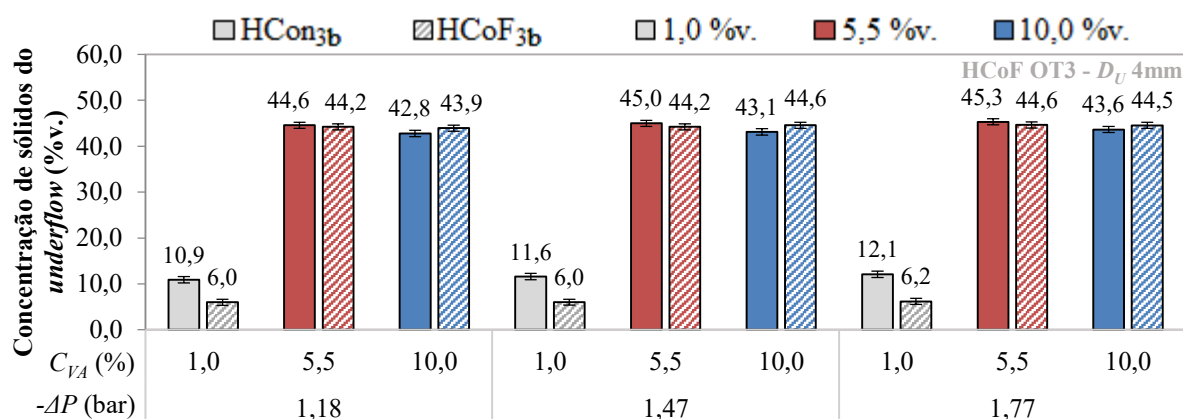


Figura 4.4-10 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 4$ mm.

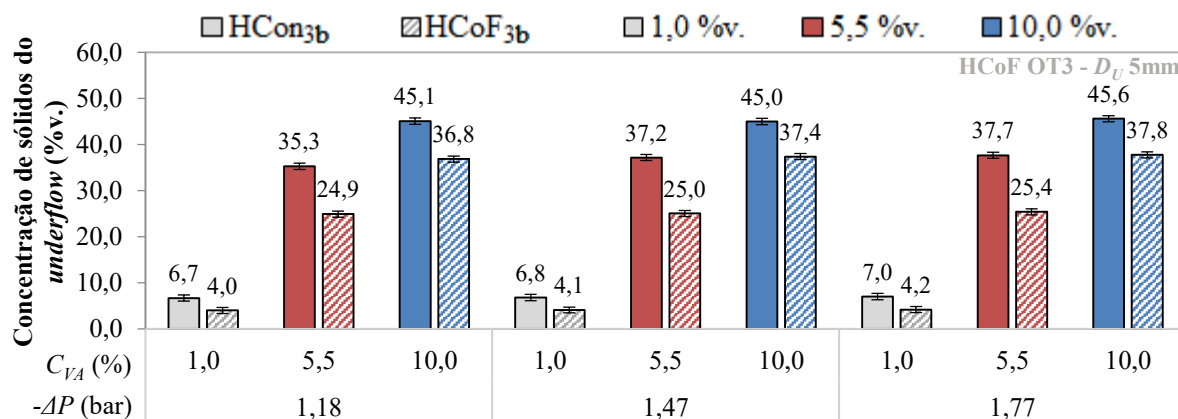


Figura 4.4-11 – Concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow* para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 5$ mm.

Através dos dados apresentados é possível observar que C_{VU} variou entre 4,0 % e 45,1 % para HCoF_{3b} e de 6,7 % a 45,6 % para HCon_{3b}. Em média foram observados decréscimos de 5 % na concentração do *underflow* para o HCoF_{3b} em relação ao HCon_{3b}.

Assim como observado nas seções anteriores, nota-se que as diferenças de C_{VU} entre os equipamentos HCoF_{3b} e HCon_{3b} também foram menos pronunciadas para os sistemas em que se combinaram menores níveis de diâmetro de *underflow* ($D_U = 3$ e 4 mm) com suspensões concentradas ($C_{VA} = 5,5$ % e 10 %v.). Para os equipamentos de geometria HCoF-OT3, nas condições em que foi operado com $C_{VA} = 10,0$ %v., foi observado que o dispositivo filtrante apresentou uma diferença média de apenas 4,9 % em C_{VU} . Por outro lado, em condições diluídas ($C_{VA} = 1,0$ %v.) a operação do equipamento convencional promoveu um aumento médio de 55,2 % na concentração do *underflow* em relação ao filtrante. Isto posto, em 12 dos 27 casos avaliados o equipamento filtrante alcançou o mesmo patamar de espessamento que o equipamento convencional, e para suspensões mais diluídas ($C_{VA} = 1,0$ %) o equipamento convencional apresenta um maior potencial de espessamento.

Nas Figuras 4.4-12, 4.4-13 e 4.4-14 apresentam-se os dados experimentais para razão de líquido obtidos para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm, respectivamente.

A razão de líquido variou de 4,0 % a 17,8 % para o hidrociclone HCoF_{3b} e de 0,8 % a 9,9 % para HCon_{3b}. De acordo com os dados experimentais apresentados nas Figuras 4.4-12, 4.4-13 e 4.4-14 foi possível observar que a filtração também foi um fator que influenciou a razão de líquido dos equipamentos HCoF_{3b} e HCon_{3b} no sentido de aumentá-la, comportamento esperado devido à redução de C_{VU} constatada.

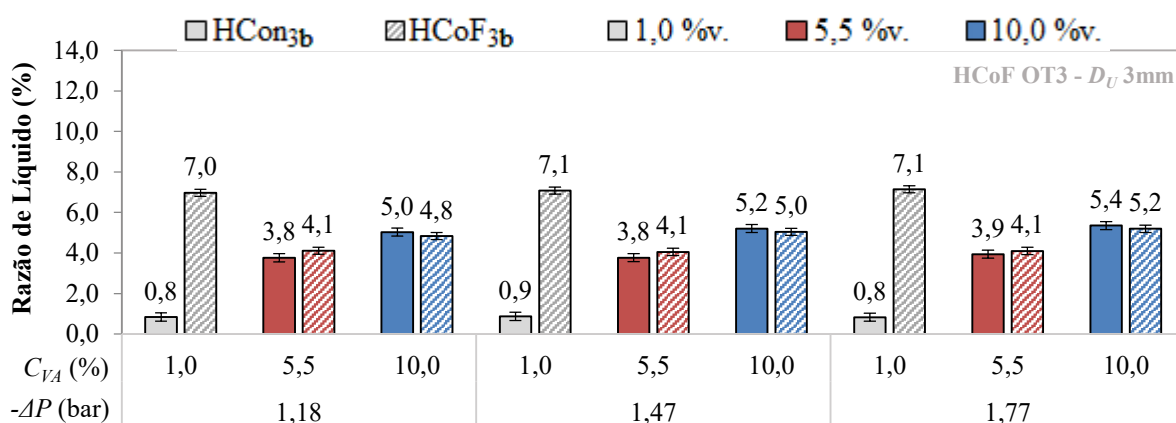


Figura 4.4-12 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 3$ mm.

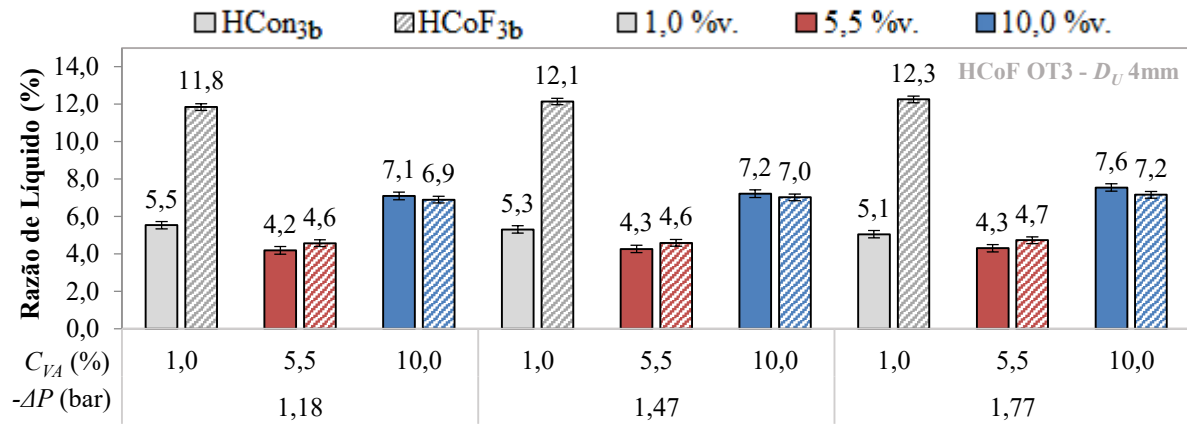


Figura 4.4-13 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} $D_U = 4$ mm.

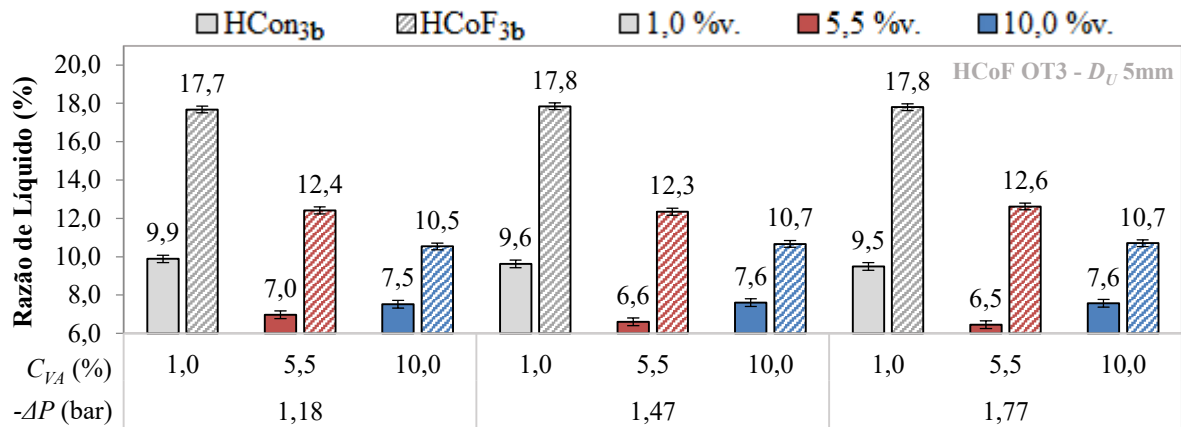


Figura 4.4-14 – Razão de líquido para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} $D_U = 5$ mm.

Semelhantemente ao verificado para C_{VU} , acredita-se que também houve uma interação entre os efeitos da C_{VA} e D_U para a R_L desses equipamentos. Para as condições em que foram adotados diâmetros de *underflow* de 3 e 4 mm e percentagens de sólidos na alimentação de 5,5 % e 10,0 %, os equipamentos filtrante e convencional tiveram valores de R_L similares. Enquanto para as condições em que se adotou C_{VA} de 1,0 % foi observado uma redução de até 7 vezes na razão de líquido do equipamento convencional.

A fim de quantificar e confirmar os efeitos observados para C_{VU} e R_L no equipamento HCoF_{3b}, foram realizadas regressões múltiplas para os dados do planejamento experimental desse equipamento, para as variáveis C_{VA} (X_1), D_U (X_2) e $-\Delta P$ (X_3). Na Tabela 4.4-3 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido para o hidrociclone HCoF_{3b}.

Tabela 4.4-3 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido do hidrociclone HCoF_{3b}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	29,03	0,660	0,0000	8,92	0,165	0,0000
X_1 (Linear)	35,77	1,663	0,0010	-4,70	0,415	0,0000
X_1 (Quadrático)	14,18	1,360	0,0000	-2,99	0,340	0,0000
X_2 (Linear)	-10,51	1,663	0,0002	8,28	0,416	0,0000
X_2 (Quadrático)	4,77	1,360	0,0000	-1,91	0,340	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	–	–	–	-2,54	0,509	0,0000
R²	0,96			0,97		

As variáveis que mais influenciaram na concentração volumétrica de sólidos do *underflow* do equipamento HCoF_{3b} foram, respectivamente, X_1 (C_{VA}) e X_2 (D_U). Para a razão de líquido foram X_2 e X_1 , nesta ordem. Em consonância com as análises realizadas nas seções anteriores, observou-se que variações da concentração de sólidos na alimentação (X_1) afetaram de forma oposta a concentração do *underflow* e a razão de líquido (efeitos com sinais opostos entre C_{VU} e R_L). O mesmo foi observado para a variável X_2 (D_U).

Além disso, houve um efeito combinado considerável da concentração de alimentação com o diâmetro de *underflow*, por X_1 - X_2 . Os efeitos citados podem ser melhor observados nas superfícies de resposta para C_{VU} e R_L na Figura 4.4-15.

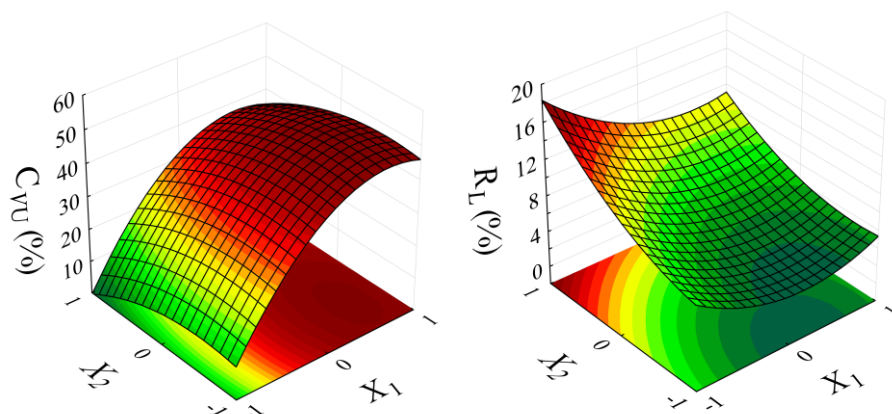


Figura 4.4-15 – Superfícies de resposta para concentração de sólidos do *underflow* (C_{VU}) e razão de líquido (R_L) do hidrociclone HCoF_{3b} segundo por X_1 - X_2 , nos níveis centrais dos demais fatores.

De acordo com a Figura 4.4-15 em operações com baixa concentração de sólidos na alimentação ($X_I = -1$ ou $C_{VA} = 1,0$ %v.) o aumento do diâmetro de *underflow* (X_2), reduziu drasticamente C_{VU} . Já no processamento de suspensões mais concentradas ($X_I = +1$ ou $C_{VA} = 10,0$ %v.), a elevação de D_U não influencia de forma intensa a concentração de sólidos do *underflow*.

Conforme analisado para as Figuras 4.4-12, 4.4-13 e 4.4-14 a filtração proporcionou alterações significativas para C_{VU} e R_L nos equipamentos HCoF_{3b} e HCon_{3b}. A fim de quantificar e confirmar os efeitos observados foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais desses equipamentos, na forma de um planejamento combinado para as variáveis C_{VA} (X_I), D_U (X_2), $-\Delta P$ (X_3) e filtração (X_4). Na Tabela 4.4-4 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

Tabela 4.4-4 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a concentração de sólidos do *underflow* e razão de líquido dos hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

Variável	Concentração do <i>underflow</i> (%)			Razão de Líquido (%)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	32,49	0,736	0,0000	7,21	0,145	0,0000
X_I (Linear)	30,00	1,859	0,0000	-1,75	0,365	0,0000
X_I (Quadrático)	12,56	1,509	0,0000	-2,10	0,298	0,0000
X_2 (Linear)	-12,37	1,859	0,0000	6,65	0,365	0,0000
X_2 (Quadrático)	–	–	–	-0,97	0,298	0,0020
X_4 (Linear)	-6,31	1,465	0,0001	3,26	0,287	0,0000
$X_I X_2$ (Cruzado)	8,25	2,277	0,0007	-2,69	0,447	0,0000
$X_I X_4$ (Cruzado)	5,75	1,859	0,0032	-2,98	0,365	0,0000
$X_2 X_4$ (Cruzado)	–	–	–	1,64	0,365	0,0000
R^2	0,90			0,93		

De acordo com a Tabela 4.4-4 nota-se que a filtração afetou significativamente tanto a concentração de sólidos do *underflow* quanto a razão de líquido dos hidrociclones, conforme previsto a partir da análise dos dados experimentais. Além disso, houve um efeito combinado considerável da filtração com a concentração de alimentação, por X_I - X_4 , e com o diâmetro de

underflow, par X_2 - X_4 . Para sistemas diluídos ($X_I = -1$) a concentração de sólidos na corrente de *underflow* é reduzida significativamente para o equipamento filtrante ($X_4 = +1$) em relação ao convencional ($X_4 = -1$). Enquanto ao trabalhar com suspensões concentradas ($C_{VA} = 10,0$ %v. ou $X_I = +1$) o hidrociclone filtrante promove correntes de *underflow* mais concentradas, evidenciado pelo sinal positivo do coeficiente do par X_I - X_4 .

Tendo em vista que os equipamentos filtrantes beneficiaram a redução de consumo energético (número de Euler) para todas as condições estudadas, os resultados desta seção corroboram a aplicabilidade do hidrociclone HCoF_{3b} em operações de espessamento em suspensões concentradas ($C_{VA} = 5,5$ e 10 %v.). Para operações com suspensões diluídas o equipamento convencional (HCon_{3b}) apresentou valores baixos de razão de líquido e alto potencial concentrador.

4.4.3. EFICIÊNCIA TOTAL E DIÂMETRO DE CORTE

Os resultados experimentais para eficiência total obtidos para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} compostos por diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm são apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.4-16, 4.4-17 e 4.4-18.

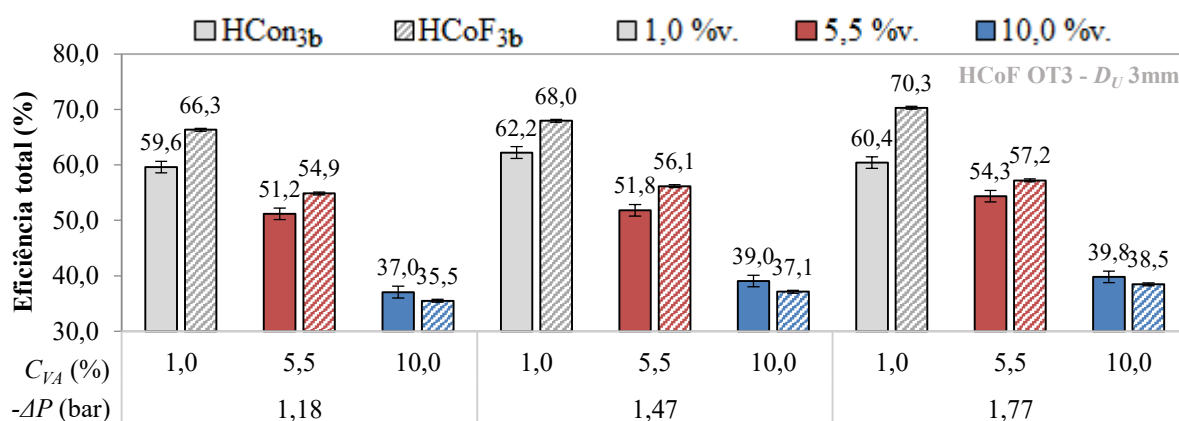


Figura 4.4-16 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 3$ mm.

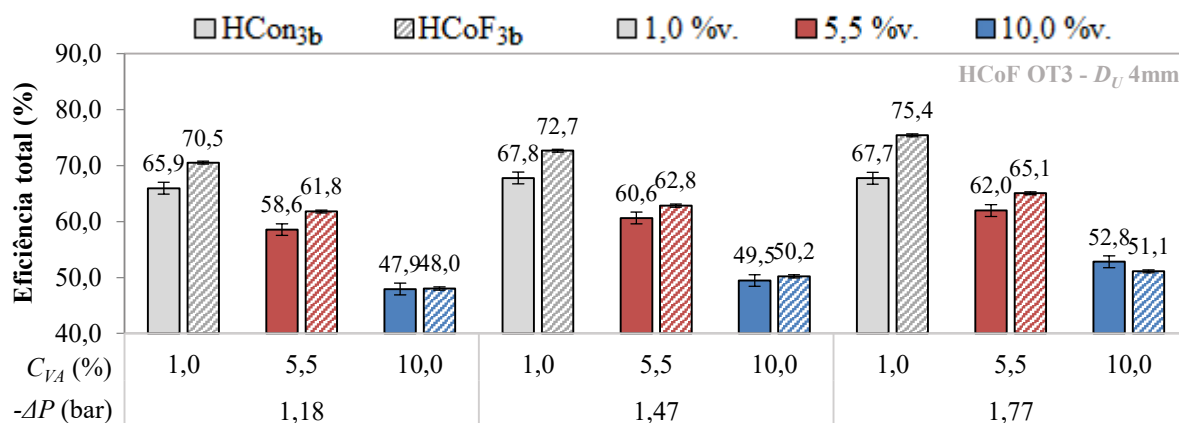


Figura 4.4-17 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 4$ mm.

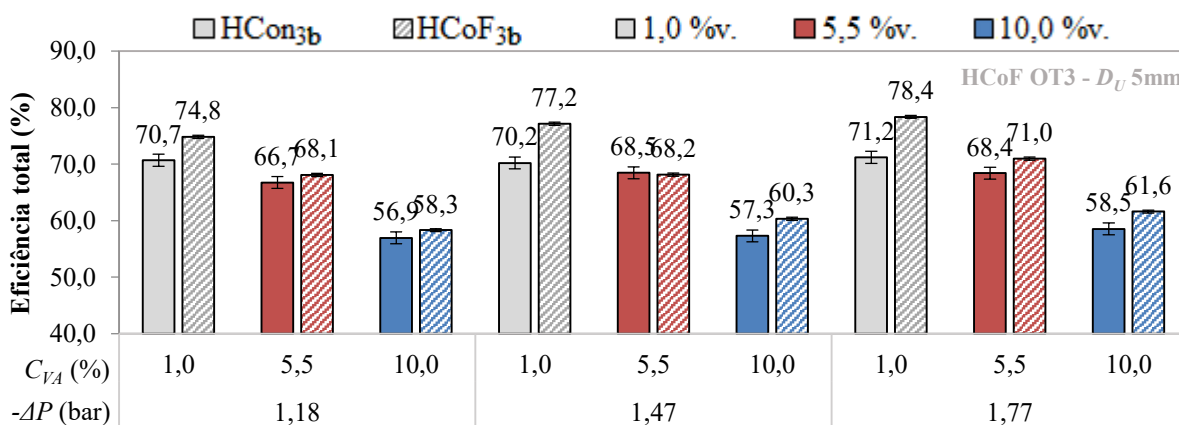


Figura 4.4-18 – Eficiência total para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 5$ mm.

De acordo com as informações contidas nas Figuras 4.4-16, 4.4-17 e 4.4-18, a eficiência total variou de 35,5 % a 78,4 % para o hidrociclone filtrante, enquanto foi observada uma variação de 37,0 % a 71,2 % para o equipamento convencional. Em geral foi constatado um aumento médio de 4,7 % para a eficiência total do hidrociclone HCoF_{3b} em relação ao convencional de mesma geometria. No entanto, nota-se que a diferença de desempenho entre o equipamento filtrante e o convencional foi mais pronunciada para as suspensões diluídas ($C_{VA} = 1,0$ %). Ao operar com 1,0 %v. de sólidos em suspensão, foram averiguados aumentos da ordem de 9,8 % na eficiência total, diferença esta que pode ser atribuída à maior razão de líquido apresentada pelos hidrociclones filtrantes nessas condições de operação. Já na condição mais concentrada ($C_{VA} = 10$ %), os equipamentos com orifícios de *underflow* de 3 e 4 mm de diâmetro não apresentaram diferenças significativas entre as eficiências totais entre filtrante e convencional, considerando em um mesmo nível das variáveis do planejamento.

Nas Figuras 4.4-19, 4.4-20 e 4.4-21 apresentam-se os dados experimentais para os diâmetros de corte obtidos para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

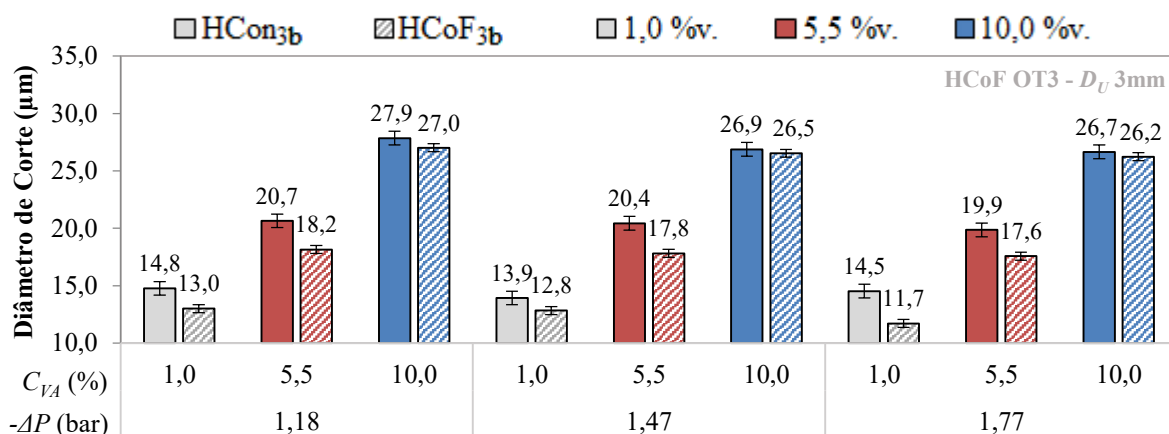


Figura 4.4-19 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 3$ mm.

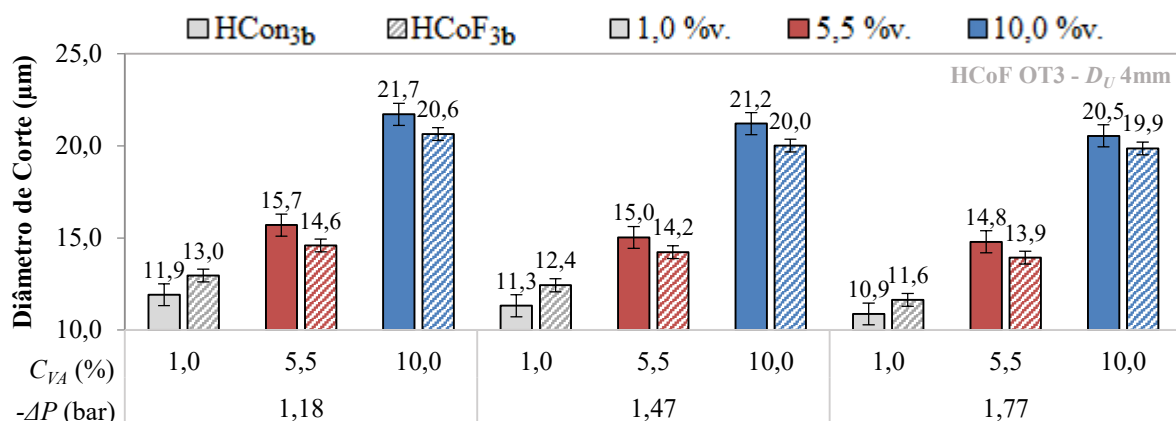


Figura 4.4-20 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 4$ mm.

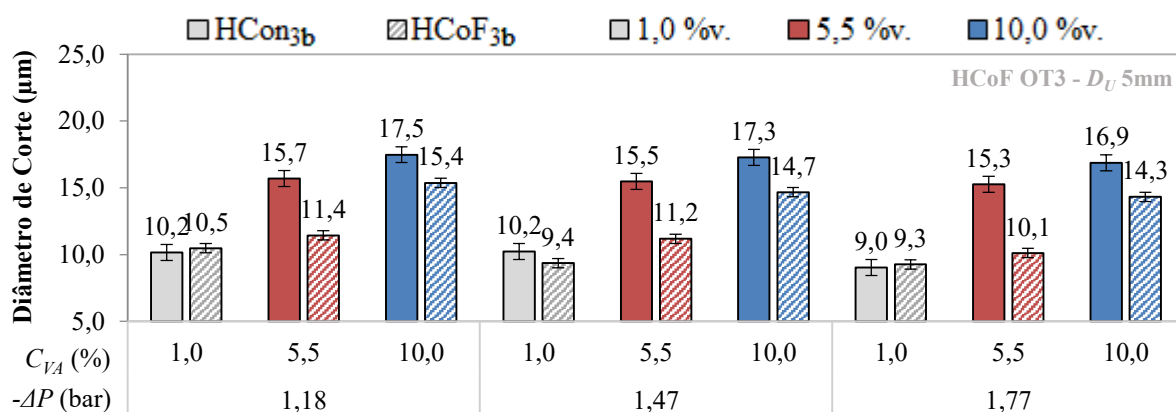


Figura 4.4-21 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b} com $D_U = 5$ mm.

A faixa de diâmetros de corte obtida variou entre 9,3 μm e 27,0 μm para o hidrociclone cônico-filtrante. Para o equipamento convencional foi observada uma faixa entre 9,0 μm a 27,9 μm. Ainda de acordo com os dados apresentados nas Figuras 4.4-19, 4.4-20 e 4.4-21, é possível observar que houve uma redução média de 8,2 % entre os diâmetros de corte obtidos para o

hidrociclone cônico-filtrante e convencional. Para o nível intermediário de C_{VA} (5,5 %v.) foi observado uma redução de 15,9 % no diâmetro de corte para o equipamento convencional. Para as demais condições, foram obtidos patamares semelhantes de diâmetros de corte para as duas modalidades de hidrociclones na geometria HCoF-OT3.

Com o propósito de analisar os efeitos observados para E_T e d_{50} em relação às variáveis C_{VA} , D_U , $-\Delta P$, foram realizadas regressões múltiplas para os dados do planejamento de HCoF_{3b}. Na Tabela 4.4-5 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento experimental para eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone HCoF_{3b}.

Tabela 4.4-5 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (μm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	61,37	0,127	0,0000	15,44	0,092	0,0000
X_I (Linear)	-23,12	0,321	0,0000	8,89	0,235	0,0000
X_I (Quadrático)	2,43	0,261	0,0000	-1,84	0,190	0,0000
X_2 (Linear)	15,50	0,321	0,0000	-7,32	0,235	0,0000
X_3 (Linear)	2,64	0,321	0,0000	-0,85	0,235	0,0014
$X_I X_2$ (Cruzado)	7,18	0,394	0,0000	-4,48	0,287	0,0000
R^2	0,99			0,99		

As variáveis que mais influenciaram eficiência total e diâmetro de corte do equipamento HCoF_{3b} foram C_{VA} (X_I), D_U (X_2) e $-\Delta P$ (X_3), nesta ordem. A concentração de sólidos na alimentação (C_{VA} ou X_I) atuou reduzindo a eficiência total e aumentando o diâmetro de corte das partículas coletadas no *underflow*. O diâmetro de *underflow* (X_2) e a queda de pressão (X_3) apresentam efeitos favoráveis à separação, efeito positivo sobre E_T e negativo em relação a d_{50} . Sendo assim, proporcionaram o aumento da eficiência total e redução do diâmetro de corte.

Com o propósito de analisar os efeitos observados para E_T e d_{50} em relação à filtração, foram realizadas regressões múltiplas para os dados dos planejamentos experimentais de HCoF_{3b} e HCon_{3b}, na forma de um planejamento combinado com 2 e 3 níveis. Na Tabela 4.4-6 apresentam-se os efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para eficiência total e diâmetro de corte para os hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

Tabela 4.4-6 – Quantificação dos efeitos relacionados às variáveis do planejamento combinado para a eficiência total e diâmetro de corte dos hidrociclones HCoF_{3b} e HCon_{3b}.

Variável	Eficiência Total (%)			Diâmetro de Corte (μm)		
	Efeito	Erro padrão	Valor-p	Efeito	Erro padrão	Valor-p
Média	59,49	0,134	0,0000	16,28	0,122	0,0000
X_1 (Linear)	-21,16	0,338	0,0000	9,68	0,307	0,0000
X_1 (Quadrático)	1,99	0,276	0,0000	-0,78	0,251	0,0033
X_2 (Linear)	16,57	0,338	0,0000	-7,26	0,307	0,0000
X_2 (Quadrático)	0,98	0,276	0,0009	-0,74	0,251	0,0048
X_3 (Linear)	2,46	0,338	0,0000	-0,83	0,307	0,0092
X_4 (Linear)	4,02	0,266	0,0000	-1,74	0,242	0,0000
$X_1 X_2$ (Cruzado)	7,28	0,414	0,0000	-3,98	0,376	0,0000
$X_1 X_4$ (Cruzado)	-2,45	0,338	0,0000	-0,69	0,307	0,0277
R^2	0,99			0,97		

De acordo com a Tabela 4.4-6, houve influência significativa da filtração (X_4) para as respostas eficiência total e diâmetro de corte para os equipamentos de geometria HCoF-OT3. A filtração beneficiou a eficiência total (efeito positivo sobre E_T) e o diâmetro de corte das partículas coletadas no *underflow* (efeito negativo para d_{50}).

O coeficiente negativo obtido para o par X_1 - X_4 corrobora com os resultados apresentados nas Figuras 4.4-16, 4.4-17 e 4.4-18. Nesse contexto, para suspensões diluídas ($C_{VA} = 1,0\%$), foram observados acréscimos da ordem de 9,8 % na eficiência total para o equipamento filtrante em relação ao convencional, enquanto para as demais condições, não foram identificadas diferenças significativas entre a eficiência total entre essas modalidades de hidrociclones.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS HIDROCICLONES

Os hidrociclones estudados nesta tese foram otimizados em trabalhos anteriores do grupo de pesquisas da Faculdade de Engenharia Química da UFU com objetivos específicos em operações apenas com suspensões diluídas ($C_{VA} = 1,0\%$). Entretanto, em muitos casos as aplicações práticas desses equipamentos envolvem o processamento de suspensões com concentração de sólidos superior ao percentual adotado nos testes de otimização. Conforme averiguado neste estudo, tais equipamentos tiveram seu desempenho afetado com a mudança

de concentração da alimentação, consequentemente, o presente estudo também teve por interesse explorar as potencialidades dos hidrociclones otimizados operando com suspensão de até 10,0 %v. de sólidos.

Conforme analisado nas seções anteriores, pode-se observar que as condições operacionais que minimizam a razão de líquido e maximizam a eficiência total estão em diferentes níveis das variáveis estudadas. O comportamento contraditório dessas respostas reforça a necessidade de encontrar uma configuração adequada para cada aplicação específica. Isto posto, nesta seção buscou-se determinar quais hidrociclones seriam melhor aplicáveis às operações de classificação e de espessamento, para operações com diferentes concentrações de sólidos na suspensão de alimentação.

Para todos os casos analisados, a filtração (X_4) foi a variável que mais afetou o consumo energético (número de Euler) dos hidrociclones estudados, seguido de X_2 (menores diâmetros de *underflow* restringem o escoamento, aumentando a perda de carga no equipamento). Dessa forma, fica evidente que optar preferencialmente por hidrociclones com paredes filtrantes e dotados de dutos de *underflow* com maiores diâmetros pode ser uma estratégia para reduzir o consumo energético associado à operação.

4.5.1. HIDROCICLONES CLASSIFICADORES

De acordo com os resultados das regressões e análises realizadas nas seções anteriores, a eficiência total de todos os hidrociclones foi majorada para níveis mais altos de diâmetro de *underflow* ($D_U = 5$ mm) e de queda de pressão ($-\Delta P = 1,77$ bar). Assim, analisaram-se a eficiência total e o número de Euler dos hidrociclones de geometrias HCoF-OT1, HCoF-OT1 e HCoF-OT1 otimizados para maximização da eficiência total (caso 1), nas modalidades filtrantes e convencional, ao operar com suspensões contendo percentagens de 1,0 %; 5,5 %; e 10,0 % em volume de sólidos na alimentação (Figura 4.5-1, Figura 4.5-4 e Figura 4.5-6, respectivamente).

Vale ressaltar que a caracterização experimental dos hidrociclones cilíndrico-filtrante (HCiF_{1c}) e convencional (HCon_{1c}) de geometria otimizada HCoF-OT1 abordados neste trabalho foi realizada por Ascendino (2019). Essa geometria também foi obtida por Salvador (2017) para o caso de otimização 1c, que teve por objetivo a maximização de eficiência total para uma base de hidrociclones cilíndrico filtrantes.

De acordo com os dados de eficiência total e número de Euler disponíveis na Figura 4.5-1, o hidrociclone que apresentou a maior eficiência total foi o equipamento HCoF_{1b} na modalidade convencional (HCon_{1c}) com D_U de 5mm e $-\Delta P$ de 1,77 bar ($E_T = 87,6\%$ e $Eu = 4319$). No entanto, o equipamento em questão apresenta um número de Euler bastante elevado em relação aos demais. Outra boa opção para aplicações em operações de classificação para C_{VA} de 1,0 %v. seria o hidrociclone cônico-filtrante HCoF_{1b} nas mesmas condições operacionais ($E_T = 86\%$ e $Eu = 1638$). Este equipamento apresentou uma alta eficiência total associada a um baixo consumo energético. Os gastos energéticos associados à sua operação são minorados em 164 %, aproximadamente, de acordo com o número de Euler, enquanto a eficiência total é reduzida em apenas 1,6 pontos percentuais, em relação ao HCon_{1c}.

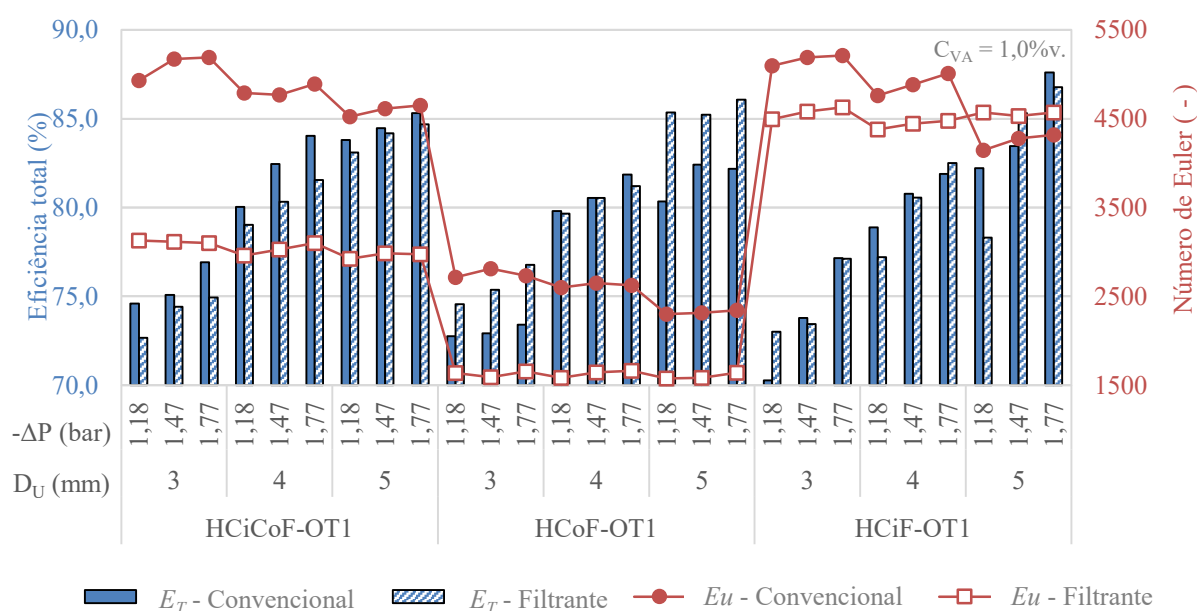


Figura 4.5-1 – Eficiência total e número de Euler para os hidrociclones do caso 1 ao operar com 1,0 % em volume de sólidos na alimentação.

A fim de proporcionar uma rápida uma estimativa para a eficiência total desses equipamentos para operações com materiais particulados de diferentes granulometrias, foram traçadas curvas de eficiência para os hidrociclones estudados. A Figura 4.5-2 e Figura 4.5-3 apresentam as curvas de eficiência total para os equipamentos HCoF_{1b} e HCon_{1c} operando com diâmetro de *underflow* de 5 mm e C_{VA} de 1,0 %v., respectivamente.

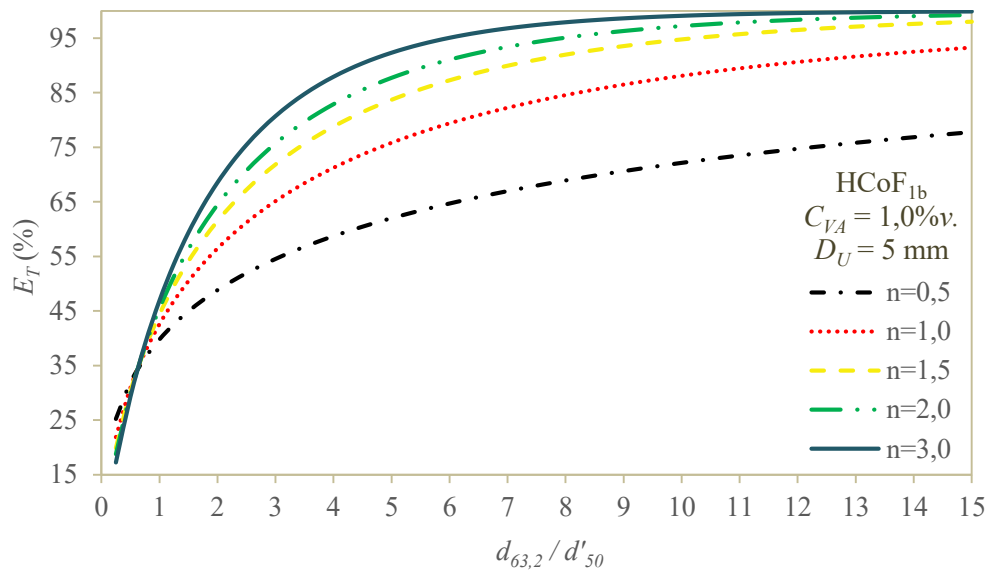


Figura 4.5-2 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF_{1b} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 1,0 %v.

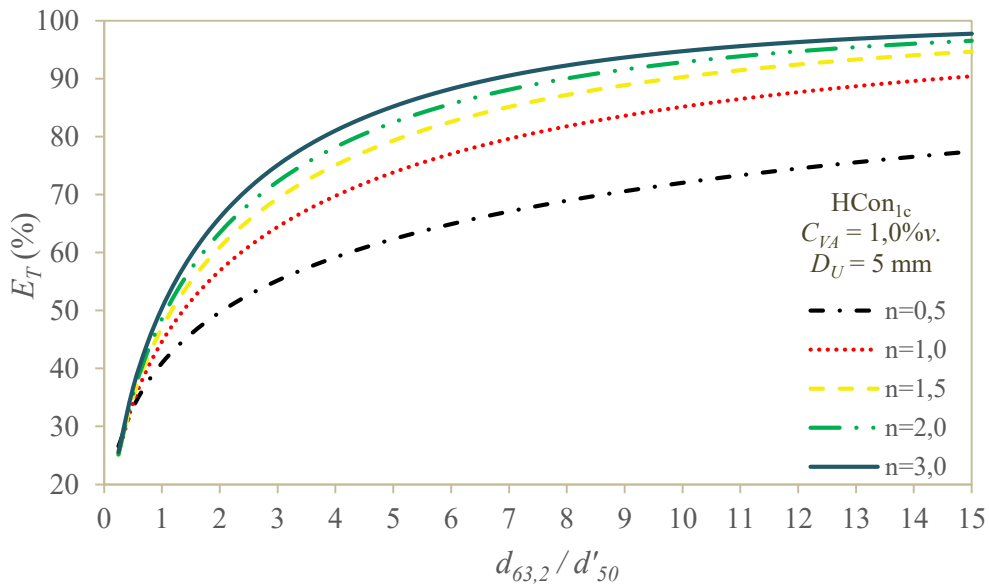


Figura 4.5-3 – Curva de eficiência total (E_T) de HCon_{1c} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 1,0 %v.

De acordo com a Figura 4.5-4, o hidrociclone HCoF_{1b} com D_U de 5 mm foi a melhor opção para operações de classificação em uma suspensão com C_{VA} de 5,5 %v. O hidrociclone cônico-filtrante apresentou a maior eficiência total e o menor consumo energético dentre os equipamentos analisados ($E_T = 82,4\%$ e $Eu = 1759$). O equipamento convencional de mesma geometria também apresentou um desempenho satisfatório ($E_T = 81,5\%$ e $Eu = 2097$), no entanto promoveu um aumento de 16,1 % no número de Euler e uma redução de 1,1 pontos percentuais na eficiência total.

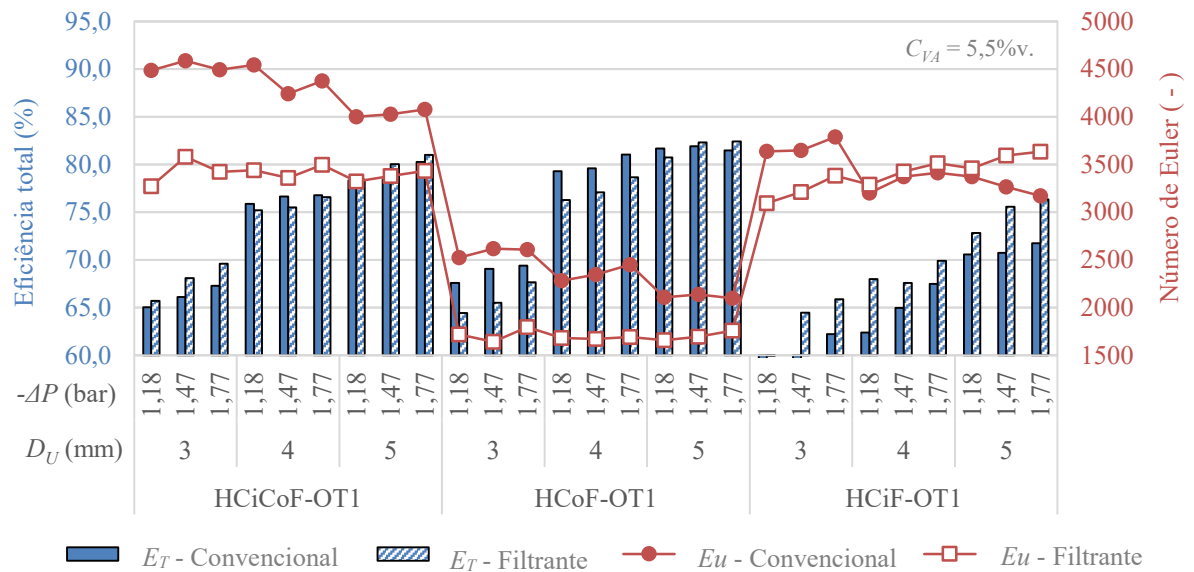


Figura 4.5-4 – Eficiência total e número de Euler para os hidrociclones do caso 1 ao operar com 5,5 % em volume de sólidos na alimentação.

A Figura 4.5-5 apresenta a curva de eficiência total para HCoF_{1b} operando com diâmetro de *underflow* de 5 mm e C_{VA} de 5,5 %v., respectivamente.

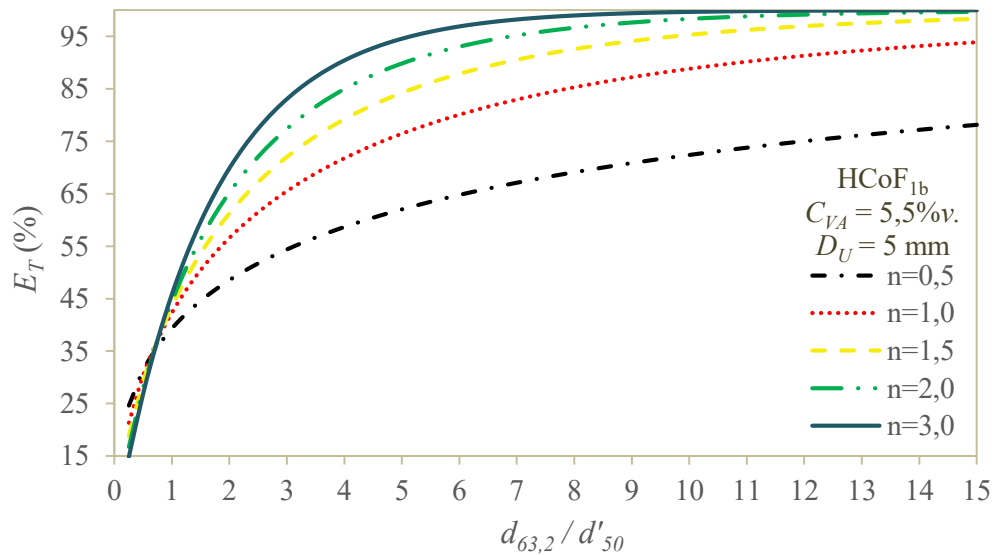


Figura 4.5-5 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF_{1b} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 5,5 %v.

A Figura 4.5-6 apresenta os resultados de eficiência total e número de Euler para C_{VA} de 10,0 %.

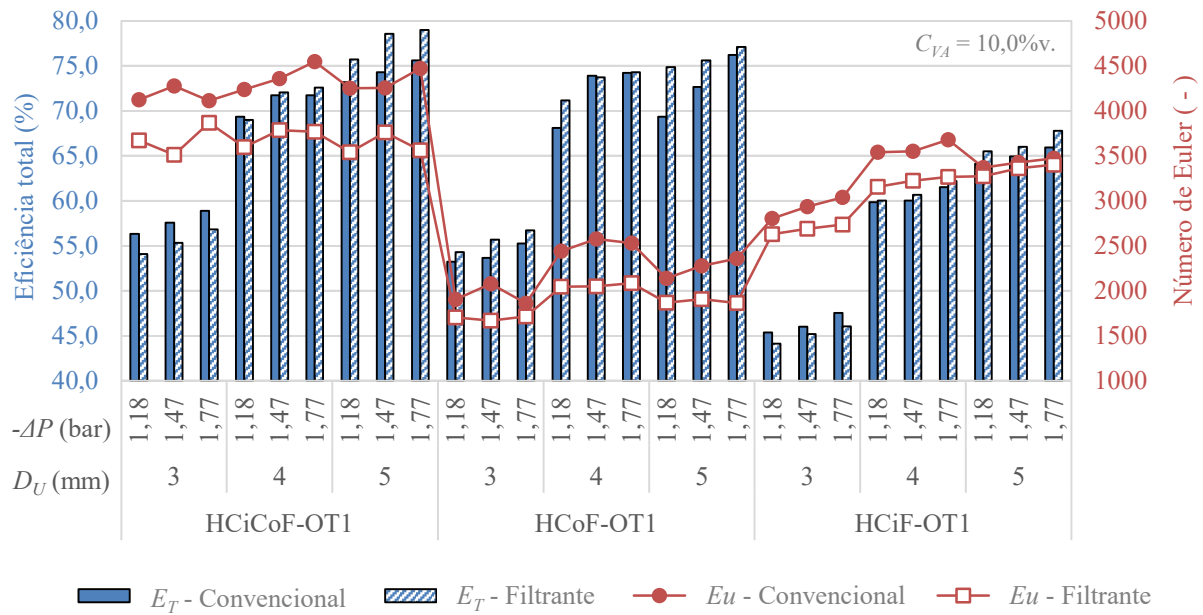


Figura 4.5-6 – Eficiência total e número de Euler para os hidrociclones do caso 1 ao operar com 10,0 % em volume de sólidos na alimentação.

Para operações em que seja necessário classificar partículas presentes em uma suspensão com 10,0 % de sólidos em volume (Figura 4.5-6), o hidrociclone HCiCoF_{1a} equipado com D_U de 5 mm foi uma boa opção por majorar a eficiência total ($E_T = 79,0$ % e $Eu = 3562$). A Figura 4.5-7 apresentam as curvas de eficiência total para o equipamento HCiCoF_{1a} operando com diâmetro de *underflow* de 5 mm e C_{VA} de 10,0 %v.

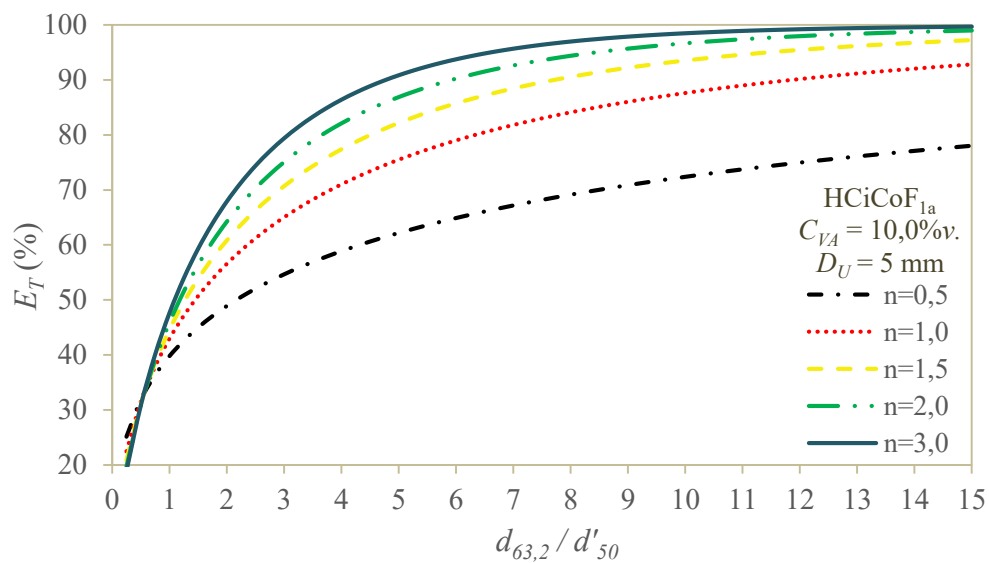


Figura 4.5-7 – Curva de eficiência total (E_T) de HCiCoF_{1a} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.

No entanto, o equipamento HCoF_{1b} ($E_T = 77,1\%$ e $Eu = 1864$), nas mesmas condições operacionais, apresenta uma redução de, aproximadamente, 48 % no consumo energético com uma redução de apenas 2,1 pontos percentuais na eficiência total de separação. Assim, HCoF_{1b} se apresenta como uma boa opção para operações de classificação para operações com suspensões de trabalho diluídas e concentradas. O equipamento foi capaz de promover uma alta eficiência total sem que houvesse a necessidade de aumentar excessivamente o consumo energético. A Figura 4.5-8 apresenta as curvas de eficiência total para o equipamento HCoF_{1b} operando com diâmetro de *underflow* de 5 mm e C_{VA} de 10,0 %v.

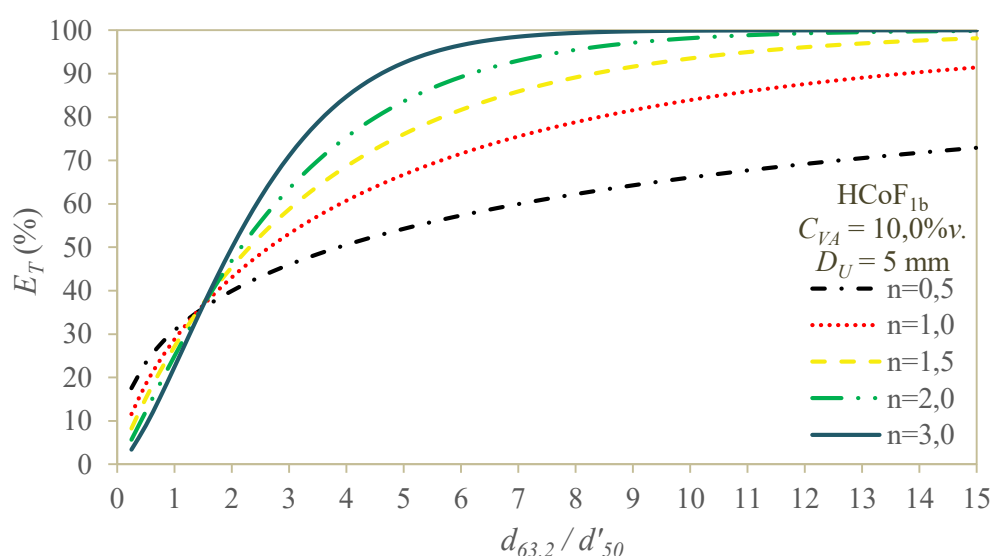


Figura 4.5-8 – Curva de eficiência total (E_T) de HCoF_{1b} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 5 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.

4.5.2. HIDROCICLONES CONCENTRADORES

Para operações de espessamento, espera-se obter um hidrociclone que promova baixas razões de líquido e ao mesmo tempo proporcione uma eficiência total em patamares razoáveis. De acordo com os resultados das regressões e análises realizadas nas seções anteriores, a razão de líquido de todos os hidrociclone foi minorada para níveis mais baixos de diâmetro de *underflow* ($D_U = 3$ mm e $D_U = 4$ mm). Pode-se analisar a razão de líquido e a eficiência total para os hidrociclones otimizados para o caso 3 através das Figuras 4.5-9, 4.5-10 e 4.5-13.

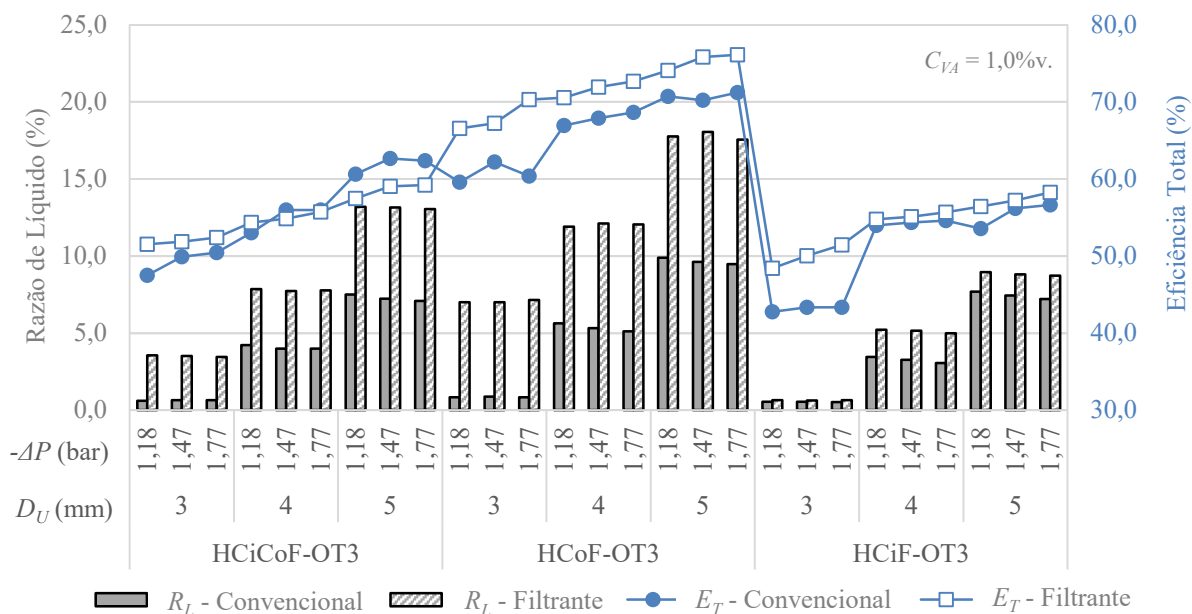


Figura 4.5-9 – Razão de líquido e eficiência total para os hidrociclones do caso 3 ao operar com 1,0 % em volume de sólidos na alimentação.

De acordo com os dados de razão de líquido e eficiência total apresentados na Figura 4.5-9, o hidrociclone convencional de geometria HCF-OT3, HCon_{3c} ($R_L = 0,5\%$, $E_T = 43,4\%$ e $Eu = 731$), equipado com D_U de 3 mm promoveu a menor razão de líquido dentre os hidrociclones estudados, para sistemas mais diluídos ($C_{VA} = 1,0\%v.$). No entanto, para este mesmo diâmetro de *underflow*, os equipamentos HCon_{3a}, equipamento convencional de geometria HCiCoF-OT3 ($R_L = 0,6\%$, $E_T = 50,5\%$ e $Eu = 685$), HCF_{3c} ($R_L = 0,7\%$, $E_T = 51,5\%$ e $Eu = 801$) e HCon_{3b}, equipamento convencional de geometria HCoF-OT3 ($R_L = 0,8\%$, $E_T = 60,4\%$ e $Eu = 914$) também apresentaram valores de razão de líquido próximos, aliados a maiores eficiências totais. Os resultados encontrados para essas geometrias foram capazes de aliar valores baixos de R_L com patamares razoáveis de eficiência total e número de Euler. Dessa forma, a escolha do melhor equipamento deve-se aos patamares de cada resposta desejados pelo operador, uma comparação entre esses equipamentos é apresentada na Tabela 4.5-1.

Tabela 4.5-1 – Resultados experimentais para o HCon_{3c} e comparativo dos demais hidrociclones com menores razões de líquido em relação ao HCon_{3c}.

	HCon _{3c}	HCon _{3a}	δ_{HCon3a}	HCF _{3c}	δ_{HCF3c}	HCon _{3b}	δ_{HCon3b}
R_L (%)	0,5	0,6	+ 20,0%	0,7	+ 40,0%	0,8	+ 60,0%
E_T (%)	43,4	50,5	+ 16,4%	51,5	+ 18,7%	60,4	+ 39,2%
C_{VU} (%)	44,8	43,9	- 2,0%	42,8	- 4,5%	42,5	- 5,1%
Eu	731	685	- 6,3%	801	+ 9,6%	914	+ 25,0%

A Figura 4.5-6 apresenta os resultados de razão de líquido e eficiência total para a operação dos hidrociclones otimizados para o caso 3 em suspensão com C_{VA} de 5,5 %v.

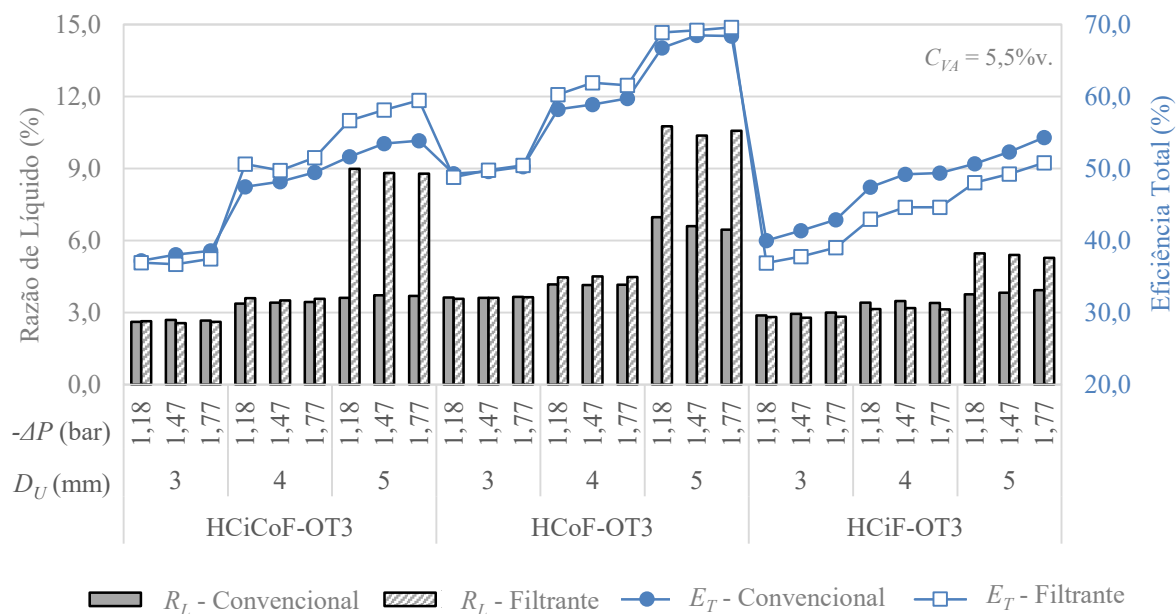


Figura 4.5-10 – Razão de líquido e eficiência total para os hidrociclones do caso 3 ao operar com 5,5 % em volume de sólidos na alimentação.

De acordo com os dados de razão de líquido e eficiência total apresentados Figura 4.5-10 o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante otimizado de geometria HCiCoF-OT3 (HCiCoF_{3a}) com D_U de 3 mm ($R_L = 2,6$ %, $E_T = 37,4$ %, $Eu = 590$) apresentou a menor razão de líquido, dentre os equipamentos estudados, para sistemas com concentração de sólidos na alimentação de 5,5 %v. Os resultados encontrados para essa geometria foram capazes de aliar valores baixos de R_L e Eu com patamares razoáveis de eficiência total. Além disso, ao operar esse equipamento com D_U de 4 mm ($R_L = 3,6$ %, $E_T = 51,5$ %, $Eu = 590$) foi obtida uma eficiência total 14,1 pontos percentuais maior através de um aumento de apenas 1,0 ponto percentual na razão de líquido. Assim, o diâmetro de *underflow* adotado pode ser escolhido de acordo com as necessidades específicas da operação.

A Figura 4.5-11 e a Figura 4.5-12 apresentam as curvas de eficiência total para o equipamento HCiCoF_{3a} operando com C_{VA} de 5,5 % e diâmetro de *underflow* de 3 mm e 4 mm, respectivamente.

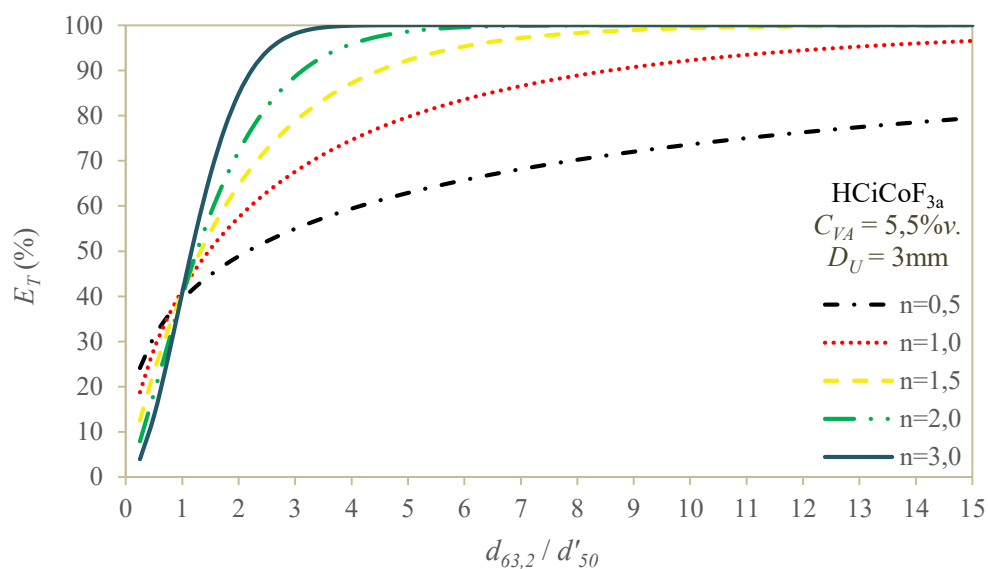


Figura 4.5-11 – Curva de eficiência total (E_T) de HClCoF_{3a} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 5,5 %v.

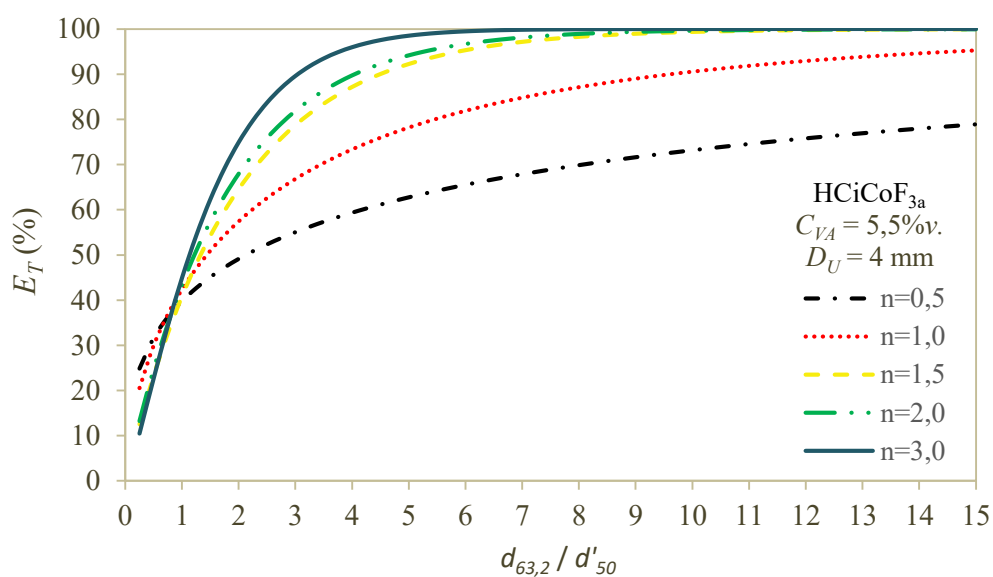


Figura 4.5-12 – Curva de eficiência total (E_T) de HClCoF_{3a} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 5,5 %v.

Na Figura 4.5-13 apresenta-se uma comparação de desempenho entre os equipamentos otimizados do caso 3 para operações com alta concentração de sólidos ($C_{VA} = 10,0 \%v.$).

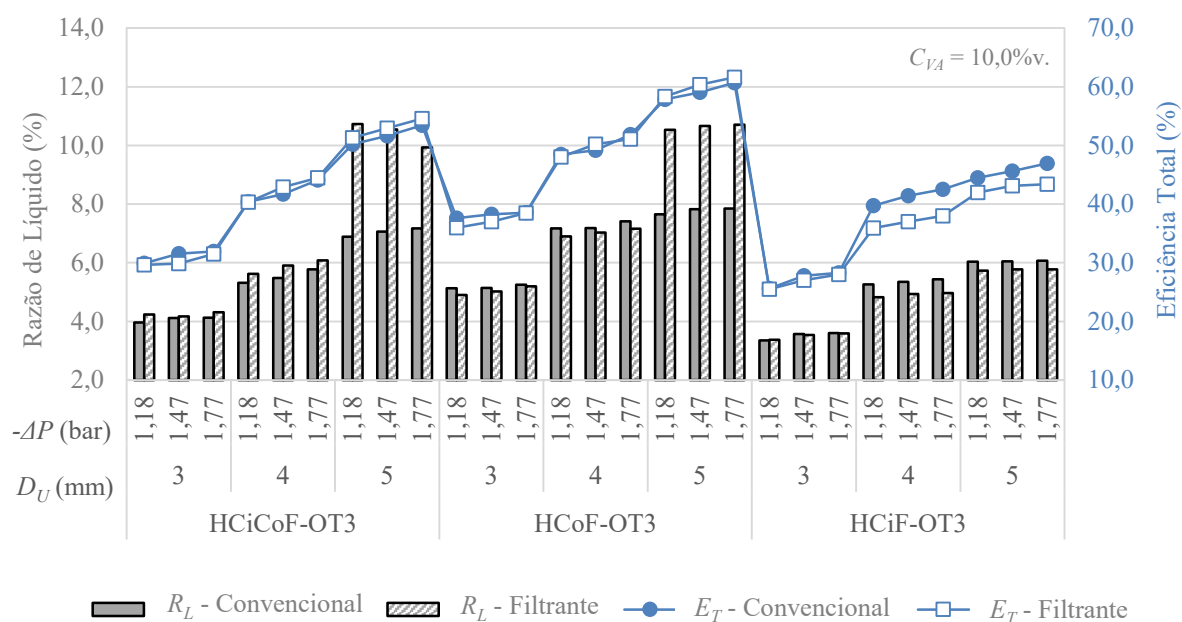


Figura 4.5-13 – Razão de líquido e eficiência total para os hidrociclones do caso 3 ao operar com 10,0 % em volume de sólidos na alimentação.

Os equipamentos HClF_{3c} ($R_L = 3,4\%$, $E_T = 25,5\%$, $Eu = 604$) e HCon_{3c} ($R_L = 3,4\%$, $E_T = 25,6\%$, $Eu = 640$) com D_U de 3 mm proporcionaram os menores patamares de razão de líquido. Nesse caso o equipamento cilíndrico-filtrante seria mais interessante devido ao menor número de Euler. Além disso, como o diâmetro de *underflow* pode ser utilizado como uma variável acessória, ao operar esse equipamento com D_U de 4 mm ($R_L = 4,8\%$, $E_T = 35,9\%$, $Eu = 639$) obtém-se um acréscimo de 10,4 pontos percentuais na eficiência total de separação, mediante um aumento de 1,4 pontos percentuais para a razão de líquido.

A Figura 4.5-14 e Figura 4.5-15 apresentam as curvas de eficiência total para o equipamento HClF_{3c} operando com C_{VA} de 10,0 %v. e diâmetro de *underflow* de 3 e 4 mm respectivamente.

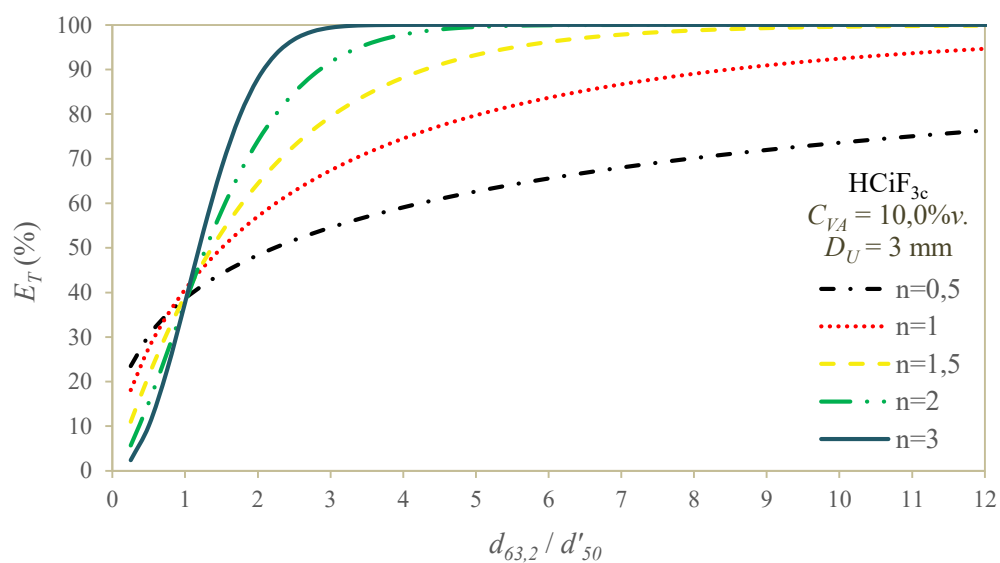


Figura 4.5-14 – Curva de eficiência total (E_T) de HCiF_{3c} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 3 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.

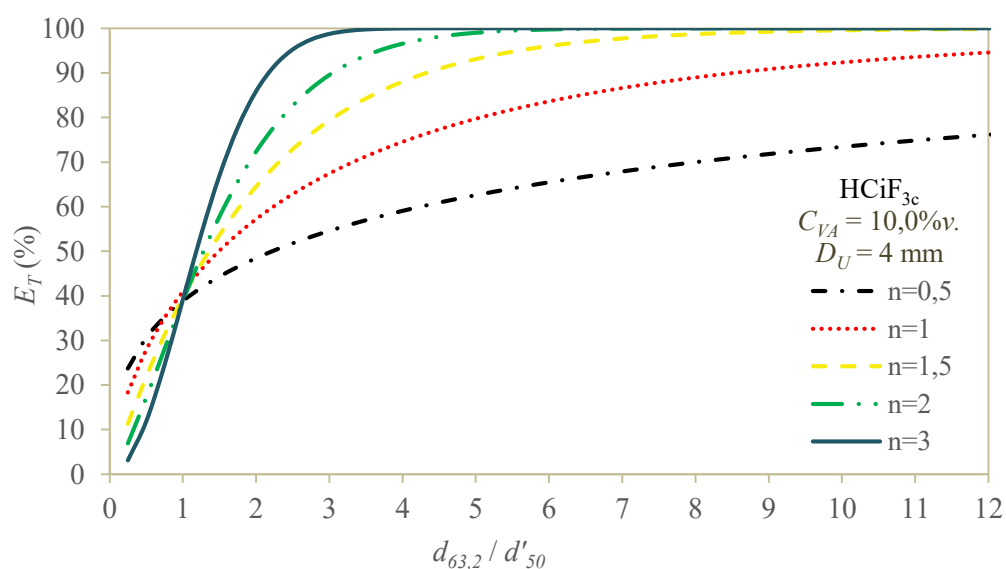


Figura 4.5-15 – Curva de eficiência total (E_T) de HCiF_{3c} para diâmetro de *underflow* (D_U) de 4 mm e concentração volumétrica de sólidos (C_{VA}) de 10,0 %v.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas de acordo com as discussões realizadas ao longo deste trabalho. Também são apresentadas sugestões para trabalhos subsequentes que podem vir a corroborar com a compreensão em relação ao desempenho e aplicações de hidrociclones filtrantes.

5.1. CONCLUSÕES

Foi possível concluir que o desempenho dos hidrociclones foi significativamente modificado mediante a incorporação de cilindros e/ou cones filtrantes em sua estrutura. Também foram identificadas alterações no desempenho dos equipamentos de acordo com o estudo de diferentes níveis de concentração de sólidos na alimentação, diâmetro de *underflow* e queda de pressão. Em todos os casos foi observado que o aumento da concentração de sólidos na alimentação levou à redução da eficiência total e o consumo energético dos hidrociclones foi favorecido para os equipamentos filtrantes. Em relação às demais respostas estudadas, foram obtidos diferentes comportamentos a depender da geometria.

Para os hidrociclones de geometrias HCoF-OT1 e HCoF-OT1:

- A eficiência total foi majorada com redução de C_{VA} , e aumento das variáveis diâmetro de *underflow* e queda de pressão.
- De acordo com a análise dos efeitos do planejamento experimental combinado, as eficiências totais para os equipamentos filtrantes e convencionais foram estatisticamente iguais.
- A máxima eficiência total alcançada foi de 85 % para HCoF-OT1 e de 86 % para HCoF-OT1 quando equipados com D_U de 5mm e operando com queda de pressão de 1,77 bar e suspensão de alimentação contendo 1,0 %v. de sólidos.

- Apesar de a concentração de sólidos na alimentação ter um efeito significativo na redução da eficiência total, os equipamentos HCoF-OT1 e HCoF-OT1 também foram capazes de promover altas eficiências totais de separação nessas condições.
- Foram alcançados 81 % (HCoF-OT1) e 82 % (HCoF-OT1) de eficiência total em suspensões contendo 5,5 %v. de sólidos; e 79 % (HCoF-OT1) e 77 % (HCoF-OT1) em suspensões contendo 10,0 %v. de sólidos.

Para os hidrociclones concentradores, geometrias HCoF-OT3 e HCoF-OT3:

- A concentração de sólidos no *underflow* foi majorada com o aumento da concentração de alimentação e redução do diâmetro de *underflow*, nessa ordem.
- Para HCoF-OT3 foi observado um acréscimo de 52,8 % em C_{VU} do equipamento convencional em comparação ao filtrante para o sistema mais diluído ($C_{VA} = 1,0$ %v.), enquanto para o sistema mais concentrado ($C_{VA} = 10,0$ %v.) a diferença entre os equipamentos totalizou apenas de 6,8 %.
- Para HCoF-OT3, em suspensões com 1,0 %v. de C_{VA} , a comparação entre os dispositivos filtrante (HCoF_{3b}) e convencional (HCon_{3b}) apresentou um aumento médio de 10 % em C_{VU} para o equipamento convencional. Enquanto foi observado uma redução média de apenas 1,5 % em C_{VU} para o equipamento filtrante, nas condições em que C_{VA} era de 10,0 %v.
- Para os dois casos (HCoF-OT3 e HCoF-OT3), observa-se que C_{VU} e R_L foram estatisticamente iguais entre os hidrociclones filtrantes e os convencionais nas condições que associaram menores diâmetros de *underflow* ($D_U = 3$ e 4 mm) e maiores percentagens de sólidos na alimentação ($C_{VA} = 5,5$ % e 10,0 %v.). Para as demais condições, a concentração de sólidos no *underflow* foi majorada para equipamentos convencionais
- Com isso, os equipamentos convencionais HCon_{3a} e HCon_{3b} são excelentes opções para operações de espessamento em suspensões diluídas.
- Por outra perspectiva, os hidrociclones filtrantes de geometrias HCoF_{3a} e HCoF_{3b} se destacam como opções no processamento de suspensões concentradas. Nessas condições, a utilização dos equipamentos filtrante resulta em correntes de *underflow* com concentrações de sólidos similares aos equipamentos convencionais, além de promoverem a redução do consumo energético associado à operação.

Também foi realizada uma avaliação comparativa do desempenho dos equipamentos estudados neste trabalho e por Ascendino (2019) em operações de classificação e espessamento com suspensões diluídas e concentradas. A avaliação dos resultados encontrados levou às conclusões listadas na sequência.

- HCon_{1c} com $D_U = 5$ mm ($E_T = 87,6$ % e $Eu = 4319$) apresentou a maior eficiência total para o sistema mais diluído ($C_{VA} = 1,0$ %v.).
- Adotar o equipamento filtrante HCoF_{1b} com $D_U = 5$ mm ($E_T = 86$ % e $Eu = 1638$) foi capaz de reduzir o consumo energético em 164 % mediante uma redução de apenas 1,0 ponto percentual no valor de eficiência total.
- Para o sistema com nível intermediário de C_{VA} (5,5 %v.) o HCoF_{1b} com D_U de 5mm ($E_T = 82,4$ % e $Eu = 1759$) apresentou a maior eficiência total.
- Para o sistema com a C_{VA} de 10,0 %v. o equipamento HCoF_{1a} com D_U de 5mm ($E_T = 79,0$ % e $Eu = 3562$) majorou a eficiência total.
- O equipamento HCoF_{1b} com D_U de 5mm ($E_T = 77,1$ % e $Eu = 1864$) também é uma opção interessante no processamento de suspensões contendo 10,0 %v. de sólidos, pois apresentou uma redução 48 % em Eu em relação ao HCoF_{1a}.
- O hidrociclone convencional HCon_{3c} com D_U de 3 mm ($R_L = 0,5$ %, $E_T = 43,4$ % e $Eu = 731$) promoveu a menor razão de líquido dentre os hidrociclones estudados para sistemas contendo 1,0 %v. de sólidos na alimentação.
- O equipamento que apresentou menor razão de líquido para suspensões de 5,5 %v. foi o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante HCoF_{3a} com $D_U = 3$ mm ($R_L = 2,6$ %, $E_T = 37,4$ %, $Eu = 590$ e $C_{VU} = 45,2$ %).
- Em sistemas contendo 10,0 %v. de sólidos na alimentação o equipamento que apresentou menor razão de líquido foi o hidrociclone cilíndrico-filtrante HCoF_{3c} com $D_U = 3$ mm ($R_L = 3,4$ %, $E_T = 25,5$ %, $Eu = 604$ e $C_{VU} = 45,8$ %).

5.2. SUGESTÕES

De acordo com os resultados encontrados neste trabalho, listam-se na sequência as sugestões para trabalhos futuros.

- Utilização de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para auxiliar no entendimento do escoamento interno dos hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes, cônico-filtrantes e cilíndrico-filtrantes.

- Estudos de otimização geométrica para hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes, cônico-filtrantes e cilíndrico-filtrantes voltados a operações com alta concentração de sólidos na alimentação.
- Estudos de otimização geométrica para hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes, cônico-filtrantes e cilíndrico-filtrantes operando com fluidos não newtonianos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A. K. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder**. 2008. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2008.
- ARRUDA, E. B. **Performance de hidrociclones filtrantes com geometria Demco**. 2003. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2003.
- ARRUDA, E. B.; KOBOLDT, C. A.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Avaliação do comportamento de hidrociclones filtrantes de Krebs. *In: XXX Encontro nacional sobre escoamento em meios porosos*, São Carlos, 2002.
- ASCENDINO, G. G. **Caracterização de Hidrociclones Cilíndrico-Filtrantes Otimizados**. 2019. 148 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2201>
- ASOMAH, A.K. NAPIER-MUNN, T.J. An empirical model of hydrocyclones, incorporating angle of cyclone inclination. **Minerals Engineering**, v. 10, p. 339-347, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00008-3)
- BANERJEE, C.; CLIMENT, E.; MAJUMDER, A.K. Mechanistic modelling of water partitioning behavior in hydrocyclone. **Chemical Engineering Science**, v. 152, p. 724-735, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.06.037>
- BERGSTRÖM, J. **Flow Field and Fibre Fractionation Studies in Hydrocyclones**. 2006. 59 p. Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006.
- BERGSTRÖM, J., VOMHOFF, H. Experimental hydrocyclone flow field studies. **Separation and Purification Technology**, v. 53, n. 1, p. 8-20, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.09.019>
- BRADLEY, D. **The Hydrocyclone**. Pergamon Press, London. 1965.
- BRADLEY, D. **The Hydrocyclone**: International Series of Monographs in Chemical Engineering, v. 4, Elsevier, 2013.
- CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R. A.; DYAKOWSKI, T.; CROSS, C. R. New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics. **Minerals Engineering**, v. 17, n. 5, p. 651-660, 2004.
- DARBY, R. **Chemical Engineering Fluid Mechanics**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2001. 559 p.
- DAVAILLES, A.; CLIMENT, E.; BOURGEOIS, F.; MAJUMDER, A. K. Analysis of swirling flow in hydrocyclones operating under dense regime. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 32–41, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.012>

- DELGADILLO, J. A.; RAJAMANI, R. K.; Computational fluid dynamics prediction of the air-core in hydrocyclones. **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, v.23 n.2, p. 189-197, 2009. <https://doi.org/10.1080/10618560902724893>
- DERKSEN, J., SUNDARESAN, S., VAN DEN AKKER, H. Simulation of mass-loading effects in gas-solid cyclone separators. **Powder Technology**, v. 163, n. 1, p. 59-68, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.01.006>
- FAÇANHA, J. M. F. **Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido-líquido em hidrociclones**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2012.
- GHODRAT, M.; KUANG, S. B.; YU, A. B.; VINCE, A.; BARNETT, G. D.; BARNETT, P. J. Computational Study of the Multiphase Flow and Performance of Hydrocyclones: Effects of Cyclone Size and Spigot Diameter. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2013, v. 52, p. 16019–16031, 2013. <https://doi.org/10.1021/ie402267b>
- GONÇALVES, S. M. **Efeito da Concentração de Sólidos e de Variáveis Operacionais no Desempenho de um Hidrociclone Concentrador**. 2016. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2016. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2016.148>
- GONÇALVES, S. M. **Separação sólido-líquido em hidrociclones otimizados empregando sistemas concentrados e fluido não newtoniano**. 2019. 161 p. Tese (Doutorado), UFU, Uberlândia, MG, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2421>
- IZQUIERDO, J., AGUADO, R., PORTILLO, A., VICENTE, J., BILBAO, J., & OLAZAR, M. Empirical Correlation for Calculating the Pressure Drop in Microhydrocyclones. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.57 n.42, p. 14202-14212, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02258>
- KUANG, S. B.; CHU, K. W.; YU, A. B.; VINCE, A. Numerical study of liquid-gas-solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 17-31, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.003>
- KUMAR, M., REDDY, R., BANERJEE, R., & MANGADODDY, N. Effect of particle concentration on turbulent modulation inside hydrocyclone using coupled MPPIC-VOF method. **Separation and Purification Technology**, v. 266, p. 118206, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118206>
- 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.
- LEE, J. Separation of fine organic particles by a low-pressure hydrocyclone (LPH). **Aquacultural Engineering**, v. 63, p. 32-38, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.07.002>
- LUSINGA, D. ANGOMBE, J. MAINZA, A.N. Assessing the effects of the cone force ratio on the performance of hydrocyclones. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 109, p. 239-243, 2009.

LYNCH, A. J. **Mineral crushing and grinding circuits** - their simulation, optimization, design and control. Elsevier, 1977.

MACHACA, Y. Y. C. **Modelagem da Classificação de Polpas de Bauxita e de Fosfato em Hidrociclones**. 2010. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

MARTHINUSSEN, S.; CHANG, Y.; BALAKIN, B.; HOFFMANN, A. C. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones. **Chemical Engineering Science**, v. 108, p. 169–175, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.01.008>

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados** – Apostila para o Programa de Engenharia Química - COPPE/UFRJ. 2. ed. Rio de Janeiro: 2001.

MELO, C. H. **Modelagem da Classificação de Minério de Ferro em Hidrociclones**. 2010. 78 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

MORGAN, M.C. **Drilling fluids processing handbook**, Burlington, Elsevier Inc, MA, USA, p. 257-282, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-075067775-2/50012-3>

MUKHERJEE, A.K. SRIPRIYA, R. RAO, P.V.T. DAS, P. Effect of increase in feed inlet pressure on feed rate of dense media cyclone. **International Journal of Mineral Processing**, v.69, p. 259-274, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00127-8)

NEESSE, T.; DUECK, J.; SCHWEMMER, H.; FARGHALY, M. Using a high pressure hydrocyclone for solids classification in the submicron range. **Minerals Engineering**, v. 71, p. 85-88, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.017>

NI, L.; TIAN, J.; ZHAO, J. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. **Separation and Purification Technology**, v. 171, p. 270-279, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.047>

ORTEGA-RIVAS, E.; SVAROVSKY, L. Generalized Stokes number for modeling setting of non-Newtonian slurries in dynamic separators. **Advanced Powder Technology**, v. 9, n. 1, p. 1-16, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0921-8831\(08\)60590-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8831(08)60590-7)

PATIL, D. D.; RAO, T. C. Classification evaluation of water injected hydrocyclone. **Minerals Engineering**, v. 12, p. 1527-1532, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00139-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00139-9)

QUTEISHAT, M. A. K. Hydrocyclone flow characteristics and measurements, **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 73, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101741>

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. **Coulson & Richardson's Chemical Engineering**. v.2, 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

SAENGCHAN, K.; NOPHARATANA, A.; SONGKASIRI, W. Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop

on tapioca starch separation with a hydrocyclone. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 48, p. 195-202, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.03.014>

SALVADOR, F. F. **Estudo Experimental do Comportamento de um Hidrociclone com Cone e Cilindro Filtrantes**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2013.

SALVADOR, F. F. **Otimização Geométrica de Hidrociclones com Cilindros e Cones Permeáveis**. 2017. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2017. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2017.155>

SALVADOR, F. F., ASCENDINO, G. G., DE FARIA, É. V., BARROZO, M. A. DE S., VIEIRA, L. G. M. (2021). Geometric optimization of filtering cylindrical hydrocyclones. **Powder Technology**, v. 381, p. 611–619, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2020.12.036>

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. Ensaios de classificação em hidrociclone. *In: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 139-154.

SILVA, N. K. G. **Estudo de Otimização da Configuração do Hidrociclone Filtrante**. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2014.

SOUZA, F.J. **Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante**. 1999. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 1999.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**. Eastbourn, UK: Holt, Reinhart & Winston, 1984. 198 p.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 4th ed. Boston: 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**, v. 278, p.504-516, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.022>

TAVARES, L. M.; SOUZA, L. L. G.; LIMA, J. R. B.; POSSA, M. V. Modeling classification in small-diameter hydrocyclones under variable rheological conditions. **Minerals Engineering**, v. 15, p. 613-622, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00085-7)

TIAN, J.; NI, L.; SONG, T.; OLSON, J.; ZHAO, J. An overview of operation parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. **Separation and Purification Technology**, v. 206, p. 268-285, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.015>

VEHMAANPERÄ, P., SAFONOV, D., KINNARINEN, T., HÄKKINEN, A. (2018). Improvement of the filtration characteristics of calcite slurry by hydrocyclone classification. **Minerals Engineering**, v.128, n.133-140, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.042>

VIEIRA, L. G. M. *Análise da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclone Filtrante*. Uberlândia: [s.n.], 1997.

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

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

WANG, B.; YU, A. Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder. **Chemical Engineering Journal**, v. 135, p. 33-42, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.009>

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. **Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2006. 456 p.

ZHANG, Y.; QIAN, P.; LIU, Y.; WANG, H. Experimental study of hydrocyclone flow field with different feed concentration. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 13, p. 8176-8184, 2011. <https://doi.org/10.1021/ie100210c>

APÊNDICE A

RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS HIDROCICLONES FILTRANTES E CONVENCIONAIS

A.1 - RESULTADOS DOS PLANEJAMENTOS PARA OS HIDROCICLONES DO CASO 1A

Tabela A. 1– Resultados experimentais para o hidrociclone HClCoF_{1a}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-\Delta P$ [bar]	E_T [%]	$E_{T'}$ [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [-]	C_{VU} [%]	Q [cm^3s^{-1}]	Q_F [cm^3s^{-1}]
1,01	3,00	1,18	72,67	66,54	10,69	13,43	18,32	3129	3,87	194,2	0,1681
1,01	3,00	1,47	74,41	68,69	10,08	12,79	18,28	3114	3,97	217,7	0,2116
1,01	3,00	1,77	74,94	69,31	10,56	13,27	18,34	3100	3,98	239,0	0,2413
1,01	4,00	1,18	79,03	70,40	4,75	10,46	29,14	2959	2,70	199,8	0,1561
1,01	4,00	1,47	80,32	72,15	4,37	10,44	29,32	3027	2,72	220,9	0,1905
1,01	4,00	1,77	81,54	73,66	4,48	10,44	29,93	3100	2,71	239,1	0,2303
1,02	5,00	1,18	83,10	70,15	2,46	11,24	43,37	2924	1,94	201,0	0,1735
1,02	5,00	1,47	84,18	71,95	2,27	10,49	43,59	2986	1,96	222,4	0,1805
1,02	5,00	1,77	84,68	72,83	1,98	9,57	43,64	2974	1,97	244,1	0,2377
5,45	3,00	1,18	65,69	59,43	11,93	14,46	15,43	3271	19,71	190,0	0,0903
5,45	3,00	1,47	68,09	62,14	10,99	13,43	15,71	3579	19,99	203,1	0,1087
5,45	3,00	1,77	69,58	63,95	9,70	12,49	15,61	3421	20,45	227,6	0,1313
5,49	4,00	1,18	75,18	65,24	5,66	11,70	28,59	3440	13,25	185,3	0,0851
5,51	4,00	1,47	76,00	66,23	5,59	11,29	28,94	3356	13,24	209,8	0,1045
5,49	4,00	1,77	76,56	66,93	4,80	9,81	29,13	3495	13,25	225,2	0,1255
5,47	5,00	1,18	78,42	63,38	2,64	11,17	41,07	3320	9,95	188,7	0,0962
5,47	5,00	1,47	80,02	65,27	1,92	10,44	42,47	3378	9,83	209,1	0,1086
5,47	5,00	1,77	81,01	67,04	1,47	9,26	42,40	3431	9,95	227,3	0,1259
9,68	3,00	1,18	53,70	48,87	19,09	20,17	9,46	3619	37,82	180,6	0,0330
9,68	3,00	1,47	55,03	50,22	17,92	19,35	9,67	3715	37,86	199,3	0,0493
9,68	3,00	1,77	56,23	51,48	17,61	18,86	9,78	3785	38,12	216,3	0,0541
9,53	4,00	1,18	69,00	59,49	9,30	14,12	23,49	3598	23,63	181,1	0,0336
9,53	4,00	1,47	70,82	62,07	9,05	13,49	23,07	3656	24,43	200,9	0,0542
9,53	4,00	1,77	72,59	63,75	8,54	13,01	24,39	3767	23,86	216,8	0,0588
9,93	5,00	1,18	75,87	62,31	3,65	12,03	35,97	3555	18,87	182,3	0,0423
9,93	5,00	1,47	77,09	63,72	2,86	11,15	36,84	3622	18,75	202,0	0,0508
9,93	5,00	1,77	80,69	68,87	2,02	8,88	37,97	3717	18,99	218,4	0,0601
5,51	4,00	1,47	75,51	65,93	5,72	11,33	28,12	3337	13,55	210,3	0,1061
5,51	4,00	1,47	75,04	64,97	6,43	12,16	28,77	3436	13,21	207,3	0,1029

Tabela A. 2 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon_{1a}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-AP$ [bar]	E_T [%]	E_T' [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm ³ s ⁻¹]
1,06	3,00	1,18	74,59	69,99	7,42	10,32	15,33	4930,3	4,97	154,7
1,06	3,00	1,47	75,09	70,61	6,98	10,13	15,23	5171,2	5,03	168,9
1,06	3,00	1,77	76,91	72,69	6,93	9,77	15,46	5188,5	5,08	184,7
1,05	4,00	1,18	80,04	71,98	3,40	6,87	28,75	4790,6	2,87	157,0
1,05	4,00	1,47	82,45	75,23	2,64	5,75	29,16	4768,3	2,92	175,9
1,05	4,00	1,77	84,03	77,48	2,31	5,24	29,10	4892,2	2,98	190,3
1,06	5,00	1,18	83,79	72,55	1,90	7,86	40,96	4522,1	2,15	161,6
1,06	5,00	1,47	84,46	73,87	1,94	8,01	40,54	4612,6	2,19	178,9
1,06	5,00	1,77	85,32	75,38	1,74	7,24	40,38	4650,0	2,22	195,1
5,56	3,00	1,18	65,01	59,80	11,09	13,55	12,97	4486,4	22,81	162,2
5,56	3,00	1,47	66,11	61,16	10,38	12,94	12,75	4586,9	23,40	179,4
5,56	3,00	1,77	67,29	62,51	10,67	12,84	12,75	4491,8	23,72	198,5
5,61	4,00	1,18	72,55	62,68	5,98	12,09	26,45	4111,3	14,02	169,5
5,61	4,00	1,47	75,99	67,11	4,84	10,65	27,02	4239,7	14,33	186,6
5,61	4,00	1,77	76,51	67,87	4,23	10,21	26,90	4375,4	14,47	201,2
5,59	5,00	1,18	78,31	64,74	2,06	13,13	38,48	3999,0	10,76	171,9
5,59	5,00	1,47	78,40	65,03	1,10	13,45	38,23	4024,8	10,83	191,5
5,59	5,00	1,77	80,46	68,36	0,80	12,45	38,25	4119,5	11,08	207,4
10,10	3,00	1,18	55,44	51,38	18,62	19,56	8,36	4131,2	42,84	169,1
10,10	3,00	1,47	57,16	53,20	17,99	18,95	8,46	4257,9	43,30	186,2
10,10	3,00	1,77	59,00	55,14	17,71	18,65	8,60	4274,4	43,68	203,6
10,06	4,00	1,18	68,74	59,42	8,70	14,56	22,96	4164,6	25,08	168,4
10,06	4,00	1,47	70,82	61,95	7,70	13,54	23,30	4247,3	25,36	186,4
10,06	4,00	1,77	70,67	61,89	7,58	13,43	23,04	4409,9	25,54	200,4
10,04	5,00	1,18	73,19	58,31	3,41	16,60	35,70	4253,4	18,62	166,6
10,04	5,00	1,47	74,31	60,02	2,86	15,57	35,74	4254,8	18,83	186,2
10,04	5,00	1,77	75,62	61,84	3,13	14,51	36,12	4473,0	18,94	198,9

A.2 - RESULTADOS DOS PLANEJAMENTOS PARA OS HIDROCICLONES DO CASO 1BTabela A. 3 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCoF_{1b}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-ΔP$ [bar]	E_T [%]	$E_{T'}$ [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm ³ s ⁻¹]	Q_F [cm ³ s ⁻¹]
1,02	3,00	1,18	74,56	68,88	8,18	11,58	18,24	1636,7	4,06	268,7	0,0855
1,02	3,00	1,47	75,37	70,07	7,90	11,13	17,70	1590,9	4,22	304,7	0,1040
1,02	3,00	1,77	76,78	71,44	8,40	11,13	18,67	1655,4	4,08	327,2	0,1224
1,10	4,00	1,18	79,65	70,05	5,63	10,81	32,06	1581,5	2,69	273,3	0,0884
1,10	4,00	1,47	80,53	71,32	5,06	9,90	32,11	1643,6	2,71	299,7	0,1067
1,10	4,00	1,77	81,21	72,23	4,82	9,67	32,33	1662,8	2,72	326,4	0,1288
1,07	5,00	1,18	85,35	73,72	1,81	8,81	44,24	1573,8	2,04	273,9	0,0892
1,07	5,00	1,47	85,22	73,44	1,38	7,98	44,37	1581,4	2,03	305,5	0,1108
1,07	5,00	1,77	86,08	74,76	1,04	7,30	44,85	1638,5	2,03	328,8	0,1370
5,71	3,00	1,18	65,94	61,70	12,11	13,82	11,05	1452,6	26,54	285,2	0,0699
5,71	3,00	1,47	69,46	65,46	11,05	12,78	11,56	1481,9	26,67	315,7	0,0866
5,71	3,00	1,77	70,90	66,98	10,16	11,98	11,87	1493,6	26,55	344,5	0,1066
5,66	4,00	1,18	76,26	67,61	8,38	14,42	26,71	1680,1	14,62	265,2	0,0716
5,66	4,00	1,47	76,74	68,36	7,23	14,16	26,49	1710,9	14,80	293,8	0,0877
5,66	4,00	1,77	78,65	70,66	6,78	13,65	27,23	1692,3	14,76	323,6	0,1026
5,60	5,00	1,18	78,87	65,73	4,27	11,84	38,35	1365,2	10,87	294,2	0,0628
5,60	5,00	1,47	79,13	65,98	3,26	10,35	38,66	1389,7	10,82	326,0	0,0779
5,60	5,00	1,77	82,59	71,10	2,80	9,38	39,76	1422,7	10,96	352,9	0,0929
9,77	3,00	1,18	53,40	49,26	18,98	19,90	8,17	1710,7	41,46	262,9	0,0678
9,77	3,00	1,47	54,13	50,05	18,92	19,83	8,16	1758,5	41,81	289,9	0,0692
9,77	3,00	1,77	57,84	53,88	18,83	19,72	8,59	1797,2	42,17	314,1	0,0897
10,35	4,00	1,18	71,17	63,65	8,94	12,50	20,69	2047,0	28,43	240,1	0,0732
10,35	4,00	1,47	73,71	66,36	8,59	12,20	21,85	2049,4	28,03	268,3	0,0838
10,35	4,00	1,77	74,31	67,07	7,64	11,40	22,00	2086,6	28,06	291,2	0,0894
10,19	5,00	1,18	75,04	60,92	4,09	12,32	36,12	1870,2	19,07	251,2	0,0755
10,19	5,00	1,47	75,51	61,80	3,74	11,67	35,88	1908,2	19,27	278,1	0,0853
10,19	5,00	1,77	79,30	67,21	2,49	10,46	36,86	1923,8	19,61	303,4	0,0955
5,66	4,00	1,47	80,80	73,08	4,16	9,25	28,75	1646,6	14,30	299,3	0,0877
5,59	4,00	1,47	79,82	71,83	5,51	10,63	28,39	1619,0	14,28	301,8	0,0892

Tabela A. 4 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon1b.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-\Delta P$ [bar]	E_T [%]	E_T' [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm^3s^{-1}]
1,00	3,00	1,18	72,76	67,99	8,36	10,68	14,91	2713,7	4,70	208,6
1,00	3,00	1,47	72,91	68,22	6,65	9,54	14,76	2811,2	4,76	229,1
1,00	3,00	1,77	73,41	68,86	6,36	8,89	14,60	2731,8	4,84	254,6
1,03	4,00	1,18	79,80	72,19	5,73	11,64	27,36	2596,9	2,95	213,2
1,03	4,00	1,47	80,54	73,18	5,48	10,98	27,45	2650,8	2,97	236,0
1,03	4,00	1,77	81,85	75,01	5,90	10,26	27,36	2625,6	3,03	259,7
1,03	5,00	1,18	80,34	68,17	2,44	7,66	38,24	2300,1	2,13	226,6
1,03	5,00	1,47	82,41	71,50	1,70	4,37	38,29	2315,6	2,18	252,4
1,03	5,00	1,77	82,18	71,37	1,74	4,38	37,74	2344,6	2,21	274,8
5,48	3,00	1,18	66,42	62,24	11,44	13,15	11,07	2418,6	25,82	221,0
5,48	3,00	1,47	66,26	62,11	11,37	12,95	10,96	2465,6	25,96	244,7
5,48	3,00	1,77	67,83	63,90	10,96	12,40	10,87	2496,5	26,58	266,4
5,47	4,00	1,18	79,29	72,65	7,26	11,47	24,27	2280,7	15,89	227,6
5,47	4,00	1,47	79,60	73,16	6,46	11,19	23,98	2344,1	16,10	251,0
5,47	4,00	1,77	81,02	75,01	5,51	10,46	24,04	2450,3	16,31	268,9
5,64	5,00	1,18	81,66	71,41	1,98	12,12	35,85	2106,1	11,97	236,8
5,64	5,00	1,47	81,91	71,93	2,39	11,74	35,54	2137,0	12,10	262,8
5,64	5,00	1,77	81,47	71,71	1,75	10,19	34,51	2096,6	12,36	290,7
10,14	3,00	1,18	54,96	51,05	18,59	19,47	8,00	2052,5	43,68	239,8
10,14	3,00	1,47	55,12	51,21	18,37	19,27	8,01	2078,2	43,72	266,4
10,14	3,00	1,77	56,81	52,98	17,86	18,77	8,14	2118,3	44,07	289,1
9,73	4,00	1,18	65,75	57,29	8,50	13,03	19,80	2273,7	26,35	227,9
9,73	4,00	1,47	71,31	63,90	6,71	11,12	20,52	2370,0	27,25	249,6
9,73	4,00	1,77	72,08	64,83	6,68	10,67	20,60	2385,5	27,39	272,5
10,00	5,00	1,18	69,34	55,41	4,97	13,61	31,24	2138,2	19,79	234,9
10,00	5,00	1,47	72,67	60,02	3,74	11,79	31,64	2278,4	20,34	254,4
10,00	5,00	1,77	76,22	64,54	3,00	10,90	32,92	2359,6	20,46	273,9

A.3 - RESULTADOS DOS PLANEJAMENTOS PARA OS HIDROCICLONES DO CASO 3ATabela A. 5 – Resultados experimentais para o hidrociclone HClCoF_{3a}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-ΔP$ [bar]	E_T [%]	$E_{T'}$ [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm ³ s ⁻¹]	Q_F [cm ³ s ⁻¹]
1,01	3,00	1,18	51,55	49,76	18,14	18,77	3,57	662,7	12,87	422,0	0,201
1,01	3,00	1,47	51,87	50,12	18,09	18,69	3,51	665,9	13,13	470,6	0,252
1,01	3,00	1,77	52,41	50,71	17,92	18,50	3,45	647,9	13,43	522,6	0,270
1,01	4,00	1,18	54,37	50,48	16,49	17,76	7,85	632,0	6,63	428,8	0,196
1,01	4,00	1,47	54,86	51,08	16,39	17,60	7,73	644,0	6,77	474,7	0,217
1,01	4,00	1,77	55,73	52,00	16,11	17,32	7,77	636,0	6,84	523,5	0,250
1,01	5,00	1,18	57,49	51,03	14,90	17,63	13,19	637,2	4,27	430,4	0,180
1,01	5,00	1,47	59,04	52,84	13,93	16,51	13,15	638,9	4,40	480,5	0,228
1,01	5,00	1,77	59,24	53,12	13,63	16,27	13,05	631,6	4,44	529,4	0,251
5,44	3,00	1,18	36,92	35,21	24,63	24,94	2,64	625,6	44,62	434,5	0,121
5,44	3,00	1,47	36,70	35,04	24,81	25,12	2,56	603,2	45,17	494,8	0,148
5,44	3,00	1,77	37,45	35,77	24,33	24,65	2,61	590,2	45,17	547,9	0,178
5,41	4,00	1,18	50,64	48,79	18,14	18,83	3,60	631,1	44,55	432,5	0,136
5,48	4,00	1,47	50,35	48,55	18,09	18,77	3,51	627,9	45,03	484,8	0,165
5,41	4,00	1,77	51,50	49,70	17,48	18,08	3,57	626,1	45,18	531,8	0,192
5,46	5,00	1,18	56,65	52,38	15,54	17,56	8,98	684,5	26,71	415,3	0,130
5,46	5,00	1,47	58,11	54,06	14,81	16,75	8,82	679,3	27,59	466,1	0,154
5,46	5,00	1,77	59,46	55,56	14,31	16,21	8,79	675,9	28,11	511,9	0,209
10,27	3,00	1,18	29,65	26,54	31,59	32,08	4,24	779,0	44,47	389,6	0,076
10,27	3,00	1,47	29,83	26,78	30,72	31,21	4,17	767,2	45,01	438,9	0,089
10,27	3,00	1,77	31,47	28,38	29,35	29,85	4,32	828,4	45,48	462,7	0,105
10,18	4,00	1,18	40,34	36,78	23,87	24,56	5,62	741,3	44,85	399,0	0,084
10,18	4,00	1,47	42,89	39,30	23,08	23,77	5,90	777,6	45,14	435,6	0,098
10,18	4,00	1,77	44,48	40,89	22,91	23,60	6,08	795,4	45,32	471,8	0,112
10,31	5,00	1,18	51,30	45,45	18,79	20,69	10,73	809,8	35,48	381,9	0,091
10,31	5,00	1,47	52,91	47,37	18,35	19,88	10,54	821,7	36,60	423,8	0,110
10,31	5,00	1,77	54,56	49,54	18,24	19,47	9,93	817,9	38,71	465,4	0,125
5,41	4,00	1,47	49,05	47,22	20,19	20,57	3,46	629,7	45,09	484,2	0,161
5,48	4,00	1,47	49,83	47,98	19,89	20,28	3,54	627,6	44,93	485,0	0,168

Tabela A. 6 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon_{3a}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-AP$ [bar]	E_T [%]	E_T' [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm ³ s ⁻¹]
0,99	3,00	1,18	47,49	47,16	20,63	20,70	0,62	659,7	43,55	423,0
0,99	3,00	1,47	49,91	49,58	19,80	19,87	0,64	675,7	43,82	467,3
0,99	3,00	1,77	50,46	50,14	19,43	19,50	0,65	685,1	43,88	508,4
0,97	4,00	1,18	53,03	50,96	15,82	16,22	4,22	787,7	11,75	394,9
0,97	4,00	1,47	55,97	54,14	15,37	15,76	3,99	804,3	12,94	443,0
0,97	4,00	1,77	55,99	54,16	15,38	15,83	3,98	825,2	12,97	484,5
0,95	5,00	1,18	60,63	57,44	14,28	15,40	7,50	747,4	7,20	397,6
0,95	5,00	1,47	62,64	59,73	13,55	14,58	7,23	754,2	7,68	442,5
0,95	5,00	1,77	62,36	59,48	13,41	14,44	7,09	757,2	7,79	483,8
5,55	3,00	1,18	37,20	35,52	26,63	26,90	2,61	631,6	45,62	432,6
5,55	3,00	1,47	38,03	36,31	26,01	26,27	2,69	633,7	45,40	482,9
5,55	3,00	1,77	38,57	36,89	25,87	26,13	2,66	632,2	46,02	529,6
5,56	4,00	1,18	47,47	45,64	21,35	21,69	3,37	722,1	45,32	404,4
5,56	4,00	1,47	48,15	46,32	20,46	20,79	3,41	724,1	45,38	451,5
5,56	4,00	1,77	49,48	47,68	18,92	19,33	3,44	733,3	45,86	491,5
5,55	5,00	1,18	51,66	49,85	16,58	17,15	3,61	749,4	45,67	396,9
5,55	5,00	1,47	53,47	51,68	15,74	16,35	3,72	744,5	45,81	445,2
5,55	5,00	1,77	53,85	52,08	15,66	16,19	3,68	741,0	46,21	488,8
9,80	3,00	1,18	29,92	27,03	30,84	31,33	3,96	789,3	45,08	386,7
9,80	3,00	1,47	31,58	28,64	30,18	30,76	4,12	795,1	45,46	430,7
9,80	3,00	1,77	31,90	28,97	29,90	30,52	4,13	845,5	45,62	457,5
9,90	4,00	1,18	40,40	37,06	23,80	24,42	5,32	810,5	45,51	381,7
9,90	4,00	1,47	41,69	38,31	23,37	24,01	5,48	881,1	45,54	409,3
9,90	4,00	1,77	44,10	40,67	22,74	23,39	5,78	883,4	45,61	447,8
10,15	5,00	1,18	50,23	46,55	20,17	21,00	6,88	955,2	45,17	351,5
10,15	5,00	1,47	51,62	47,95	19,79	20,62	7,06	952,8	45,22	393,5

A.4 - RESULTADOS DOS PLANEJAMENTOS PARA OS HIDROCICLONES DO CASO 3BTabela A. 7 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCoF_{3b}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-ΔP$ [bar]	E_T [%]	$E_{T'}$ [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm ³ s ⁻¹]	Q_F [cm ³ s ⁻¹]
1,03	3,00	1,18	66,33	63,80	13,01	13,89	6,97	737,4	9,03	400,3	0,0668
1,03	3,00	1,47	67,96	65,52	12,84	13,68	7,08	743,2	9,10	445,8	0,0794
1,03	3,00	1,77	70,30	68,01	11,72	12,63	7,15	759,3	9,30	483,2	0,0944
1,06	4,00	1,18	70,52	66,56	12,96	14,72	11,84	721,4	5,99	404,6	0,0573
1,06	4,00	1,47	72,65	68,87	12,43	14,18	12,14	736,1	6,02	447,8	0,0730
1,06	4,00	1,77	75,39	71,95	11,64	13,30	12,26	748,0	6,18	486,6	0,0828
0,99	5,00	1,18	74,84	69,44	10,47	12,79	17,68	688,8	4,04	414,0	0,0641
0,99	5,00	1,47	77,16	72,20	9,36	11,88	17,85	694,5	4,12	461,0	0,0730
0,99	5,00	1,77	78,38	73,69	9,28	11,53	17,80	700,9	4,19	502,7	0,0824
5,55	3,00	1,18	54,85	52,91	18,16	18,65	4,11	757,3	43,79	395,0	0,0411
5,55	3,00	1,47	56,14	54,29	17,81	18,30	4,05	775,0	44,73	436,5	0,0497
5,55	3,00	1,77	57,19	55,36	17,58	18,06	4,10	795,0	44,89	472,1	0,0597
5,54	4,00	1,18	61,80	59,97	14,59	15,26	4,58	752,1	44,20	396,2	0,0466
5,49	4,00	1,47	62,84	61,05	14,22	14,88	4,59	773,4	44,22	436,8	0,0560
5,54	4,00	1,77	65,06	63,32	13,93	14,53	4,74	802,0	44,61	469,9	0,0657
5,68	5,00	1,18	68,10	63,57	11,44	13,43	12,41	711,8	24,93	407,3	0,0492
5,68	5,00	1,47	68,15	63,67	11,19	13,19	12,35	723,7	25,04	451,6	0,0560
5,68	5,00	1,77	70,99	66,80	10,12	12,09	12,62	742,4	25,41	488,5	0,0663
9,97	3,00	1,18	35,48	32,20	27,02	27,53	4,84	675,9	44,83	417,8	0,0334
9,97	3,00	1,47	37,14	33,80	26,54	27,06	5,04	689,1	44,93	462,6	0,0398
9,97	3,00	1,77	38,45	35,08	26,24	26,76	5,20	709,9	45,05	499,3	0,0466
10,12	4,00	1,18	48,03	44,17	20,64	21,40	6,90	698,3	43,92	411,2	0,0367
10,12	4,00	1,47	50,19	46,43	20,01	20,75	7,03	735,2	44,57	448,0	0,0428
10,12	4,00	1,77	51,09	47,32	19,85	20,61	7,16	752,8	44,53	485,0	0,0560
9,53	5,00	1,18	58,34	53,43	15,36	17,03	10,54	681,3	36,85	416,3	0,0329
9,53	5,00	1,47	60,34	55,61	14,68	16,37	10,67	705,2	37,35	457,5	0,0469
9,53	5,00	1,77	61,61	57,01	14,32	15,95	10,70	750,3	37,76	485,9	0,0514
5,54	4,00	1,47	62,34	60,55	13,72	14,37	4,54	764,5	45,30	439,2	0,0554
5,49	4,00	1,47	62,42	60,65	14,39	15,01	4,50	781,2	44,11	434,5	0,0541

Tabela A. 8 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon_{3b}.

C_{VA} [%]	D_u [mm]	$-AP$ [bar]	E_T [%]	E_T' [%]	d_{50} [μm]	d'_{50} [μm]	R_L [%]	Eu [–]	C_{VU} [%]	Q [cm ³ s ⁻¹]
1,00	3,00	1,18	59,61	59,27	14,77	14,87	0,84	903,3	41,84	361,6
1,00	3,00	1,47	62,22	61,89	13,93	14,03	0,87	927,2	42,01	399,1
1,00	3,00	1,77	60,39	60,06	14,53	14,63	0,83	914,2	42,47	440,3
1,02	4,00	1,18	65,93	63,93	11,91	12,71	5,54	859,2	10,90	370,8
1,02	4,00	1,47	67,78	65,98	11,32	11,99	5,31	874,7	11,59	410,9
1,02	4,00	1,77	67,74	66,03	10,88	11,55	5,06	890,1	12,10	446,2
1,00	5,00	1,18	70,70	67,49	10,16	11,46	9,88	795,0	6,71	385,3
1,00	5,00	1,47	70,21	67,04	10,24	11,50	9,63	801,9	6,83	429,0
1,00	5,00	1,77	71,21	68,20	9,03	10,34	9,48	809,7	7,02	467,6
5,53	3,00	1,18	51,16	49,25	20,65	21,08	3,76	834,3	44,30	376,4
5,53	3,00	1,47	51,79	49,91	20,43	20,86	3,77	873,3	44,56	411,3
5,53	3,00	1,77	54,34	52,47	19,87	20,30	3,94	898,0	44,63	444,3
5,44	4,00	1,18	58,55	56,74	15,70	16,24	4,19	813,0	44,55	381,1
5,44	4,00	1,47	60,62	58,86	15,03	15,57	4,27	830,7	44,98	421,5
5,44	4,00	1,77	61,96	60,25	14,79	15,33	4,31	844,9	45,30	457,9
5,39	5,00	1,18	66,75	64,25	15,69	16,44	6,98	794,8	35,29	385,3
5,39	5,00	1,47	68,48	66,25	15,48	16,18	6,60	801,1	37,17	429,1
5,39	5,00	1,77	68,42	66,24	15,26	15,95	6,46	808,4	37,66	467,9
9,91	3,00	1,18	37,04	33,71	27,86	28,41	5,03	796,5	44,63	385,1
9,91	3,00	1,47	39,04	35,69	26,87	27,45	5,21	807,9	45,08	427,5
9,91	3,00	1,77	39,80	36,39	26,66	27,23	5,35	828,0	44,87	462,5
9,96	4,00	1,18	47,93	43,95	21,71	22,47	7,10	784,3	42,77	387,9
9,96	4,00	1,47	49,46	45,52	21,20	22,00	7,22	792,4	43,11	431,4
9,96	4,00	1,77	52,81	48,95	20,54	21,32	7,55	818,4	43,62	465,0
9,78	5,00	1,18	56,95	53,44	17,48	18,38	7,53	779,2	45,05	389,2
9,78	5,00	1,47	57,31	53,80	17,28	18,18	7,60	784,4	44,98	433,7
9,78	5,00	1,77	58,54	55,14	16,87	17,77	7,57	812,2	45,59	466,9

A.5 - DESVIOS EXPERIMENTAIS DAS RESPOSTAS ANALISADAS CONSIDERANDO AS RÉPLICAS DO PONTO CENTRAL

São apresentados na Tabela A.9 os resultados dos desvios experimentais das respostas analisadas considerando as réplicas do ponto central para os 8 hidrociclones estudados.

Tabela A. 9 – Desvios-padrão experimentais das grandezas analisadas para os hidrociclones das matrizes de planejamento (pontos centrais).

Hidrociclone	E_T (%)	E_T' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	RL (%)	Eu	C_{vu} (%)	Q (cm^3/s)
HCiCoF _{1a}	0,500	0,631	0,442	0,464	0,410	52,65	0,156	1,64
HCon _{1a}	1,210	1,650	0,221	0,277	0,104	47,95	0,996	1,04
HCoF _{1b}	0,532	0,457	0,734	1,715	0,711	62,75	0,447	5,55
HCon _{1b}	0,512	0,620	0,792	0,441	0,159	29,36	0,424	1,53
HCiCoF _{3a}	0,656	0,664	0,702	0,967	0,039	1,094	0,596	0,401
HCon _{3a}	0,670	0,685	0,703	0,132	0,038	4,521	0,615	1,380
HCoF _{3b}	0,267	0,264	0,348	0,337	0,177	8,357	0,658	2,36
HCon _{3b}	1,053	1,067	0,597	0,771	0,200	5,28	0,679	1,35

Fonte: A autora.

APÊNDICE B

LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE EFICIÊNCIA DOS HIDROCICLONES

Para a obtenção das curvas de eficiência dos hidrociclones realizou-se um procedimento baseado na definição de eficiência total e de eficiência total reduzida. Rearranjando a Equação 2.10, que define a eficiência total reduzida, a eficiência total (E_T) de um hidrociclone pode ser expressa como:

$$E_T = (1 - R_L) E_T' + R_L \quad (B.13)$$

Além disso, eficiência total reduzida é definida como a integral da eficiência granulométrica reduzida, conforme a equação abaixo.

$$E_T' = \int_0^1 G' dX \quad (B.14)$$

Com base nos resultados experimentais obtidos para o diâmetro de corte reduzido, foram realizadas regressões não-lineares utilizando o *software* Statistica® para estimativa dos parâmetros N e m , a partir da equação B.3.

$$G' = \frac{\left(\frac{d_p}{d'_{50}}\right)^m}{N + \left(\frac{d_p}{d'_{50}}\right)^m} \quad (B.15)$$

A distribuição granulométrica da alimentação e do *underflow* podem ser representadas por ajustes do modelo RRB aos dados experimentais, com a determinação dos parâmetros $d_{63,2}$ e n , conforme equação B.4.

$$d_p = d_{63,2} \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (B.16)$$

Substituindo a Equação B.4 na Equação B.3:

$$G' = \frac{\left\{ \frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^m}{N + \left\{ \frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^m} \quad (B.17)$$

Conforme definido na equação B.2, a eficiência total reduzida pode ser calculada através da integração em “X” da eficiência granulométrica individual reduzida (equação B.5), conforme equação B.6, variando “n” e “ $d_{63,2}/d'_{50}$ ”.

$$E_T' = \int_0^1 \frac{\left\{ \frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^m}{N + \left\{ \frac{d_{63,2}}{d'_{50}} \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^m} dX \quad (B.18)$$

Ao fixar um valor de n , que corresponde a determinada granulometria, para cada valor de $d_{63,2}/d'_{50}$ haverá um valor correspondente de eficiência total reduzida (E_T'). A partir de cada valor de eficiência total reduzida, calcula-se então a eficiência total. Desse modo, é obtida uma série de dados de E_T ao variar a razão de $d_{63,2}/d'_{50}$, para um determinado valor de n . Repete-se o procedimento alterando o valor de n .

Para cada n , foi construída uma curva diferente, sendo plotadas num mesmo gráfico, relacionando os dados de eficiência total (E_T) obtidos variando-se $d_{63,2}/d'_{50}$ e mantendo-se constantes as condições de C_{VA} e $-\Delta P$ para cada hidrociclone.

ANEXO I

I - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS HIDROCICLONES CILÍNDRICO-FILTRANTES E CONVENCIONAIS OBTIDOS POR ASCENDINO (2019)

Tabela I. 1 – Resultados experimentais para o hidrociclone HCon_{1c}.

C_{VA}	D_u	$-\Delta P$	η	η'	d_{50}	d'_{50}	R_L	Eu	C_{VU}	Q
[%]	[mm]	[bar]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[%]	[-]	[%]	[cm^3s^{-1}]
1,02	3,00	1,18	70,26	64,84	7,84	10,14	15,42	5096	4,65	151,87
1,02	3,00	1,47	73,79	69,11	7,10	9,34	15,15	5192	4,95	168,64
1,02	3,00	1,77	77,15	73,10	6,23	8,41	15,05	5213	5,19	184,42
1,03	4,00	1,18	78,89	70,34	4,15	8,99	28,83	4761	2,74	157,79
1,03	4,00	1,47	80,78	73,29	3,25	8,27	28,07	4884	2,87	173,57
1,03	4,00	1,77	81,89	74,91	2,95	7,02	27,84	5010	2,94	188,36
1,01	5,00	1,18	82,21	70,94	2,18	9,14	38,79	4146	2,12	168,64
1,01	5,00	1,47	83,46	73,08	1,03	9,01	38,56	4277	2,17	185,40
1,01	5,00	1,77	87,60	79,63	0,47	7,40	39,12	4319	2,24	202,17
5,60	3,00	1,18	56,93	52,39	13,78	15,85	9,53	3635	26,19	180,22
5,60	3,00	1,47	59,12	54,92	12,75	14,85	9,32	3647	27,37	201,15
5,60	3,00	1,77	62,22	58,14	12,06	13,86	9,75	3788	27,47	216,19
5,51	4,00	1,18	62,39	53,06	10,10	15,66	19,88	3199	15,48	192,13
5,51	4,00	1,47	64,95	56,21	8,82	14,23	19,97	3372	15,95	208,60
5,51	4,00	1,77	67,49	59,14	7,50	13,07	20,44	3412	16,16	227,81
5,51	5,00	1,18	70,57	56,78	5,91	5,91	31,90	3370	11,42	186,64
5,51	5,00	1,47	70,72	58,78	4,52	4,52	28,97	3263	12,45	212,26
5,51	5,00	1,77	71,74	60,36	4,25	4,25	28,70	3171	12,71	236,05
10,04	3,00	1,18	45,38	41,41	20,97	21,82	6,78	2805	42,77	204,43
10,26	3,00	1,47	46,02	42,01	20,32	21,20	6,91	2935	43,23	224,02
10,23	3,00	1,77	47,55	43,59	20,23	21,10	7,02	3039	43,58	241,91
10,18	4,00	1,18	59,86	49,65	12,13	18,24	20,28	3541	25,08	182,28
10,10	4,00	1,47	60,03	50,02	12,10	18,00	20,03	3550	25,20	203,58
10,14	4,00	1,77	61,53	51,76	11,80	17,50	20,25	3680	25,54	218,91
10,17	5,00	1,18	64,13	47,46	7,88	24,96	31,73	3371	18,62	187,39
1,010	5,00	1,47	64,95	48,86	7,36	18,46	31,47	3426	18,83	206,98
10,06	5,00	1,77	65,93	50,21	6,53	16,99	31,58	3473	18,94	225,72

Fonte: Ascendino (2019).

Tabela I. 2 – Resultados Experimentais para o hidrociclone HCiF_{1c}.

C_{VA}	D_u	$-ΔP$	E_T	E_T'	d_{50}	d'_{50}	R_L	Eu	C_{VU}	Q	Q_F
[%]	[mm]	[bar]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[%]	[–]	[%]	[cm ³ s ⁻¹]	[cm ³ s ⁻¹]
1,04	3,00	1,18	72,26	68,09	7,79	10,08	13,07	4451	5,46	163,04	0,0057
1,04	3,00	1,47	74,24	70,37	7,05	8,79	13,03	4596	5,62	179,84	0,0060
1,04	3,00	1,77	78,19	74,86	5,79	7,65	13,23	4626	5,82	195,65	0,0069
1,07	4,00	1,18	80,48	72,89	3,11	7,25	28,01	4374	2,95	164,03	0,0146
1,06	4,00	1,47	81,47	74,63	2,79	7,04	26,99	4443	3,12	173,91	0,0165
1,06	4,00	1,77	82,51	76,07	2,64	6,73	26,89	4475	3,17	188,74	0,0179
0,97	5,00	1,18	84,62	73,53	0,77	8,32	41,89	4652	1,93	159,09	0,0079
0,96	5,00	1,47	87,08	78,22	0,60	6,87	40,69	4528	2,04	180,83	0,0106
0,94	5,00	1,77	88,55	81,00	0,51	6,27	39,73	4574	2,07	194,66	0,0189
5,48	3,00	1,18	59,99	56,31	13,66	15,57	8,43	3093	29,21	195,05	0,0020
5,48	3,00	1,47	64,44	61,07	12,55	14,06	8,66	3209	30,14	214,29	0,0037
5,48	3,00	1,77	65,86	62,62	11,84	13,39	8,66	3382	30,60	228,94	0,0065
5,47	4,00	1,18	67,97	57,95	7,30	13,55	23,82	3289	14,18	189,56	0,0019
5,47	4,00	1,47	68,89	59,58	7,09	13,23	23,04	3337	14,76	210,62	0,0033
5,47	4,00	1,77	69,89	60,84	6,40	12,13	23,10	3514	14,90	224,36	0,0034
5,56	5,00	1,18	72,81	60,08	5,58	13,32	31,88	3458	11,85	184,98	0,0024
5,56	5,00	1,47	75,55	64,16	4,50	13,03	31,79	3592	12,28	203,30	0,0031
5,56	5,00	1,77	76,33	65,45	3,80	11,68	31,50	3634	12,49	220,70	0,0038
10,06	3,00	1,18	46,06	41,65	20,47	21,38	6,94	2653	41,80	210,39	0,0016
10,06	3,00	1,47	46,55	42,26	20,26	21,15	6,97	2692	42,05	233,39	0,0018
10,16	3,00	1,77	47,61	43,42	19,91	20,76	7,40	2936	42,14	245,32	0,0018
10,00	4,00	1,18	60,05	49,77	12,02	17,27	20,46	3158	24,59	192,50	0,0008
10,00	4,00	1,47	60,68	50,91	11,35	16,25	19,89	3224	25,31	212,95	0,0014
10,00	4,00	1,77	62,22	53,39	10,90	15,33	18,94	3268	26,74	231,69	0,0016
10,04	5,00	1,18	64,61	49,28	7,00	17,76	30,22	3080	19,26	195,06	0,0010
10,04	5,00	1,47	65,29	50,66	6,80	17,78	29,64	3137	19,73	216,35	0,0011
10,04	5,00	1,77	66,04	51,70	6,31	17,22	29,70	3177	19,88	235,95	0,0013

Fonte: Ascendino (2019).

Tabela I. 3 – Resultados Experimentais para o hidrociclone HCon_{3c}.

C_{VA}	D_u	$-\Delta P$	E_T	E_T'	d_{50}	d'_{50}	R_L	Eu	C_{VU}	Q
[%]	[mm]	[bar]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[%]	[-]	[%]	[cm^3s^{-1}]
0,98	3,00	1,18	42,76	42,44	20,66	20,53	0,55	726	43,43	402,76
0,98	3,00	1,47	43,33	43,02	20,36	19,98	0,55	733	43,88	448,17
0,98	3,00	1,77	43,36	43,06	19,85	19,66	0,53	731	44,83	491,61
1,06	4,00	1,18	54,00	52,35	15,94	16,44	3,46	704	14,34	410,66
1,06	4,00	1,47	54,36	52,83	15,53	16,01	3,26	723	15,18	452,12
1,06	4,00	1,77	54,61	53,19	15,00	15,47	3,05	712	16,13	499,51
0,98	5,00	1,18	53,58	49,71	15,62	17,02	7,70	686	6,43	414,61
0,98	5,00	1,47	56,18	52,65	15,12	16,43	7,44	691	6,94	461,99
0,98	5,00	1,77	56,66	53,29	14,28	15,57	7,22	696	7,19	504,44
5,55	3,00	1,18	39,98	38,20	24,99	25,27	2,88	633	44,91	431,84
5,55	3,00	1,47	41,39	39,61	24,18	24,47	2,94	649	45,29	476,67
5,55	3,00	1,77	42,89	41,12	23,69	23,97	3,00	647	45,68	523,33
5,51	4,00	1,18	47,41	45,56	20,95	21,31	3,41	657	44,79	423,60
5,51	4,00	1,47	49,21	47,38	20,30	20,66	3,48	665	45,20	471,18
5,51	4,00	1,77	49,39	47,61	20,09	20,45	3,40	658	45,81	518,76
5,60	5,00	1,18	50,68	48,75	19,07	19,60	3,76	636	44,38	430,92
5,60	5,00	1,47	52,32	50,42	17,84	18,40	3,83	650	44,73	476,67
5,60	5,00	1,77	54,32	52,42	17,09	17,67	3,93	670	45,01	514,18
9,98	3,00	1,18	25,59	23,01	31,32	31,71	3,35	640	45,84	428,45
9,98	3,00	1,47	27,76	25,09	30,61	30,98	3,57	644	46,28	477,00
9,98	3,00	1,77	28,25	25,57	30,04	30,42	3,60	647	46,50	521,29
10,00	4,00	1,18	39,76	36,42	24,81	25,39	5,26	693	45,64	411,41
10,00	4,00	1,47	41,43	38,12	24,20	24,79	5,35	699	46,23	458,26
10,00	4,00	1,77	42,49	39,19	23,81	24,40	5,44	694	46,48	503,41
10,01	5,00	1,18	44,48	40,92	21,79	22,48	6,04	673	45,03	417,38
10,01	5,00	1,47	45,65	42,15	21,44	22,12	6,05	683	45,61	463,37
10,01	5,00	1,77	46,96	43,53	21,09	21,76	6,07	682	46,22	508,52

Fonte: Ascendino (2019).

Tabela I. 4 – Resultados Experimentais para o hidrociclone HCiF_{3c}.

C_{VA}	D_u	$-ΔP$	E_T	E_T'	d_{50}	d'_{50}	R_L	Eu	C_{VU}	Q	Q_F
[%]	[mm]	[bar]	[%]	[%]	[μm]	[μm]	[%]	[-]	[%]	[cm ³ s ⁻¹]	[cm ³ s ⁻¹]
0,95	3,00	1,18	48,42	48,08	20,55	20,65	0,65	838	41,48	375,12	0,0476
0,95	3,00	1,47	50,05	49,73	20,11	20,20	0,64	810	42,77	426,46	0,0535
0,95	3,00	1,77	51,45	51,13	18,58	18,67	0,66	801	42,82	469,89	0,0474
0,97	4,00	1,18	54,79	52,31	15,82	16,67	5,21	708	9,35	407,70	0,0375
0,97	4,00	1,47	55,09	52,65	15,40	16,29	5,16	715	9,48	454,10	0,0485
0,97	4,00	1,77	55,70	53,37	14,47	15,35	5,00	707	9,84	500,49	0,0915
0,98	5,00	1,18	56,42	57,21	15,00	16,67	8,95	706	5,91	408,69	0,0588
0,98	5,00	1,47	57,21	53,07	13,90	15,34	8,82	706	6,07	457,06	0,0708
0,98	5,00	1,77	58,25	54,25	13,46	15,19	8,73	705	6,23	501,48	0,0982
5,49	3,00	1,18	36,90	35,07	25,52	25,82	2,81	627	43,28	433,67	0,0005
5,49	3,00	1,47	37,76	35,97	24,94	25,24	2,79	627	44,00	484,90	0,0008
5,49	3,00	1,77	39,02	37,24	24,70	25,00	2,83	625	44,49	531,56	0,0009
5,53	4,00	1,18	42,99	41,14	22,07	22,44	3,14	617	44,48	437,33	0,0008
5,53	4,00	1,47	44,62	42,79	21,77	22,16	3,19	617	45,03	488,56	0,0009
5,53	4,00	1,77	44,64	42,81	21,62	21,99	3,13	619	45,49	534,31	0,0010
5,54	5,00	1,18	48,03	45,02	19,80	20,78	5,47	578	34,00	451,97	0,0018
5,54	5,00	1,47	49,24	46,34	19,21	20,19	5,40	600	34,85	495,88	0,0022
5,54	5,00	1,77	50,82	48,08	18,76	19,69	5,28	606	36,09	540,71	0,0022
10,04	3,00	1,18	25,50	22,90	31,52	31,88	3,37	604	45,77	441,23	0,0002
10,04	3,00	1,47	27,03	24,36	30,42	30,78	3,54	621	46,05	486,37	0,0003
10,04	3,00	1,77	27,98	25,29	29,91	30,28	3,59	621	46,52	532,37	0,0004
10,03	4,00	1,18	35,92	32,67	25,60	26,13	4,82	632	45,37	431,01	0,0001
10,03	4,00	1,47	37,00	33,74	24,86	25,41	4,93	638	45,58	479,56	0,0002
10,03	4,00	1,77	37,97	34,72	24,64	25,18	4,97	645	46,02	522,15	0,0002
10,06	5,00	1,18	41,99	38,47	21,99	22,69	5,73	647	45,04	425,89	0,0004
10,06	5,00	1,47	43,13	39,64	21,44	22,21	5,78	656	45,51	473,59	0,0006
10,06	5,00	1,77	43,41	39,94	21,35	22,10	5,78	652	45,64	519,59	0,0007

Fonte: Ascendino (2019).