



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO EM HIDROCICLONES
OTIMIZADOS EMPREGANDO SISTEMAS CONCENTRADOS E
FLUIDO NÃO NEWTONIANO**

Suélen Mara Gonçalves

Uberlândia - MG

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO EM HIDROCICLONES
OTIMIZADOS EMPREGANDO SISTEMAS CONCENTRADOS E
FLUIDO NÃO NEWTONIANO**

Suélen Mara Gonçalves

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

2019

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

G635	Gonçalves, Suélen Mara, 1990-
2019	Separação sólido-líquido em hidrociclos otimizados empregando sistemas concentrados e fluido não newtoniano [recurso eletrônico] / Suélen Mara Gonçalves. - 2019.
<p>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://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2421 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p>	
<p>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.</p>	

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgqe.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 14/2019, PPGEQ				
Data:	Primeiro de outubro de dois mil e dezenove	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	15:35
Matrícula do Discente:	11613EQU009				
Nome do Discente:	Suélen Mara Gonçalves				
Título do Trabalho:	Separação sólido-líquido em hidrociclos otimizados empregando sistemas concentrados e fluido não Newtoniano				
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Análise de processos de separação sólido-líquido em hidrociclo filtrante				

Reuniu-se na sala 1K228, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Fernanda Falqueto Salvador - CCAE/UFES; Euclides Antônio Pereira Lima - UNIUBE/Campus Uberlândia; Danylo de Oliveira Silva - PPGEA/UFU; Marina Seixas Pereira - PPGEQ/UFU; Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador da candidata. Ressalta-se que a Profa. Dra. Fernanda Falqueto Salvador participou da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Alegre/ES. Os demais membros da banca e a aluna participaram *in loco*.

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 presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

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 **Luiz Gustavo Martins Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/10/2019, às 15:41, 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 01/10/2019, às 15:41, 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 01/10/2019, às 15:42, 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 **Marina Seixas Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/10/2019, às 15:42, 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 **Euclides Antônio Pereira de Lima, Usuário Externo**, em 01/10/2019, às 15:43, 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 **Fernanda Falqueto Salvador, Usuário Externo**, em 01/10/2019, às 15:44, 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 **1577495** e o código CRC **D99313B6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter sido meu auxílio em todos os momentos de minha vida e por ter me concedido mais esta vitória.

Aos meus queridos pais, Edson e Maria Abadia, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando nos estudos, ajudando-me nos momentos difíceis e me aconselhando. À minha querida irmã Tatiana, por quem eu tenho imenso carinho, que nunca poupou esforços para me ajudar. Aos demais familiares que me apoiaram. Ao meu namorado pelo carinho, incentivo e motivação.

Aos meus orientadores, Luiz Gustavo Martins Vieira e Marcos Antonio de Souza Barrozo, pela dedicação, profissionalismo, incentivo e amizade construída ao longo destes anos trabalho. Por toda instrução passada e conhecimento necessários à conclusão deste trabalho.

Às companheiras de pesquisa já egressas, Fernanda Falqueto Salvador e Yanne Novais Kyriakidis, por todo conhecimento compartilhado e disposição em ajudar.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Separação e Energias Renováveis: Érica Faria, Guilherme Ascendino, Grégori Ullmann, Vitor Garcia, Dayana D'Arc, Janaína Miranda, Raíssa Rossi, Carlos Veloso, Marcus Paulo, Daiane Ribeiro; do Laboratório de Processos de Separação: Geraldo Nogueira, Marcela Caixeta, Angélica Reis, Argileu Mendes, Raphael Santos, Rodolfo Brandão, Rondinelli Moulin, Grazielle dos Santos, Glauclia Souza; e do Laboratório de Separação Sólido-Fluido: Davi Batista, Fernando Friaça, Ana Carolina Mota, Jéssica Terra, Amanda Ribeiro que além de compartilhar esse momento comigo, ajudaram-me por diversas vezes e tornaram a rotina de trabalho mais agradável. Aos demais colegas de pós-graduação pelas horas de agradável convivência e alunos de iniciação científica que colaboraram, sobremaneira, na coleta dados experimentais.

Aos demais amigos pelos momentos alegres e palavras de incentivo.

Aos professores membros da banca examinadora, Danylo de Oliveira Silva, Marina Seixas Pereira, Euclides Antonio Pereira de Lima e Fernanda Falqueto Salvador pelas valorosas contribuições.

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

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

*“Mas em todas estas coisas somos mais que
vencedores por aquele que nos amou”.*

Romanos 8:37.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Processo de Hidrociclonagem	5
2.2. Avaliação de desempenho	10
2.3. Variáveis que influenciam o desempenho de hidrociclones.....	15
2.4. Histórico FEQUI/UFU	22
CAPÍTULO 3.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1. Unidade Experimental	25
3.2. Hidrociclones.....	28
3.3. Material Particulado	30
3.4. Viscosificante	32
3.5. Planejamento de experimentos	35
3.6. Procedimento experimental	40
CAPÍTULO 4.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Influência da Concentração de Sólidos	44
4.2. Influência da Concentração de CMC.....	59
4.3. Influência do Diâmetro de <i>Underflow</i>	69
4.4. Influência do Comprimento de <i>Vortex finder</i>	77
4.5. Equações de Desempenho	86
CAPÍTULO 5.....	111
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	111
5.1. Conclusões.....	111
5.2. Sugestões	113
REFERÊNCIAS	114

APÊNDICE A	127
A - Resultados Experimentais para o Hidrociclone MAX	127
APÊNDICE B	131
B - Resultados Experimentais para o Hidrociclone HOT	131
APÊNDICE C	135
C - Resultados Experimentais para o Hidrociclone HGOT1	135
APÊNDICE D	139
D - Resultados Experimentais para o Hidrociclone HGOT3	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-1 – Trajetória do fluido no interior de um hidrociclone.	6
Figura 2.1-2 – Dimensões características de um hidrociclone convencional.	7
Figura 2.2-1 – Formas de descarga tipo a) spray, b) corda ou fio.	13
Figura 3.1-1 – Representação esquemática da unidade experimental.	25
Figura 3.1-2 – Reservatório para suspensão dotado de chicanas, agitador e sistema de refrigeração (Foto do autor).....	26
Figura 3.1-3 – Bomba centrífuga conectada a um inversor de frequência (Foto do autor)....	27
Figura 3.1-4 – Manômetro digital instalado a montante da alimentação (Foto do autor).	27
Figura 3.2-1 – Representação esquemática da transição de forma do duto de alimentação de circular para retangular. Adaptado de Panisset (2014).....	28
Figura 3.2-2 – Representação esquemática das partes modulares dos hidrociclos HOT e MAX: A) duto de <i>overflow</i> , B) <i>vortex finder</i> , C) corpo cilíndrico de alimentação, D) prolongamento da parte cilíndrica, E) parte cônica, F) duto de <i>underflow</i>	29
Figura 3.2-3 – Imagem dos hidrociclos montados (a) HOT e (b) MAX. (Foto do autor). ...	29
Figura 3.2-4 – Imagem dos hidrociclos montados (a) HGOT1 e (b) HGOT3.....	30
Figura 3.3-1 – Distribuição granulométrica da rocha fosfática moída.	31
Figura 3.4-1 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação das soluções aquosas de carboximetilcelulose (CMC) de 0,1% a 1,0% em massa.....	33
Figura 3.4-2 – Viscosidade aparente em função da taxa de deformação das soluções aquosas de carboximetilcelulose (CMC) de 0,1% a 1,0% em massa.	34
Figura 3.5-1 – Orifícios de <i>underflow</i> (D_U) do hidrociclo MAX: (a) 7 mm, (b) 6 mm, (c) 5 mm, (d) 4 mm, (e) 3 mm.	36
Figura 3.5-2 – Orifícios de <i>underflow</i> (D_U) do hidrociclo HOT: (a) 7 mm, (b) 6 mm, (c) 5 mm, (d) 4 mm, (e) 3 mm.	36
Figura 3.5-3 – Dutos de <i>underflow</i> (D_U) dos hidrociclos HGOT1 e HGOT3: (a) 7 mm, (b) 6 mm, (c) 5 mm, (d) 4 mm, (e) 3 mm.	37
Figura 3.5-4 – Tubos de <i>vortex finder</i> (ℓ) do hidrociclo MAX: (a) 76 mm, (b) 60 mm, (c) 44 mm, (d) 28 mm, (e) 12 mm.	37
Figura 3.5-5 –Tubos de <i>vortex finder</i> (ℓ) do hidrociclo HOT: (a) 32 mm, (b) 27 mm, (c) 22 mm, (d) 17 mm, (e) 12 mm.	38

Figura 3.5-6 – Tubos de <i>vortex finder</i> (ℓ) do hidrociclone HGOT1: (a) 69 mm, (b) 55 mm, (c) 41 mm, (d) 26 mm, (e) 12 mm.	38
Figura 3.5-7 – Tubos de <i>vortex finder</i> (ℓ) do hidrociclone HGOT3: (a) 114 mm, (b) 91 mm, (c) 68 mm, (d) 45 mm, (e) 22 mm.	38
Figura 4.1-1 – Reograma das suspensões de trabalho contendo 0,6%m. de CMC e diferentes concentrações de sólidos: A - 1,0%v.; B - 5,5%v.; C - 10,0%v.	45
Figura 4.1-2 – Efeito da concentração de sólidos na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	46
Figura 4.1-3 – Efeito da concentração de sólidos no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	48
Figura 4.1-4 – Efeito da concentração de sólidos na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	50
Figura 4.1-5 – Efeito da concentração de sólidos na concentração de <i>underflow</i> dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3	51
Figura 4.1-6 – Efeito da concentração de sólidos na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	53
Figura 4.1-7 – Efeito da concentração de sólidos na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	55
Figura 4.1-8 – Efeito da concentração de sólidos no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	57
Figura 4.1-9 – Efeito da concentração de sólidos no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	57
Figura 4.2-1 – Reograma das suspensões de trabalho contendo 5,5%v. de sólidos e diferentes concentrações de CMC: A' – 0,2%m.; B – 0,6%m.; C' - 1,0%m.	60
Figura 4.2-2 – Efeito da concentração de CMC na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	61
Figura 4.2-3 – Efeito da concentração de CMC no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	62
Figura 4.2-4 – Efeito da concentração de CMC na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	63
Figura 4.2-5 – Efeito da concentração de CMC na concentração de <i>underflow</i> dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.	64

Figura 4.2-6 – Efeito da concentração de CMC na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	65
Figura 4.2-7 – Efeito da concentração de CMC na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	66
Figura 4.2-8 – Efeito concentração de CMC no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	68
Figura 4.2-9 – Efeito da concentração de CMC no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	68
Figura 4.3-1 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	70
Figura 4.3-2 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	71
Figura 4.3-3 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	72
Figura 4.3-4 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> na concentração de <i>underflow</i> dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	73
Figura 4.3-5 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	74
Figura 4.3-6 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	75
Figura 4.3-7 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	76
Figura 4.3-8 – Efeito do diâmetro de <i>underflow</i> no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	77
Figura 4.4-1 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	79
Figura 4.4-2 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	79
Figura 4.4-3 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	80
Figura 4.4-4 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> na concentração de <i>underflow</i> dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	81

Figura 4.4-5 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	82
Figura 4.4-6 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	83
Figura 4.4-7 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	84
Figura 4.4-8 – Efeito do comprimento de <i>vortex finder</i> no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.....	84
Figura 4.5-1 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclo MAX segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3, X2-X4$ e $X4-X5$	88
Figura 4.5-2 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclo MAX segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3, X2-X5, X4-X5$	90
Figura 4.5-3 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclo MAX segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3, X2-X5, X4-X5$	92
Figura 4.5-4 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclo HOT segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3$ e $X4-X5$	93
Figura 4.5-5 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclo HOT segundo os pares $X1-X2, X1-X3$ e $X2-X3$	94
Figura 4.5-6 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclo HOT segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3$ e $X2-X5$	96
Figura 4.5-7 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclo HGOT1 segundo os pares $X1-X2, X2-X3, X2-X5, X1-X4, X2-X4$ e $X3-X4$	98
Figura 4.5-8 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclo HGOT1 segundo os pares $X1-X2, X1-X3$ e $X2-X3$	100
Figura 4.5-9 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclo HGOT1 segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3$ e $X2-X5$	102
Figura 4.5-10 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclo HGOT3 segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3, X1-X4, X2-X4$ e $X1-X5$	104
Figura 4.5-11 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclo HGOT3 segundo os pares $X1-X2, X1-X3, X2-X3, X2-X4, X2-X5$	106
Figura 4.5-12 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclo HGOT3 segundo os pares $X1-X3, X2-X3, X2-X4$ e $X2-X5$	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-1 – Relações geométricas para algumas tradicionais famílias de hidrociclos (SVAROVSKY, 1984)	8
Tabela 3.2-1 – Dimensões geométricas dos equipamentos HOT, MAX, HGOT1 e HGOT3..	28
Tabela 3.4-1 – Parâmetros ajustados ao modelo de Power-Law das amostras de solução aquosa de CMC contendo 0,1 à 1,0% em massa.	35
Tabela 3.5-1 – Matriz de planejamento experimental dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3	39
Tabela 4.1-1 – Parâmetros ajustados ao modelo de Power-Law das suspensões de trabalho dos testes 17, 27 e 18 contendo 0,6%m. de CMC e 1,0%, 5,5% e 10,0% em volume de sólidos respectivamente.	44
Tabela 4.2-1 - Parâmetros ajustados ao modelo de Power-Law das suspensões de trabalho dos testes 19, 27 e 20 contendo 5,5%v. de sólidos e 0,2%, 0,6% e 1,0% em massa de CMC respectivamente.	59
Tabela 4.5-1 – Resultados obtidos na otimização da Eficiência Total e concentração do <i>underflow</i> ao operar com C_{VA} de 10,0%v e $C_{CMC} = 0,6\%$ m.	110
Tabela A – Resultados experimentais do hidrociclo MAX.....	127
Tabela B – Resultados experimentais do hidrociclo HOT.....	131
Tabela C – Resultados experimentais do hidrociclo HGOT1.....	135
Tabela D – Resultados experimentais do hidrociclo HGOT3.....	139

LISTA DE SÍMBOLOS

b_0	Contribuição do valor médio associado a uma resposta
b	Matriz dos coeficientes de primeira ordem
B	Matriz dos coeficientes de interação entre fatores
C_{CMC}	Concentração mássica de carboximetilcelulose, $[M^0L^0T^0]$
C_{VA}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
C_{Vi}	Concentração volumétrica de sólidos de uma corrente genérica i , $[M^0L^0T^0]$
C_{VU}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
C_{WA}	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
C_{Wi}	Concentração mássica de sólidos de uma corrente genérica i , $[M^0L^0T^0]$
C_{WO}	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>overflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
C_{WU}	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
d_{50}	Diâmetro de Corte, $[M^0L^1T^0]$
d_{50}'	Diâmetro de Corte Reduzido, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^1T^0]$
D_C	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
D_i	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
D_o	Diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
d_P	Diâmetro da partícula, $[M^0L^1T^0]$
D_U	Diâmetro do duto de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
Eu	Número de Euler, $[M^0L^0T^0]$
G	Eficiência granulométrica, $[M^0L^0T^0]$
G'	Eficiência granulométrica reduzida, $[M^0L^0T^0]$
H	Comprimento da seção cônica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
h	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
K	Índice de consistência do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
L	Comprimento total do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
ℓ	Comprimento do <i>vortex finder</i> , $[M^0L^1T^0]$
N	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^0T^0]$
n	Índice de comportamento do fluido, $[M^0L^0T^0]$
p	Probabilidade normal estatística, $[M^0L^0T^0]$
Q_A	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$

Q_i	Vazão volumétrica de uma corrente genérica i , $[M^0L^3T^{-1}]$
Q_o	Vazão volumétrica da corrente de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
Q_u	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^3T^{-1}]$
R^2	Coeficiente de correlação quadrático, $[M^0L^0T^0]$
R_L	Razão de líquido, $[M^0L^0T^0]$
u_c	Velocidade do fluido na seção cilíndrica, $[M^0L^1T^{-1}]$
v_a	Componente de velocidade axial, $[M^0L^1T^{-1}]$
v_r	Componente de velocidade radial, $[M^0L^1T^{-1}]$
v_θ	Componente de velocidade tangencial, $[M^0L^1T^{-1}]$
W_A	Vazão mássica da corrente de alimentação, $[M^1L^0T^{-1}]$
W_i	Vazão mássica de uma corrente genérica i , $[M^1L^0T^{-1}]$
W_o	Vazão mássica da corrente de <i>overflow</i> , $[M^1L^0T^{-1}]$
W_u	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1L^0T^{-1}]$
X	Matriz das variáveis codificadas
\bar{X}	Matriz transposta das variáveis codificadas
X_A	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que d_P na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
X_U	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que d_P na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
X_I	Variável codificada concentração volumétrica de sólidos na alimentação, $[M^0L^0T^0]$
X_2	Variável codificada concentração mássica de carboximetilcelulose, $[M^0L^0T^0]$
X_3	Variável codificada diâmetro de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
X_4	Variável codificada comprimento de <i>vortex finder</i> , $[M^0L^0T^0]$
X_5	Variável codificada queda de pressão, $[M^0L^0T^0]$
X_{4MAX}	Variável codificada comprimento de <i>vortex finder</i> do hidrociclone MAX, $[M^0L^0T^0]$
X_{4HOT}	Variável codificada comprimento de <i>vortex finder</i> do hidrociclone HOT, $[M^0L^0T^0]$
X_{4HGOT1}	Variável codificada comprimento de <i>vortex finder</i> do hidrociclone HGOT1, $[M^0L^0T^0]$
X_{4HGOT3}	Variável codificada comprimento de <i>vortex finder</i> do hidrociclone HGOT3, $[M^0L^0T^0]$
Y	Resposta relacionada a hidrocycloning determinada por regressão não linear

Símbolos Gregos

α	Nível de significância, $[M^0 L^0 T^0]$
$-\Delta P$	Queda de pressão, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
η	Eficiência total de separação, $[M^0 L^0 T^0]$
η'	Eficiência de separação reduzida, $[M^0 L^0 T^0]$
μ	Viscosidade aparente do fluido, $[M^1 L^{-1} T^{-1}]$
θ	Ângulo da parte cônica do hidrociclone, $[^\circ]$
ρ	Densidade do fluido de trabalho, $[M^1 L^{-3} T^0]$
ρ_A	Densidade da alimentação, $[M^1 L^{-3} T^0]$
ρ_i	Densidade de uma corrente genérica i , $[M^1 L^{-3} T^0]$
ρ_o	Densidade da corrente de <i>overflow</i> , $[M^1 L^{-3} T^0]$
ρ_s	Densidade real do sólido, $[M^1 L^{-3} T^0]$
ρ_U	Densidade da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1 L^{-3} T^0]$
τ	Tensão de cisalhamento, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
γ	Taxa de deformação, $[M^0 L^0 T^{-1}]$

RESUMO

Os hidrociclones são usados para separação de suspensões sólido-líquido por ação da sedimentação centrífuga. Em virtude de sua simplicidade operacional, tamanho reduzido, baixo custo de manutenção e aquisição, seu uso é difundido nos setores petroquímico, mineral, de alimentos entre outros. A geometria dos hidrociclones tem fundamental influência sobre o desempenho de separação assim como as condições operacionais vigentes na planta, como queda de pressão, percentual de sólidos alimentado e reologia do fluido. A otimização da operação de hidrocyclonagem está inserida em um cenário em que as condições operacionais são cada vez mais desfavoráveis e a busca por melhoria nos processos para redução de custos operacionais e minimização da produção de efluentes é constante. Neste sentido, a proposta deste trabalho é avaliar o desempenho de geometrias ótimas de hidrociclones, propostas por pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, operando com fluidos pseudoplásticos contendo até 10,0% de sólidos em volume. A carboximetilcelulose (CMC) foi usada como modulador reológico em concentrações que variaram de 0,2% a 1,0% em massa. O efeito da concentração de sólidos, da adição de CMC, do diâmetro de *underflow*, do comprimento de *vortex finder* e da queda de pressão foram investigados no desempenho dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 por meio de um Planejamento Composto Central. Verificou-se que o aumento da viscosidade aparente da suspensão prejudicou de forma intensa o desempenho de separação dos hidrociclones e diminuiu o número de Euler devido a diminuição da intensidade do movimento rotacional do fluido. Ao modificar o índice de comportamento, n , do fluido de 0,99 para 0,48, a Eficiência Total dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 reduziu cerca de 28%, 43%, 24% e 41% respectivamente. O hidrociclone HGOT1 apresentou resultados promissores quando trabalhou com suspensão diluída ($\eta = 58\%$). Os hidrociclones MAX e HGOT3 apresentaram desempenho de espessamento semelhante quando operados com $C_{CMC} = 0,2\%m.$ e $C_{VA} = 5,5\%$. O hidrociclone HOT apresentou desempenho intermediário comparado aos demais equipamentos. Por fim, as equações de desempenho dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 foram levantadas com ajuste satisfatório. Foi possível avaliar os hidrociclones trabalhando em uma condição próxima à vigente em um sistema de controle de sólidos utilizado em sondas de perfuração de petróleo e gás.

Palavras-chave: hidrocyclonagem, reologia, fluido de perfuração, concentração de sólidos.

ABSTRACT

Hydrocyclones are used to separate solid-liquid suspensions by centrifugal sedimentation. Due to its operational simplicity, small size, low maintenance and acquisition costs, its use is widespread in the petrochemical, mineral, food industry and other sectors. The geometry of hydrocyclones has a fundamental influence on separation performance as well as on-site operating conditions such as pressure drop, percentage of solids in the feed and fluid rheology. The optimization of the hydrocyclones operation is part of a scenario in which operating conditions are increasingly unfavorable and the search for improvements in processes to reduce operating costs and minimize effluent production is constant. In this context, the purpose of this work is to evaluate the performance of optimal hydrocyclone geometries, proposed by researchers from the Chemical Engineering Faculty at the Federal University of Uberlândia, operating with pseudoplastic fluids containing up to 10.0% of solids by volume. Carboxymethylcellulose (CMC) was used as a rheological modulator at concentrations ranging from 0.2% to 1.0% by weight. The effect of solids concentration, the addition of CMC, the underflow diameter, the vortex finder length and the pressure drop were investigated in the performance of the MAX, HOT, HGOT1 and HGOT3 hydrocyclones through a Central Composite Design. The increasing of the suspension's apparent viscosity was found to severely impair hydrocyclone separation performance and to decrease the Euler number, due to a reduction in the intensity of rotational fluid movement. By modifying the fluid behavior index, n , from 0.99 to 0.48, the Total Efficiency of the MAX, HOT, HGOT1 and HGOT3 hydrocyclones decreased by 28%, 43%, 24% and 41%, respectively. The HGOT1 hydrocyclone showed promising results when working with diluted suspensions ($\eta = 58\%$). The MAX and HGOT3 hydrocyclones presented similar thickening performances when operated with $C_{CMC} = 0.2\%$ w. and $C_{VA} = 5.5\%$. The HOT showed intermediate performance when compared to other hydrocyclones. Finally, the performance equations of the MAX, HOT, HGOT1 and HGOT3 hydrocyclones were obtained and presented satisfactory fit. It was possible to evaluate hydrocyclones by working under conditions close to the ones observed in solid control systems, used in oil and gas drilling rigs.

Keywords: hydrocycloning, rheology, drilling fluid, solids concentration.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A operação de hidrociclonagem difundiu-se no século XX por ser uma alternativa economicamente viável e com satisfatória eficiência na separação sólido-líquido em comparação a outros separadores como filtros e centrífugas. Desde então, os hidrociclos são aplicados em diferentes setores industriais por sua simplicidade e versatilidade. Os hidrociclos são usados, por exemplo, na indústria mineral para classificação de partículas na etapa de moagem do minério e no espessamento de suspensões; no sistema de controle de sólidos em sondas de perfuração no setor petroquímico, como na separação de emulsões líquido-líquido. Por sua vez, ainda podem estar presentes na indústria de alimentos, química, têxtil e em diversos setores para separação de impurezas/microrganismos no tratamento de efluentes.

Em geral, os hidrociclos consistem em um cilindro acoplado a um tronco de cone com uma entrada tangencial e duas saídas, uma na parte inferior, chamada de orifício de *underflow*, e outra na parte superior, chamada tubo de *overflow* (SVAROVSKY, 2000). Um balanço entre as forças centrífuga e de arraste é responsável pela separação de partículas por hidrociclonagem. O fluido ao entrar no equipamento descreve um movimento helicoidal descendente, de modo que, as partículas grossas e mais densas, por sofrerem maior ação da força centrífuga, são direcionadas às paredes do hidrociclo e, assim, têm mais chances de serem descarregadas no *underflow*. Um segundo vórtice, com sentido contrário ao primeiro, forma-se no centro do hidrociclo, arrastando as partículas menores e menos densas para a saída superior. Dessa forma, os hidrociclos são capazes de classificar partículas por tamanho e/ou densidade ou concentrar determinada suspensão.

A operação ideal de hidrociclonagem teria como resultado a corrente de *overflow* totalmente clarificada, sem a presença de sólidos, e a corrente de *underflow* com o mínimo de líquido descarregado junto aos sólidos. Todavia, as geometrias de equipamentos existentes que alcançam alta concentração de sólidos no *underflow*, chamados de hidrociclos espessadores, possuem elevada perda de grossos pelo *overflow* o que limita seu potencial de classificação. Em contrapartida, os equipamentos com elevada eficiência, ou seja, que clarificam o *overflow*, também possuem pontos de falha por descarregar grande quantidade de líquido pelo *underflow*.

Em relação às condições operacionais, os hidrociclos trabalham com elevada eficiência quando a suspensão é diluída (SVAROVSKY, 2000), todavia, parte dos processos industriais possui sistemas densos e com características não newtonianas (ORTEGA-RIVAS e SVAROVSKY, 1998). Ao longo do processo podem ocorrer mudanças nas características do fluido, tanto em relação à alteração da viscosidade quanto à quantidade de sólidos presentes. Além disso, cada equipamento depende do desempenho de seu antecedente e, caso haja problemas com este, as operações subsequentes podem ser comprometidas (KAWATRA e EISELE, 1988).

Em geral, há pouca possibilidade de flexibilização nos projetos já existentes em uma indústria. Em alguns casos não há espaço disponível na planta para ampliação, deve-se priorizar pela economia de recursos energéticos e naturais, além de minimizar a produção de rejeitos. Com o passar dos anos, modificações nos processos fazem com que as plantas industriais não trabalhem mais em sua faixa operacional primariamente projetada. Em geral condições mais drásticas entram em vigor para minimização de custos ou até mesmo por não haver uma forma de controlar as características de entrada de material. No setor petroquímico, este cenário não é diferente.

No processo de perfuração de poços de petróleo e gás são gerados fragmentos de rocha, chamados de cascalho, que são removidos continuamente através de um fluido de perfuração. Devido a necessidade de reaproveitamento do fluido, para redução de custos e de formação de rejeitos, são necessárias etapas de separação sólido-líquido para sua limpeza, nas quais a hidrociclonagem está presente. Além disso, o cascalho contaminado com fluido de perfuração deve ser condicionado ao descarte correto segundo as leis ambientais. Ao investigar o processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás, Pereira (2010) observou que o percentual de sólidos alimentado nos hidrociclos era de cerca de 10,0% em volume e que o fluido apresentava caráter não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico.

Neste cenário, a otimização da hidrociclonagem operando com fluidos de diferentes características reológicas é um desafio. Uma das alternativas para elevar a eficiência e reduzir gastos energéticos é a otimização das dimensões geométricas do equipamento. Neste sentido, a Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia tem somado esforços ao longo dos anos e destacou-se por apresentar estudos relevantes nesta área. Vieira (2006), através de testes experimentais, obteve 25 novas geometrias de hidrociclos ao estudar os efeitos das variáveis geométricas diâmetro de alimentação, diâmetro de *overflow*, comprimento total do hidrociclo e ângulo da parte cônica. Em especial, a configuração HC11 destacou-se por apresentar alta eficiência e baixo consumo energético.

A partir do promissor trabalho de Vieira (2006), outros estudos foram desenvolvidos utilizando técnicas mais robustas de otimização geométrica, como foi o caso de Silva (2012) que utilizou um algoritmo de Evolução Diferencial associado a técnicas de superfície de resposta para obtenção de geometrias com objetivos específicos de otimização. Em seguida outros pesquisadores também trabalharam com a otimização de dimensões geométricas (PANISSET, 2014; SILVA, 2014; MOGNON, 2015; SALVADOR, 2017; KYRIAKIDIS, 2018). No entanto, nos estudos de otimização, os testes foram conduzidos com fluido newtoniano com baixa concentração de sólidos.

Algumas configurações geométricas de hidrociclos otimizados destacaram-se por apresentarem características peculiares. A configuração geométrica MaxEf2, desenvolvida por Panisset (2014) utilizando nos testes suspensão com 1,0% de rocha fosfática em água, apresentou baixo consumo energético, baixa razão de líquido (3,0 - 4,5%) e razoável eficiência (66 - 75%). Esta configuração geométrica será chamada no presente estudo de MAX.

Mognon (2015) propôs uma configuração geométrica que apresentou elevados níveis de eficiência (81-89%) e razão de líquido reduzida (7-38%), resultados estes obtidos nos testes de otimização com suspensão contendo 0,5% de sólidos em volume e água como fase contínua. O autor ainda testou o equipamento otimizado, chamado de HOT, com fluido pseudoplástico, no entanto, as concentrações de sólidos e viscosificante utilizadas nos testes foram bem inferiores ao proposto no presente estudo.

Kyriakidis (2018) fez um levantamento e compilação de dados de 2 décadas de estudos sobre de hidrociclonagem na FEQUI/UFU e através de técnicas de otimização discreta e semi-contínua propôs configurações geométricas ótimas com objetivos distintos. A geometria HGOT1, otimizada para alta eficiência destacou-se por manter a eficiência em níveis elevados (70-91%) e apresentar capacidade de processamento cerca de 34% maior que os equipamentos anteriormente desenvolvidos para este fim. Outro equipamento em destaque foi o HGOT3, formulado para redução do consumo energético, que apresentou resultados promissores no que tange à concentração da corrente de *underflow*, cerca de 28% maior que o equipamento mais concentrador do banco de dados. Os testes experimentais e computacionais de Kyriakidis (2018) também foram conduzidos com fluido newtoniano em suspensão diluída, com até 1,0% de sólidos em volume.

Em virtude dos promissores resultados obtidos com os hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 ao trabalhar com suspensão de sólidos diluída e de caráter newtoniano, surgiu o interesse em empregá-los em operações com sistemas concentrados e de caráter não newtoniano.

1.1. OBJETIVOS

Ante ao todo exposto, o objetivo geral do presente trabalho foi estudar o efeito da modificação da reologia de fluidos não newtonianos através da adição de um viscosificante e da alteração na concentração de sólidos, em até 10,0% em volume, na alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Diferentes condições operacionais de queda de pressão foram testadas para levantamento de suas equações de desempenho. Ainda, objetivou-se o estudo da variação das dimensões acessórias, tais como o comprimento de *vortex finder* e o diâmetro de *underflow*. Havia o interesse de reproduzir condições próximas as condições operacionais de campo em um sistema de limpeza de fluidos de perfuração, e se possível, sugerir um equipamento para aplicação industrial.

Especificamente, os objetivos desta tese são:

- Avaliar o desempenho do hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico em diferentes condições operacionais;
- Comparar os resultados obtidos dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico com os resultados dos mesmos operando com fluido newtoniano e concentração de sólidos diluída avaliados em trabalhos anteriores;
- Avaliar o efeito da concentração de sólidos na operação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico;
- Avaliar o efeito da adição de viscosificante na suspensão de trabalho dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico;
- Avaliar o efeito da variação do diâmetro de *underflow* na operação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico;
- Avaliar o efeito da variação do comprimento de *vortex finder* dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico;
- Estudar os efeitos lineares, quadráticos e de interação dos fatores das variáveis concentração de sólidos na alimentação (C_{VA}), concentração de carboximetilcelulose (C_{CMC}), diâmetro de *underflow* (D_U), comprimento de *vortex finder* (ℓ) e queda de pressão ($-\Delta P$) sobre as principais respostas relacionadas à hidrocyclonagem para os hidrociclos otimizados, tais como Número de Euler, Razão de Líquido, Concentração de sólidos no *underflow*, Eficiência Total e diâmetro de corte;
- Determinar uma condição/equipamento que maximize a concentração de sólidos no *underflow* e mantenha a eficiência em níveis elevados ao operar com fluido de caráter próximo ao fluido presente em um sistema de controle de sólidos em sondas de petróleo.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, os princípios da separação de partículas por hidrocyclonagem são abordados, assim como as principais respostas associadas a essa operação. Também são detalhadas as dimensões características de um hidrociclone e formas de avaliar seu desempenho. Uma breve revisão da literatura a respeito das variáveis que alteram o desempenho de hidrociclos está apresentada como forma de embasar o presente estudo. Além disso, uma série de trabalhos correlatos à área de hidrocyclonagem ilustra o crescente interesse de pesquisadores sobre esse assunto tão relevante.

2.1. PROCESSO DE HIDROCICLOMAGEM

2.1.1. Princípios de Funcionamento

Os hidrociclos são usados para separar suspensões sólido-líquido e emulsões líquido-líquido. São equipamentos simples, não possuem partes móveis, seu custo de aquisição é baixo e sua manutenção fácil. Além disso, alcançam altas eficiências com baixo consumo energético. O mecanismo de separação de partículas é o da sedimentação centrífuga de modo que partículas são classificadas por diferença de densidade e/ou tamanho através da atuação das forças centrífuga e de arraste (SVAROVSKY, 2000).

Como ilustrado na Figura 2.1-1, o fluido é alimentado sob pressão tangencialmente à parte superior cilíndrica, adquirindo um movimento espiral para baixo. As partículas maiores e mais densas são arrastadas até a parede, descrevem o movimento descendente do fluido e saem pelo *underflow*, corrente de material concentrado. Uma região de pressão negativa é formada no centro do hidrociclone e então, parte do fluido ao entrar na parte cônica adquire um movimento espiral ascendente carreando as partículas mais finas e menos densas, aquelas que não tiveram velocidade suficiente para atingir a parede do equipamento, para serem descarregadas no duto de *overflow*, formando a corrente de clarificado (SVAROVSKY, 2000).

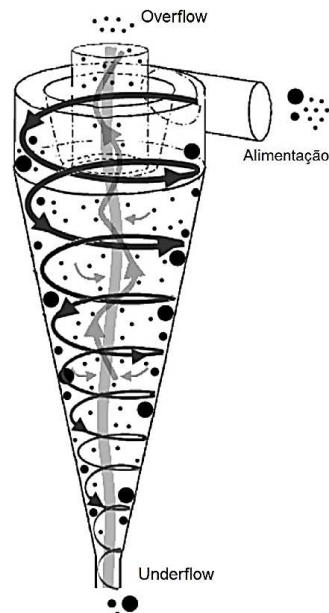


Figura 2.1-1– Trajetória do fluido no interior de um hidrociclone.

Adaptado de Davailles *et al.* (2012a).

Por serem versáteis, os hidrociclos são usados tanto em operações de espessamento, quando o interesse principal é que a menor quantidade de líquido seja descarregada na corrente de *underflow*, quanto em operações de classificação, quando é necessário separar partículas em faixas granulométricas. Como a alteração das dimensões do equipamento altera a fluidodinâmica das partículas e, portanto, o desempenho do hidrociclo, a escolha da geometria é fundamental para o sucesso de determinada operação (SVAROVSKY, 2000).

A modelagem do escoamento em hidrociclos é complexa devido a sua turbulência e caráter tridimensional. Dessa forma a trajetória das partículas pode ser explicada através da decomposição da velocidade em tangencial (v_θ), axial (v_a) e radial (v_r). Em geral, a velocidade tangencial independe da posição vertical. Considerando o eixo axial simétrico, v_θ cresce consideravelmente com o decréscimo do raio até determinado ponto de quebra do crescimento próximo ao centro. Ao longo das paredes externas, há um forte fluxo descendente, responsável pela remoção das partículas que são separadas no *underflow*. Entre a parede do hidrociclo e a localização do *vortex finder* a velocidade axial torna-se ascendente e o fluxo para baixo é contrabalanceado pelo fluxo ascendente, região conhecida como *locus of zero vertical velocities* (LZVV). Com sentido para o centro, a componente radial da velocidade em geral é menor que as outras duas componentes, e sua magnitude decresce com o decréscimo do raio (SVAROVSKY, 2000).

Alguns fenômenos que afetam o desempenho dos hidrociclones podem ocorrer, como é o caso do curto circuito de partículas. O curto circuito é formado devido ao choque de fluido que entra no equipamento com a parte de fluido que já completou uma volta, e com o fluido em fluxo ascendente próximo à entrada do duto de *vortex finder*. Por consequência a velocidade de escoamento decresce rapidamente. Neste caso, uma corrente preferencial de fluido alimentada segue para a corrente de *overflow* sem passar pelo processo de hidrocyclonagem, o que aumenta o escape de grossos pelo *overflow*. Dessa forma, o consumo energético é maior e a eficiência menor. Sabe-se que a correta seleção do comprimento do tubo de *overflow* evita a formação do curto circuito próximo à entrada da alimentação (MARTÍNEZ *et al.*, 2008).

Outro fato indesejável que ocorre devido à formação de uma região de pressão negativa no centro do hidrociclocone, é o chamado *air-core*. Esta coluna de ar que entra pelo orifício de *underflow* e sai pelo *overflow*, pode ser eliminada alterando as condições operacionais ou aplicando contrapressão (VIEIRA, 2006).

2.1.2. Geometria de Hidrociclones

Ilustram-se na Figura 2.1-2 as principais dimensões características de um hidrociclocone em sua forma convencional, onde D_C representa o diâmetro da parte cilíndrica, D_i o diâmetro da alimentação, D_o o diâmetro de *overflow*, D_U o diâmetro de *underflow*, ℓ o comprimento do *vortex finder*, h o comprimento da parte cilíndrica, H a altura da parte cônica, θ o ângulo da parte cônica e L o comprimento total do equipamento.

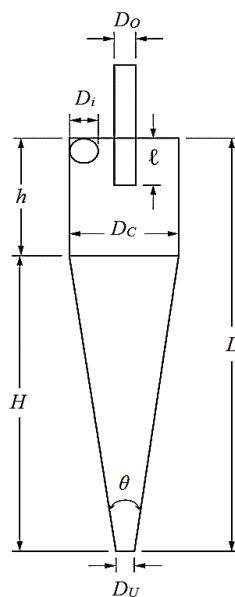


Figura 2.1-2 – Dimensões características de um hidrociclocone convencional.

As diferentes combinações de dimensões características dão origem a equipamentos de características distintas (WANG e YU, 2006), no entanto, caso as mesmas relações geométricas sejam encontradas, estes equipamentos são agrupados em uma mesma “família” de hidrociclones. Este tipo de classificação é usado para agrupar os equipamentos com as mesmas relações geométricas entre determinada dimensão característica e o diâmetro da parte cilíndrica. Existem tradicionais “famílias” de hidrociclones já consolidadas na literatura e conhecidas por sua principal finalidade, como os hidrociclones da “família” Bradley, que são usados para classificação de partículas, e os da “família” Rietema, tradicionalmente usados para concentração de suspensões. Na Tabela 2.1-1 apresentam-se as relações geométricas de algumas tradicionais “famílias” de hidrociclones.

Tabela 2.1-1 – Relações geométricas para algumas tradicionais famílias de hidrociclones (SVAROVSKY, 1984).

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

Individualmente, os hidrociclones são pequenos comparados a outros separadores como decantadores e centrífugas. Possuem diâmetro típico da parte cilíndrica de 10 mm até 2,5 m (SVAROVSKY, 2000), todavia existem equipamentos com diâmetro menor que 10 milímetros, chamados de mini-hidrociclones, desenvolvidos para aprimorar a separação de finos (ZHU *et al.*, 2012). Para garantir a capacidade de processamento de grandes quantidades de fluido, múltiplas unidades podem ser arranjadas em paralelo (HUANG *et al.*, 2013; LV *et al.*, 2018) ou em série para elevar a recuperação de sólidos, obter um concentrado mais espesso e um *overflow* mais límpido simultaneamente (SVAROVSKY, 2000).

2.1.3. Aplicações

A depender da combinação das dimensões do hidrociclone e das condições operacionais, diferentes empregos são possíveis (SVAROVSKY, 2000). Os hidrociclos podem ser usados para clarificação de líquidos (JANK *et al.*, 2017), espessamento de lamas (GARMSIRI e UNESI, 2018), limpeza de sólidos (HUANG *et al.*, 2017b), classificação por tamanho de partículas (GOLMAEI *et al.*, 2018), fracionamento de acordo com a densidade ou forma da partícula (BOYLU *et al.*, 2010), desgaseificação de líquidos, separação de líquidos imiscíveis (MEYER e BOHNET, 2003), separação de óleo da água (ALTIERI *et al.*, 2015; LI e HUANG, 2016), separação trifásica (LIU *et al.*, 2015) tratamento de efluentes (LIU *et al.*, 2017), entre outros (CILLIERS e HARRISON, 2019; HUANG *et al.*, 2017a).

Além de sua versatilidade, estudos têm comprovado a eficácia da operação de hidrocyclonagem em relação a outras operações. Por exemplo, na indústria alimentícia, Altieri *et al.*, (2015) confirmaram os benefícios do uso de hidrociclos em relação a centrífugas na operação de limpeza do óleo de oliva virgem. Além da maior capacidade de operação no novo processo, o produto apresentou qualidade superior tanto em relação à estabilidade do óleo quanto ao nível de antioxidantes e pigmentos presentes.

Na indústria química, o ácido fosfórico é purificado por extração com fosfato de tributila e, ao fim da extração, a separação destes dois líquidos de diferentes densidades pode ser realizada com baixo custo e elevada eficiência através da hidrocyclonagem, ao invés de outras operações clássicas para desemulsificação como aquecimento, ultrafiltração, centrifugação e uso de membranas (CAO *et al.*, 2016). Ainda, segundo Huang *et al.*, (2017a), a remoção de enxofre, de forma rápida e profunda, dos combustíveis pode ser realizada através da associação das operações de absorção e separação em hidrociclos.

No tratamento de minérios os hidrociclos estão presentes tanto como classificadores nos circuitos de moagem (PALANIANDY *et al.*, 2017), quanto nos circuitos de espessamento (GARMSIRI e UNESI, 2018). Em especial, a possibilidade do reaproveitamento de terras raras através da hidrocyclonagem tem sido objeto de estudo (YU *et al.*, 2017).

No setor petroquímico os hidrociclos são usados em várias etapas: no sistema de controle de sólidos dos fluidos de perfuração (MOGNON *et al.*, 2015), para remoção de óleo em águas de reprocesso (LI e HUANG, 2016) e ainda na limpeza de partículas recobertas com óleo para descarte (HUANG *et al.*, 2017b).

2.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção serão abordadas as principais respostas relacionadas à hidrociclonagem usadas para avaliar o desempenho desta operação. No presente estudo foram utilizadas as seguintes respostas: capacidade de operação, adimensional de Euler, eficiência total e reduzida, eficiência granulométrica e granulométrica reduzida, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido, razão de líquido e concentração do *underflow*. Também existem outras formas de avaliar o desempenho, como a observação do padrão de descarga da corrente de *underflow* e as técnicas de fluidodinâmica computacional, formas abordadas em seguida.

2.2.1. Capacidade de operação

A capacidade de operação de um hidrociclone é quantificada através da vazão volumétrica alimentada (Q_A) em uma determinada queda de pressão. Para cálculo da vazão volumétrica (Q_i) de uma corrente i tem-se a Equação 2.2-1. Neste caso, W_i representa a vazão mássica da corrente, aferida por técnicas de gravimetria, e ρ_i a densidade da corrente determinada pela Equação 2.2-2. C_{Wi} representa a concentração mássica da corrente i , em que o subscrito i indica uma corrente genérica (alimentação, *overflow* ou *underflow*). Além disso, ρ representa a densidade do fluido de trabalho e ρ_S representa a densidade do sólido em suspensão.

$$Q_i = \frac{W_i}{\rho_i} \quad (2.2-1)$$

$$\rho_i = \frac{\rho}{1 - C_{Wi} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_S} \right)} \quad (2.2-2)$$

2.2.2. Concentração volumétrica

A concentração volumétrica de sólidos (C_{Vi}) é calculada por meio da aferição prévia da concentração mássica de uma corrente (C_{Wi}) através de técnicas de gravimetria. A Equação 2.2-3 ilustra o cálculo da concentração volumétrica de uma corrente genérica i .

$$C_{Vi} = \frac{1}{\left[\frac{\rho_S}{\rho} \left(\frac{1}{C_{Wi}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (2.2-3)$$

2.2.3. Razão de Líquido

Os hidrociclones trabalham como divisores de correntes e parte da massa sólida é separada independentemente da atuação da força centrífuga pelo popular “efeito T” (SILVA, 2012). Para quantificar este fenômeno, tem-se a resposta Razão de Líquido (R_L) que representa a fração de líquido que inicialmente alimentada no hidrociclone é descarregada na corrente de *underflow*. Dessa forma, esta resposta também avalia o poder de espessamento do equipamento, quanto menor a razão de líquido, menor é a quantidade de líquido descarregada junto aos sólidos e então mais concentrada é a corrente de *underflow*. A Equação 2.2-4 mostra o cálculo da Razão de Líquido, sendo que os subscritos “*A*” e “*U*” indicam as correntes de alimentação e *underflow*, respectivamente.

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{vU})}{Q_A(1 - C_{vA})} \quad (2.2-4)$$

2.2.4. Número de Euler

Uma forma de quantificar o consumo energético de um hidrociclone é através do adimensional de Euler (Eu). Este representa a relação entre a queda de pressão e a energia cinética por unidade de volume, ou seja, quanto maior a queda de pressão necessária para processar uma mesma quantidade de fluido, maior é o número de Euler e maior o consumo de energia (SILVA, 2012). A Equação 2.2-5 representa o cálculo deste adimensional, sendo necessário conhecer a queda de pressão ($-\Delta P$), a densidade do fluido de trabalho (ρ) na temperatura de operação e a velocidade na seção cilíndrica (u_c). A velocidade na seção cilíndrica é calculada através da Equação 2.2-6, representada pela relação entre a vazão volumétrica de alimentação (Q_A) e a área da seção cilíndrica.

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (2.2-5)$$

$$u_c = \frac{4Q_A}{\pi D_C^2} \quad (2.2-6)$$

2.2.5. Eficiência Total e Eficiência Reduzida

O percentual mássico de sólidos coletado na corrente de *underflow* em relação ao percentual alimentado é quantificado através da Eficiência Total (η), representado pela Equação 2.2-7. Neste caso estão contabilizados tanto o efeito da força centrífuga, quanto o arraste de sólidos. Ao desconsiderar a influência da divisão de fluxo, ou seja, considerando apenas as partículas coletadas no *underflow* devido à ação do campo centrífugo, tem-se a Eficiência Total Reduzida (η'), representada pela Equação 2.2-8.

$$\eta = \frac{C_{wU}W_U}{C_{wA}W_A} \quad (2.2-7)$$

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (2.2-8)$$

2.2.6. Eficiência Granulométrica e Eficiência Granulométrica Reduzida

Para avaliar o poder de separação por tamanho de partícula, tem-se a Eficiência Granulométrica, que representa a probabilidade de partículas com determinado tamanho serem separadas na corrente de *underflow* (VIEIRA, 2006). Para cálculo da Eficiência Granulométrica (G) a Equação 2.2-9 é usada, representando então o produto da eficiência total (η) pela relação entre a distribuição de tamanho das partículas das correntes de *underflow* (dX_U) pela corrente de alimentação (dX_A). A Equação 2.2-10 representa o cálculo da Eficiência Granulométrica Reduzida (G'), que, assim como as outras variáveis reduzidas, quantifica apenas as partículas coletadas devido à ação do campo centrífugo.

$$G = \eta \frac{dX_U}{dX_A} \quad (2.2-9)$$

$$G' = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (2.2-10)$$

2.2.7. Diâmetro de Corte e Diâmetro de Corte Reduzido

O diâmetro da partícula (d_p) coletada com eficiência granulométrica (G) de 50% é o Diâmetro de corte (d_{50}) (SVAROVSKY, 2000). Partículas com diâmetro maior que o diâmetro de corte terão probabilidade acima de 50% de serem coletadas no *underflow*. O diâmetro de corte determina o poder de classificação de um hidrociclone, tanto por ação da força centrífuga, quanto pelo arraste de partículas. O diâmetro de corte reduzido ($d_{50'}$) quantifica apenas o efeito centrífugo, e pode ser definido como o diâmetro da partícula (d_p) que é coletada com eficiência granulométrica reduzida (G') de 50%.

2.2.8. Tipo de descarga

Na indústria, uma das formas de avaliar a operação de hidrocyclonagem é pela observação do tipo de descarga do *underflow*, já que sua forma está diretamente correlacionada com as condições operacionais e, por consequência, com o produto obtido. Sabe-se que características da alimentação, como queda de pressão, concentração de sólidos e distribuição granulométrica, além da geometria do equipamento influenciam o perfil de velocidades do fluido.

Nos casos em que o equipamento trabalha com altas velocidades tangenciais, em geral quando alimentado com baixa concentração de sólidos, uma região de baixa pressão leva ao aparecimento do *air-core* culminando na descarga do tipo “*spray*”, ilustrado na Figura 2.2-1 (a) (DAVAILLES *et al.*, 2012b).

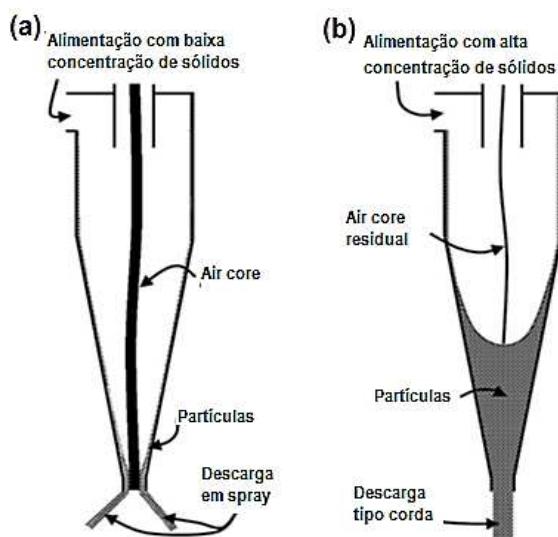


Figura 2.2-1 – Formas de descarga tipo a) spray, b) corda ou fio.

Adaptado de Davailles *et al.* (2012b).

Todavia acréscimos na viscosidade do fluido levam a uma diminuição progressiva do *air-core* e um estado de transição é observado até a formação do tipo de descarga em “corda” ou “fio” (Figura 2.1-1b), quando a saída não forma mais ângulo com a vertical pela extinção da entrada de ar. Neste último caso, a restrição do escoamento no *underflow* causa um acúmulo de sólidos na seção cônica, o que torna esta corrente espessa, mas permite o escape de grossos pelo *overflow* (DUBEY *et al.*, 2017; NEESSE *et al.*, 2004; PÉREZ *et al.*, 2018).

No estudo de Dubey *et al.* (2017), o menor diâmetro de corte foi encontrado em uma condição de transição anterior à descarga em fio o que fez com que o autor concluisse que a descarga do tipo corda não indica necessariamente uma condição favorável para a operação de espessamento.

2.2.9. Modelagem/Fluidodinâmica computacional

As técnicas de modelagem fluidodinâmica computacional (CFD) têm mostrado seu potencial em prever com determinada confiabilidade o desempenho de hidrociclos. Ao longo dos anos, diversos foram os estudos para validação de modelos utilizando esta técnica. Cullinan *et al.* (2003), um dos pioneiros na aplicação de modelos tridimensionais, almejava a compreensão do movimento do fluido no interior dos hidrociclos e o mecanismo de separação de partículas. Ainda com limitações quanto à incorporação dos efeitos de interação entre partículas, Olson *et al.* (2004) utilizaram técnicas de CFD para prever o comportamento de hidrociclos de diferentes geometrias e puderam validar o modelo proposto. Ao longo dos anos diversos estudos foram conduzidos e a técnica aprimorada (NARASIMHA *et al.*, 2005; BHASKAR *et al.*, 2007; BRENNAN *et al.*, 2007; DELGADILLO e RAJAMANI, 2007; SURESH *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2011; CHU *et al.*, 2012a, 2012b; DAVAILLES *et al.*, 2012a; KASHIWAYA *et al.*, 2012; NARASIMHA *et al.*, 2012; WANG e WANG, 2012; SWAIN e MOHANTY, 2013; KUANG *et al.*, 2014; TANG *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2015).

Narasimha *et al.* (2014) com o objetivo de melhorar modelos anteriormente propostos, usou conceitos de fluidodinâmica computacional associados a dados de desempenho de hidrociclos industriais, para descrever com maior precisão o desempenho de hidrociclos numa faixa operacional menos restrita que os modelos anteriores.

Além da fluidodinâmica computacional e da modelagem matemática, outros métodos, como o processamento de imagens, são aplicados para estudar o perfil de velocidades e o desempenho de hidrociclos (WANG *et al.*, 2016).

2.3. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE HIDROCICLONES

A queda de pressão na entrada do equipamento e a concentração de sólidos são as condições operacionais que mais influenciam o desempenho dos hidrociclos. Portanto, ao se projetar uma unidade de hidrociclonagem, o primeiro passo é definir a forma de bombeamento do fluido baseado na quantidade de energia e recursos financeiros disponíveis. As perdas de carga devem ser contabilizadas assim como deve ser levado em consideração o tipo de fluido a ser processado, se newtoniano ou não-newtoniano, e a quantidade de sólidos presente. Além da energia dada ao sistema, representada pela queda de pressão na entrada do hidrociclo, as variáveis concentração de sólidos e diferença de densidade entre fases, reologia do fluido e a geometria do equipamento influenciam sobremaneira o desempenho dos hidrociclos. Estas variáveis serão abordadas com maiores detalhes nesta seção.

2.3.1. Queda de pressão

Sabe-se que quanto maior a queda de pressão melhor o desempenho de separação e maior o consumo energético (TIAN *et al.*, 2018). Em média, os hidrociclos trabalham 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).

Apesar do alto custo de manutenção, a hidrociclonagem sob alta pressão tem sido uma opção para aprimorar a classificação de partículas ultrafinas. Neesse *et al.* (2015) estudaram mini-hidrociclos operando com até 60 bar e obtiveram diâmetros de corte menores que 0,5 μm . No entanto, segundo os autores este tipo de operação seria indicada para fracionar pequenas quantidades de partículas de tamanho inferior a micras. Lee (2014) verificou o potencial de operação de um hidrociclo de 335 mm de diâmetro operando a baixa pressão (1,38 – 5,56 kPa) para separar partículas orgânicas de água de recirculação de um processo e sugeriu uma condição ótima de operação.

2.3.2. Concentração e densidade de partículas

Por se tratar de uma condição operacional relevante na separação de sólidos, a influência da concentração de sólidos no desempenho de hidrociclos tem sido estudada tanto experimentalmente (ABDOLLAHZADEH *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2011), quanto numericamente (DAVAILLES *et al.*, 2012b; GHODRAT *et al.*, 2014a,

2014b; KUANG *et al.*, 2012) em diferentes faixas de concentração de sólidos, de até 30% em volume.

O aumento da concentração de sólidos proporciona o rápido decaimento da eficiência (GONÇALVES *et al.*, 2017; KUANG *et al.*, 2012), por esse motivo suspensões diluídas são preferíveis para se conseguir alta recuperação de sólidos (SVAROVSKY, 2000). Em sistemas diluídos, a circulação de partículas é livre, à medida que a concentração da suspensão aumenta, as partículas ficam mais próximas e interferem umas nas outras (ORTEGA-RIVAS e SVAROVSKY, 1998). De acordo com Massarani (2001), a velocidade terminal de uma partícula reduz substancialmente na presença de outras partículas, e a taxa de sedimentação declina constantemente (ORTEGA-RIVAS e SVAROVSKY, 1998).

Num sistema com alta concentração de sólidos, além das partículas terem sua velocidade de sedimentação alterada, elas sofrem os efeitos de viscosidade e densidade da suspensão (KAWATRA *et al.*, 1996a). À medida que a velocidade de sedimentação das partículas decai com o aumento da viscosidade da lama, partículas mais grossas atingem o *underflow* e o diâmetro de corte se torna maior (KAWATRA *et al.*, 1996b; TAVARES *et al.*, 2002).

A velocidade tangencial, principal responsável pela separação dentro do hidrociclone, é altamente afetada pelo percentual de sólidos alimentado. À medida que a concentração de sólidos cresce, o perfil de velocidades se torna linear ao longo da seção cilíndrica. Esta distribuição de velocidades reduz o movimento diferencial entre partículas que por consequência prejudica a separação (DAVAILLES *et al.*, 2012b). Todavia, mesmo que a qualidade do produto seja prejudicada pelo aumento do diâmetro de corte, em sistemas concentrados, maior é a razão de líquido e em termos de espessamento da suspensão, maior a concentração no *underflow* (DAVAILLES *et al.*, 2012b; GHODRAT *et al.*, 2014b).

Tanto as mudanças na geometria (GHODRAT *et al.*, 2014b), quanto nas dimensões acessórias, como *vortex finder* (GHODRAT *et al.*, 2014a) e diâmetro de *underflow* (DAVAILLES *et al.*, 2012b), são capazes de produzir um número distinto de regimes de operação dentro de um hidrociclone. Sólidos vão se acumulando na parte inferior do equipamento, e à medida que o percentual de sólidos cresce, um leito de partículas é formado. O volume útil disponível para separação reduz, ou seja, a geometria efetiva do equipamento se difere da geometria física propriamente dita (DAVAILLES *et al.*, 2012b). Por esta razão, Ghodrat *et al.* (2014b), ao estudar diferentes formas e tamanhos da seção cônica, pôde concluir que cones longos e convexos favorecem a classificação de partículas devido à redução no diâmetro de corte do equipamento.

Ainda em relação às características do material a ser processado, sabe-se que a eficiência de separação aumenta com o aumento da densidade dos sólidos, pois maior é a atuação da força centrífuga nestas partículas. No entanto, partículas leves e grossas tendem a escapar pelo *overflow*, quanto maior a concentração de sólidos da alimentação (GHODRAT *et al.*, 2016). Segundo Ji *et al.* (2017), em equipamentos menores, partículas ultrafinas pesadas escapam pelo *underflow*, enquanto nos equipamentos grandes, partículas grossas leves saem pelo *overflow*. Dessa forma, pode-se dizer que existe uma interação entre a densidade das partículas e o tamanho do equipamento que influencia o desempenho da hidrociclonagem.

2.3.3. Viscosidade/Reologia

De acordo com o estudo da reologia, fluidos newtonianos são aqueles em que a viscosidade é constante em condições de temperatura, pressão e/ou concentração constantes, independentemente da tensão que atua no sistema. Quando a viscosidade é variável com a tensão atuante no sistema, mesmo em condições físicas constantes, o fluido apresenta comportamento não-newtoniano e pode ser classificado em: i) pseudoplástico, em que a viscosidade diminui à medida que a tensão sobre ele aumenta; ii) dilatante, a viscosidade aumenta à medida que a tensão sobre ele aumenta; iii) Bingham, necessita do fornecimento de uma tensão superior à tensão inicial para que o fluido comece a escoar (BIRD *et al.*, 2004).

Em particular, nos hidrociclos, a mudança da viscosidade altera a velocidade de sedimentação das partículas e o perfil de velocidades do fluido, e consequentemente, a eficiência do equipamento (KAWATRA *et al.*, 1996b). A viscosidade de polpas de caráter altamente não-newtoniano é alterada de maneira significativa com a tensão de cisalhamento, que por sua vez varia com a geometria do hidrociclo e com a vazão alimentada (TAVARES *et al.*, 2002).

Já o comportamento reológico de suspensões é influenciado tanto pelo percentual de sólidos, quanto pela distribuição do tamanho de partículas, além da temperatura e uso de espessantes ou dispersantes (KAWATRA e EISELE, 1988). Devido à simplicidade de medição e alteração, o percentual de sólidos é o parâmetro mais fácil de se ajustar para controlar a reologia da suspensão. Sabe-se que quanto maior a concentração de sólidos maior é a viscosidade do meio (TAVARES *et al.*, 2002).

Quanto à granulometria, ao reduzir o tamanho de partículas, a superfície de ligação sólido-líquido é ampliada de modo que a concentração de sólidos efetiva aumenta e por consequência a viscosidade se eleva (KAWATRA e EISELE, 1988). Por este motivo, na indústria mineral, por exemplo, o desempenho dos circuitos de moagem e hidrociclonagem está

intimamente ligado à reologia da lama. Caso excessiva quantidade de finos volte a moagem, haverá redução na eficiência devido ao aumento da viscosidade ótima de operação. Dessa forma, o controle da distribuição do tamanho de partículas no *overflow* dos classificadores é de suma importância para o desempenho da moagem, além de evitar dificuldades nos subsequentes processos de separação (KAWATRA e EISELE, 1988).

A variação da temperatura também influencia o desempenho de hidrociclos. Incrementos na temperatura reduzem a viscosidade de suspensões em função da água presente. A redução da viscosidade aumenta a velocidade de sedimentação das partículas o que acelera sua segregação com menor efeito de arraste. Assim, quanto maior a temperatura do fluido nos hidrociclos, menor é o diâmetro de corte em consequência da redução da viscosidade (KAWATRA e EISELE, 1988).

O aumento da temperatura tanto influencia a força centrífuga quanto a velocidade de sedimentação de partículas, enquanto a redução da viscosidade por adição de reagentes tem forte controle sobre a força centrífuga. O uso de agentes químicos para controle reológico aumenta o percentual de sólidos presentes sem aumentar a tensão crítica de escoamento de fluidos pseudoplásticos (KAWATRA e EISELE, 1988). Dessa forma, deve-se levar em consideração a existência de uma diferença entre os mecanismos de redução da viscosidade através da adição de reagentes e o aumento da temperatura. Os reagentes alteram a maneira em que partículas minerais interagem com a água, atuando de maneira mínima na viscosidade da água. Por outro lado, a alteração da temperatura influencia sobremaneira a viscosidade da água, e é a viscosidade do líquido carreador que controla a viscosidade da suspensão em hidrociclos (BRADLEY, 1965).

As pioneiras investigações sobre o comportamento de hidrociclos operando com fluidos não-newtonianos foram de Lilge (1961), que utilizou como fluido pseudoplástico uma suspensão aquosa de magnetita, e posteriormente Upadrashta *et al.* (1987), que estudaram um polímero aquoso como fluido pseudoplástico e silicato de sódio aquoso como fluido dilatante. Ainda com algumas restrições, através da alteração do percentual de sólidos e a temperatura da suspensão nos experimentos, Kawatra *et al.* (1996a) propuseram um modelo para predição do diâmetro de corte em hidrociclos em função da viscosidade. De acordo com o modelo proposto, d_{50} é proporcional à viscosidade elevada à potência de 0,35.

Por sua vez, Tavares *et al.* (2002) desenvolveram um modelo matemático para predição do diâmetro de corte que levava em consideração os efeitos reológicos na classificação de hidrociclos. A fim de reproduzir diferentes condições reológicas de fluidos newtonianos e não-newtonianos os autores utilizaram soluções contendo 15, 25 e 35%, em massa, de rocha

fosfática ultrafina, com 40% das partículas de diâmetro menor que 1 μm , e para controlar a reologia, usaram agentes dispersantes ou espessantes nos testes experimentais.

Desde então vários estudos experimentais e numéricos têm sido desenvolvidos com hidrociclos operando com fluidos não newtonianos. Scheid *et al.* (2013) realizaram testes experimentais com fluido pseudoplástico com objetivo de associar, de forma analítica, a viscosidade aparente do fluido com o desempenho do equipamento. Todavia, concluíram que o processo de separação e a queda de pressão no hidrociclo não podem ser caracterizados por um único parâmetro associado à viscosidade aparente.

Ainda quanto à operação utilizando fluidos pseudoplásticos, Yang *et al.* (2015), através de técnicas de fluidodinâmica computacional, constataram que a velocidade tangencial diminui à medida que n , parâmetro do modelo de Power Law, decresce, ou seja, à medida que o fluido apresenta características mais distantes do caráter newtoniano. O aumento da viscosidade efetiva reduz a velocidade rotacional do fluido diminuindo a força que direciona as partículas para a parede do hidrociclo; por consequência, menor é a coleta de partículas no *underflow* (WU *et al.*, 2017). No estudo de Wu *et al.* (2017), a eficiência do hidrociclo subiu cerca de 40%, quando o valor de n passou de 0,4 (característico de fluido pseudoplástico) para n igual a 1,0 (fluido com caráter newtoniano).

Quanto à alteração da viscosidade em fluidos newtonianos, Marthinussen *et al.* (2014) investigaram de forma experimental e a partir de simulações em CFD o desempenho de hidrociclos operando com fluidos newtonianos altamente viscosos utilizando sacarose como agente viscosificante. A faixa de viscosidade estudada variou de cerca de 1 cP a 15 cP e o percentual de sólidos se manteve nos testes em aproximadamente 1,1% em volume. Um modelo analítico foi elaborado para descrever o efeito da viscosidade da suspensão na eficiência de hidrociclos. Quanto maior a viscosidade maior foi o diâmetro de corte obtido e menor o consumo energético do hidrociclo.

2.3.4. Configuração Geométrica

Frente à necessidade de aprimorar a operação de hidrociclonagem, estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de compreender os efeitos das variáveis geométricas no desempenho de hidrociclos (VIEIRA *et al.*, 2011), já que estas têm papel fundamental na definição da finalidade da operação de hidrociclonagem. Relações ótimas foram desenvolvidas para alcançar alta eficiência (MOGNON *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2012), baixo consumo energético (VIEIRA *et al.*, 2011) e/ou produzir correntes de *underflow* mais espessas (SILVA *et al.*, 2015a). Até mesmo técnicas mais robustas, como o uso do Algoritmo de Evolução

Diferencial associado às técnicas de superfície de resposta (SILVA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2015a), têm sido usadas para otimizar as variáveis geométricas dos hidrociclones.

Neste sentido, a influência das dimensões geométricas: diâmetro da alimentação (TANG *et al.*, 2017; VIEIRA *et al.*, 2016), diâmetro de *overflow* (CUI *et al.*, 2017; VIEIRA e BARROZO, 2014), diâmetro de *underflow* (GHODRAT *et al.*, 2013; KYRIAKIDIS *et al.*, 2018; NI *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2015b), assim como o comprimento das partes cilíndrica e cônica (SILVA *et al.*, 2015a), tem sido investigada para aprimorar a hidrociclonagem. Uma das formas de elevar a eficiência é utilizando equipamentos pequenos, com diâmetro da seção cilíndrica menor que 10 mm, por conta da alta velocidade tangencial alcançada (NEESSE *et al.*, 2015; ZHU e LIOW, 2014).

Tanto a forma, quanto a espessura, e, o comprimento do *vortex finder*, têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores (HWANG e CHOU, 2017; KYRIAKIDIS *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2015; VAKAMALLA *et al.*, 2017). Sabe-se que pequenas alterações em seu tamanho provocam grandes efeitos na recuperação de sólidos e na distribuição do tamanho de partículas no *overflow* e *underflow* (WANG e YU, 2008). Por este motivo, a determinação do comprimento ótimo deve ser feita experimentalmente pois depende da distribuição do tamanho das partículas na alimentação (MARTÍNEZ *et al.*, 2008) assim como da concentração de sólidos na alimentação (GHODRAT *et al.*, 2014a).

De acordo com Almeida (2008) existe um comprimento de *vortex finder* intermediário que favorece a migração de partículas do vórtice interno para o vórtice externo e que atenua o fenômeno de curto circuito. Ainda, Ghodrat *et al.* (2014a) em seu estudo verificou que o aumento do comprimento do *vortex finder* favorece a eficiência em sistemas concentrados, já nos sistemas diluídos apenas a coleta de grossos é beneficiada. Tem-se que quanto menor o *vortex finder* maior a possibilidade de formação de curto circuito e consequente perda de grossos pelo *overflow*. Nos sistemas diluídos o aumento do *vortex finder* diminui a região em que finos escapam para o vórtice interno. No entanto, nos sistemas concentrados este efeito é mais pronunciado pois, devido ao acúmulo de sólidos na parte cônica inferior, a região de separação de partículas é menor. Assim, quanto maior o comprimento do *vortex finder*, mais difícil é o deslocamento de partículas para o centro e posterior saída pelo *overflow*, e, neste caso, a coleta de grossos e finos no *underflow* aumenta e a eficiência total pode ser elevada.

Existem hidrociclones que se diferem estruturalmente da representação esquemática da Figura 2.1-2. A forma mais convencional dos hidrociclones apresenta um único cone, todavia existem equipamentos cuja parte cônica apresenta duas angulações e, neste caso, o perfil de velocidades do fluido é alterado. A depender da combinação dos cones a eficiência do

equipamento pode ser elevada (YANG *et al.*, 2010). A alteração da forma da parte cônica, se côncava ou convexa, também altera o desempenho da hidrocyclonagem. Segundo Ghodrat *et al.*, (2014a) cones longos e convexos aprimoram a separação de partículas por aumentar a área efetiva de separação de partículas. Da mesma forma, estudos foram conduzidos alterando a forma da parte cilíndrica e verificaram a alteração da circulação de partículas nessa região o que influencia a eficiência do hidrociclone (NOROOZI e HASHEMABADI, 2011).

Outro tipo de modificação nas partes cilíndrica e cônica de um hidrociclone é na estrutura do material de fabricação, podendo ser usualmente maciça ou porosa, como no caso dos chamados hidrociclos filtrantes (VIEIRA *et al.*, 2010). Nesta modalidade de equipamentos não convencionais, a parte cônica, a parte cilíndrica, ou ambas, podem ser de parede permeável, de modo que, uma pequena fração de líquido é descarregada através da superfície porosa modificando o perfil de velocidades do fluido e por consequência o desempenho do equipamento (SALVADOR *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2015b).

O tipo de alimentação mais comum de um hidrociclone trata-se de um duto cilíndrico, todavia em alguns equipamentos este duto inicia-se circular e torna-se retangular na entrada da seção cilíndrica (MOGNON *et al.*, 2015). Alimentações do tipo rampa ou tipo voluta (ZHEN-BO *et al.*, 2011), duto de alimentação formando diferentes ângulos com a parte cilíndrica do equipamento (FAN *et al.*, 2015), entrada tangencial-circular (ZHANG *et al.*, 2017), inserção de uma placa cônica na parte superior cilíndrica do equipamento para diminuição da circulação de partículas nessa região (HWANG *et al.*, 2012), assim como a inserção de duas ou mais entradas de fluido (HWANG *et al.*, 2013; NASCIMENTO *et al.*, 2013; NENU e YOSHIDA, 2009), são exemplos de modificações na estrutura convencional da alimentação de um hidrociclone existentes na literatura.

O uso de peças acessórias que alteram a configuração tradicional dos hidrociclos também estão em estudo. Uma delas é a inserção de uma espiral de metal no interior da parte cilíndrica do hidrociclone, com o intuito de melhorar seu desempenho (PATRA *et al.*, 2017). Em comparação com o equipamento convencional, Patra *et al.* (2018) observaram através de testes experimentais uma redução de aproximadamente 18% no consumo do equipamento e aumento na eficiência de cerca de 11% com a instalação da espiral.

O hidrociclone trifásico é uma modalidade que consegue separar a alimentação em três correntes de acordo com a necessidade da operação em questão (LIU *et al.*, 2015). Outro equipamento não convencional é o chamado hidrociclone com cone interno, que consiste em um cilindro com dois cones internos dotado de uma alimentação tangencial na parte central do equipamento, usado para separar misturas gás-líquido (XU *et al.*, 2016). Ainda, Zhou *et al.*,

(2016) investigaram alterações nas variáveis geométricas de um hidrociclone cilíndrico, equipamento desprovido de parte cônica utilizado nas etapas primárias de classificação de partículas no processamento mineral.

A associação de duas operações é uma forma de melhorar a separação sólido-líquido. Wang e Wu (2018) propuseram a inserção de uma membrana tubular no lugar do tubo de *vortex finder* de modo que o fluido ao passar por essa membrana fosse filtrado e apenas líquido saísse pelo *overflow*. Os autores conseguiram, com o novo equipamento, alcançar menor concentração de sólidos na corrente de *overflow* e sugeriram o uso desta técnica em situações em que o material é de alto valor agregado e precisa ser recuperado no *underflow*.

2.4. HISTÓRICO FEQUI/UFU

Ao longo dos anos, pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia têm se destacado no estudo e aprimoramento da técnica de hidrocyclonagem. Desde a inspiração e concepção do hidrociclone filtrante, equipamento não convencional constituído de parede permeável, inúmeras pesquisas foram realizadas. Estudos experimentais, técnicas de otimização e de fluidodinâmica computacional têm sido importantes ferramentas usadas para investigar os mecanismos de separação em hidrociclos, avaliar os efeitos de variáveis geométricas e operacionais, além de propor geometrias otimizadas.

Lanna *et al.* (1992), Vieira (1997) e Souza (1999) conduziram os primeiros estudos para avaliar o efeito da alteração da parede maciça dos equipamentos convencionais por uma permeável; meios filtrantes de nylon, polipropileno e bronze sinterizado foram usados, respectivamente, para alteração da permeabilidade da parede cônica filtrante de um hidrociclone de geometria Bradley. Os autores verificaram, em comparação com o equipamento convencional, que a capacidade de processamento e a concentração de sólidos no *underflow* foram majoradas e, mesmo com meios filtrantes distintos, tendências semelhantes foram encontradas, diferindo apenas na intensidade. Contudo, dentre os meios filtrantes estudados, o constituído de bronze sinterizado apresentou maior estabilidade às respostas do processo. Além da diferença entre os meios filtrantes, a diferença de permeabilidade também influencia as respostas relacionadas à hidrocyclonagem. Outra característica importante verificada no hidrociclone filtrante é a não formação de torta (SOUZA *et al.*, 2000).

Em seguida, outras geometrias tradicionais de hidrociclos cônicos-filtrantes foram estudadas, como a geometria Rietema (VIEIRA, 2001), Krebs (ARRUDA *et al.* 2002) e Demco

(ARRUDA *et al.* 2003). Para diferentes famílias estudadas, diferentes efeitos foram obtidos com a inserção do cone filtrante (VIEIRA *et al.*, 2005).

Após a constatação dos inúmeros benefícios que a filtração poderia trazer à hidrociclonagem, como aumento da eficiência e diminuição do consumo energético (a depender da geometria em uso), Vieira (2006) propôs 25 novas geometrias de hidrociclos filtrantes e convencionais para estudar a influência das variáveis geométricas: diâmetro da alimentação, diâmetro de *overflow*, ângulo do tronco de cone e comprimento total nos hidrociclos. Um dos equipamentos de parede cônica permeável, chamado pelo autor de HF11, se destacou por apresentar as maiores eficiências e os menores números de Euler. Por esta razão, outros pesquisadores continuaram a investigar esta geometria (ALMEIDA, 2008, FAÇANHA, 2012) e a estudar outras técnicas de otimização de hidrociclos.

Para avaliar o efeito da posição do meio filtrante nos hidrociclos de geometria HF11, Façanha (2012) propôs uma nova modalidade, cuja parte cilíndrica fosse de material permeável, chamado de hidrociclo cilíndrico-filtrante, e a comparou com o equipamento convencional e com o cônico-filtrante. Em seguida, Salvador (2013) estudou a geometria totalmente filtrante e observou que a capacidade de processamento deste era cerca de 40% maior que a do equipamento convencional de mesma dimensão.

Técnicas mais robustas de otimização foram implementadas por Silva (2012) para otimizar as variáveis geométricas: diâmetro da alimentação, diâmetro de *overflow*, ângulo do tronco de cone e comprimento total em equipamentos convencionais. Técnicas de superfície de resposta foram associadas ao Algoritmo de Evolução Diferencial. Este estudo deu origem a três equipamentos convencionais distintos: HCOT1, otimizado para elevar a eficiência total; HCOT2, cujo objetivo era a minimização da razão de líquido e, HCOT3, para alcançar mínimo número de Euler. Os equipamentos HCOT1 e HCOT3 apresentaram resultados promissores que impulsionaram Kyriakidis (2014) a estudar o efeito das variáveis acessórias, diâmetro de *underflow* e comprimento do *vortex finder*, nestes equipamentos.

Por sua vez, Silva (2014) implementou o Algoritmo de Evolução Diferencial para otimizar as variáveis geométricas: diâmetro da alimentação, diâmetro de *overflow*, ângulo do tronco de cone e comprimento total em hidrociclos cônico-filtrantes. Foram propostas as seguintes geometrias otimizadas: HFOT1, para elevar a eficiência total; HFOT2, para minimizar a razão de líquido; e HFOT3 para minimizar custos energéticos.

Ao comparar a geometria filtrante otimizada HFOT3 com o equipamento convencional otimizado HCOT3, ambos idealizados com o mesmo objetivo de redução de consumo, verificou-se que os dois equipamentos alcançaram alto poder de concentração da corrente de

underflow aliado ao baixo consumo de energia. Todavia o equipamento HFOT3 apresentou maiores níveis de eficiência. Por esse motivo, Gonçalves (2016) investigou o comportamento do equipamento HFOT3 sob diferentes condições operacionais de concentração de sólidos e diâmetro de *underflow* e verificou que nos sistemas mais concentrados a eficiência é prejudicada, mas o consumo energético é menor.

Ainda quanto à investigação sobre os equipamentos filtrantes, Salvador (2017) estudou as mesmas geometrias de Vieira (2006) em quatro configurações: 1) paredes totalmente maciças (HCON), 2) tronco de cone permeável (HCOF), 3) cilindro permeável (HCIF), 4) cilindro e parte cônica (HCICOF). Uma otimização foi realizada e foram propostas três geometrias otimizadas para cada modalidade de hidrociclone por meio da técnica de superfícies de respostas combinada ao uso do algoritmo de Evolução Diferencial. As geometrias de hidrociclos Cilíndrico-Filtrantes (HCIF) otimizadas por Salvador (2017) foram estudadas por Ascendino (2019) e o efeito da concentração de sólidos nos equipamentos foi quantificado.

Outros estudos foram desenvolvidos na FEQUI/UFU relacionados à otimização da separação de emulsões óleo-água (GOMES, 2002; NASCIMENTO *et al.*, 2013) na separação de microrganismos com alta eficiência (BICALHO, 2011). Também para otimização da operação de hidrocyclonagem no sistema de controle de sólidos em sondas de perfuração foram propostas as geometrias HOT por Mognon (2015) e a geometria MAX por Panisset (2014).

Em um dos estudos mais recentes, Kyriakidis (2018) fez um levantamento de um banco de dados a partir do histórico em hidrocyclonagem da FEQUI/UFU para encontrar relações ótimas. Foram concebidas três geometrias de hidrociclos, duas delas, chamadas de HGOT1 e HGOT3 foram superiores aos equipamentos comparados no banco de dados. A geometria HGOT1, otimizada com o objetivo de maximizar a eficiência de separação, alcançou Eficiência Total de até 91% ao trabalhar com suspensão de sólidos diluída. O equipamento HGOT3, otimizado para minimização do consumo energético, além de apresentar baixo número de Euler também elevou a concentração de sólidos inicialmente contendo 1,0%v. de sólidos para cerca de 14%.

Cabe ressaltar, que a maioria dos trabalhos mencionados anteriormente foram conduzidos com suspensões de caráter newtoniano o que fomentou a investigação do efeito da alteração da reologia do fluido e da concentração de sólidos na operação de hidrocyclonagem. Através da avaliação dos trabalhos anteriores, sabendo o potencial de separação e espessamento dos hidrociclos otimizados MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, propostos por pesquisadores da FEQUI/UFU, o presente estudo foi proposto a fim de explorar ainda mais estas geometrias otimizadas.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção está apresentada a unidade experimental construída, assim como os equipamentos que a compõem, incluindo os hidrociclos. Serão abordadas as principais características e métodos de caracterização do material particulado e viscosificante usados para formulação dos fluidos de trabalho nos testes de hidrociclonagem, além do planejamento experimental proposto. Nota-se que o objetivo de reproduzir condições próximas às condições operacionais de campo em um sistema de limpeza de fluidos de perfuração direcionou a determinação do percentual de sólidos, tamanho de partículas e grau de pseudoplasticidade do fluido de trabalho.

3.1. UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental está localizada no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da FEQUI/UFU e conta com os seguintes itens, numerados de acordo com a Figura 3.1-1: 1) reservatório; 2) agitador mecânico; 3) serpentina de refrigeração; 4) bomba centrífuga; 5) manômetro digital e 6) hidrociclo. Tanto a estrutura da unidade experimental quanto as tubulações foram manufaturadas em aço inoxidável.

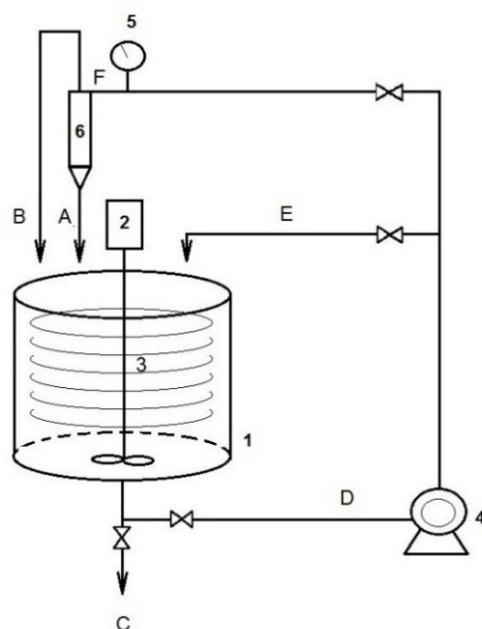


Figura 3.1-1 – Representação esquemática da unidade experimental.

De acordo com a representação esquemática da Figura 3.1-1, o fluido devidamente homogeneizado no reservatório segue para a linha de sucção da bomba (D), passa pela bomba e então para a corrente de *by-pass* (E) ou para a linha de alimentação do hidrociclone (F). Após passar pelo processo de hidrociclonagem, as duas correntes de produto, *underflow* (A) e *overflow* (B) retornam ao reservatório em um sistema fechado. A linha de descarga do tanque (C) era usada nos casos de esgotamento para troca do fluido de trabalho. Válvulas tipo globo instaladas nas linhas “E” e “F” eram acionadas para regulagem da vazão de alimentação e de *by-pass*. A seguir, as principais especificações dos componentes da unidade experimental.

3.1.1. Reservatório

Para armazenar a suspensão de trabalho, um tanque de polietileno com volume nominal de 250 L era utilizado com cerca de 60% de sua capacidade útil. Para proporcionar a homogeneização adequada da mistura e evitar a formação de zonas mortas, o reservatório era dotado de chicanas, além de um agitador mecânico com motor de 1,5 cv, operando a 1750 rpm, em média, conectado a um inversor de frequência. Por se tratar de um circuito fechado em recirculação constante, a temperatura do fluido poderia se elevar ao longo do experimento e alterar a viscosidade da suspensão. Dessa forma, para manter a temperatura da suspensão constante, uma serpentina de cobre com fluido de refrigeração foi instalada em forma de espiral na parte central do tanque (Figura 3.1-2).



Figura 3.1-2 – Reservatório para suspensão dotado de chicanas, agitador e sistema de refrigeração (Foto do autor).

3.1.2. Bomba Centrífuga

Para promover o bombeamento da suspensão do tanque para o hidrociclone, a unidade experimental conta com uma bomba centrífuga de 7,5 cv da *Weir Minerals®* (modelo 1,5/1B-AH) (Figura 3.1-3), conectada a um inversor de frequência e, para suportar a abrasividade da suspensão, a mesma possui revestimento especial.



Figura 3.1-3 – Bomba centrífuga conectada a um inversor de frequência (Foto do autor).

3.1.3. Manômetro Digital

Para aferir a queda de pressão na entrada do hidrociclone foi instalado à montante do duto de alimentação um manômetro de Bourdon Digital da marca *Dwyer®* (Modelo DPG-204), cuja faixa operacional compreende de 0 a 50 psi (Figura 3.1-4).



Figura 3.1-4 – Manômetro digital instalado à montante da alimentação (Foto do autor).

3.2. HIDROCICLONES

Quatro equipamentos, cujas dimensões características (duto de alimentação, diâmetro de *overflow*, comprimento da parte cilíndrica e ângulo de tronco de cone) já haviam sido otimizadas por pesquisadores da FEQUI/UFU, foram alvo de investigações no presente trabalho. Um destes hidrociclones, o equipamento HOT otimizado por Mognon (2015), apresenta uma peculiaridade em sua entrada, o duto de alimentação que convencionalmente é circular, torna-se retangular nesta configuração conforme a representação esquemática da Figura 3.2-1. Esta é uma característica comum em hidrociclones comerciais, como nos hidrociclones da *Derrick®* e da *National Oilwell Varco®*. Este tipo de alteração é mais difícil de ser fabricada, porém pode favorecer a capacidade de processamento ao diminuir a perda de carga do equipamento (PANISSET, 2014).

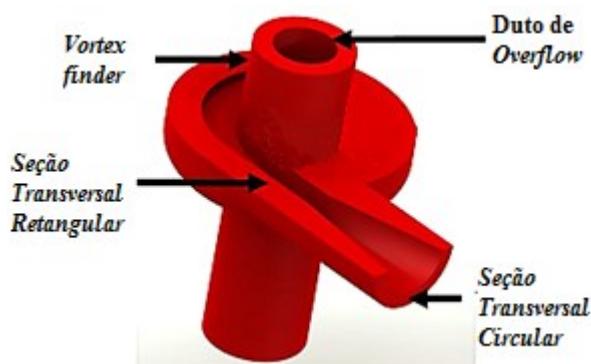


Figura 3.2-1 – Representação esquemática da transição de forma do duto de alimentação de circular para retangular. Adaptado de Panisset (2014).

As dimensões geométricas dos equipamentos HOT, MAX, HGOT1 e HGOT3 estão apresentadas na Tabela 2.1-1. Para o equipamento HOT, na linha “Diâmetro da alimentação”, estão exibidas as medidas que correspondem à altura/largura da parte retangular da alimentação.

Tabela 3.2-1 – Dimensões geométricas dos equipamentos HOT, MAX, HGOT1 e HGOT3.

Dimensão geométrica	HOT	MAX	HGOT1	HGOT3
Diâmetro da parte cilíndrica (D_C) [mm]	30,0	30,0	30,0	30,0
Diâmetro da alimentação (D_i) [mm]	9,1/4,6	7,8	8,7	6,3
Diâmetro de <i>overflow</i> (D_o) [mm]	10,5	10,5	4,8	10,5
Comprimento da seção cilíndrica (h) [mm]	32,0	76,0	69,0	114,0
Ângulo do tronco de cone (θ) [°]	6,0	14,5	9,0	12,5

Conforme a representação esquemática da Figura 3.2-2, os hidrociclones MAX e HOT tiveram suas partes: A) duto de *overflow*, B) *vortex finder*, C) corpo cilíndrico de alimentação, D) prolongamento da parte cilíndrica, E) parte cônica, e, F) duto de *underflow*, construídos de forma modular para serem encaixados através de travas e roscas.

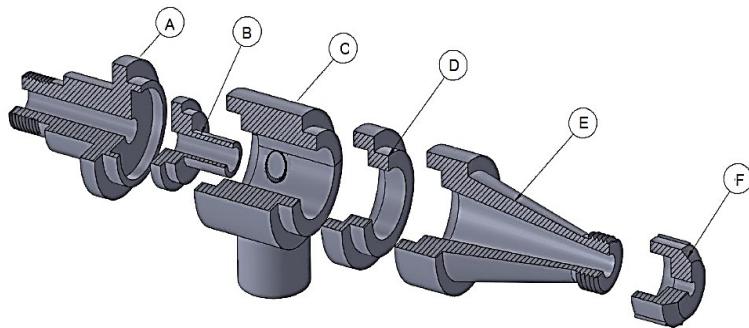


Figura 3.2-2 – Representação esquemática das partes modulares dos hidrociclones HOT e MAX: A) duto de *overflow*, B) *vortex finder*, C) corpo cilíndrico de alimentação, D) prolongamento da parte cilíndrica, E) parte cônica, F) duto de *underflow*.

Adaptado de Mognon (2015)

O material escolhido para usinagem das partes foi o poliacetal. Uma vantagem da confecção de hidrociclones com este material é a facilidade de acoplamento das partes e uso imediato após montagem, já que não há necessidade do uso de silicone para sua completa conexão. Apenas as travas são suficientes para vedação. A Figura 3.2-3 mostra os equipamentos HOT (a) e MAX (b) devidamente montados de acordo com as dimensões da Tabela 2.1-1.

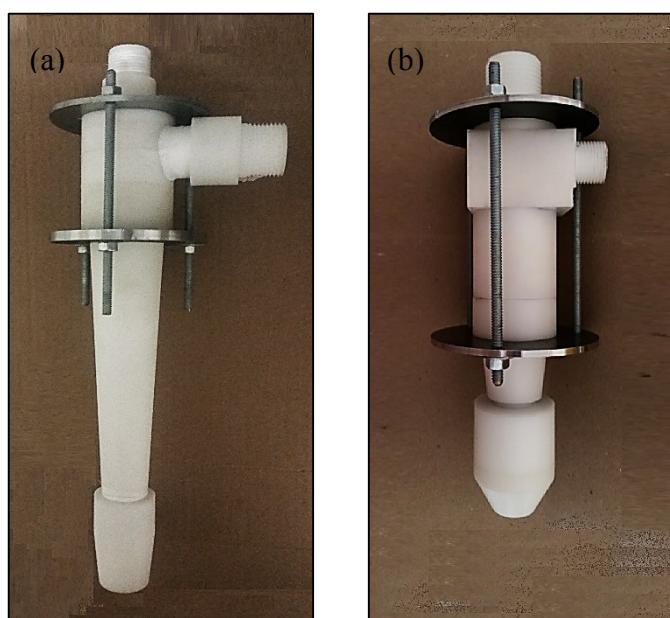


Figura 3.2-3 – Imagem dos hidrociclones montados (a) HOT e (b) MAX. (Foto do autor).

Quanto aos equipamentos HGOT1 e HGOT3, também de estrutura modular, já haviam tido suas partes confeccionadas anteriormente. Nestes hidrociclos o corpo cilíndrico junto ao duto de alimentação foi manufaturado de aço inoxidável, e o tronco de cone de latão. Neste caso, além das travas também era necessário usar silicone para completa vedação dos equipamentos, instituindo assim um tempo de cura para secagem do adesivo de aproximadamente 24 h. A Figura 3.2-4 exibe os equipamentos HGOT1 (a) e HGOT3 (b) devidamente montados com auxílio de travas.



Figura 3.2-4 – Imagem dos hidrociclos montados (a) HGOT1 e (b) HGOT3.

Adaptado de Kyriakidis (2018).

3.3. MATERIAL PARTICULADO

A escolha de um material particulado para pesquisa na área de hidrociclonagem requer a apreciação de algumas peculiaridades como a estabilidade no tamanho de suas partículas, devido às condições drásticas de operação do hidrociclo, além de distribuições granulométricas regulares e de fácil determinação experimental (VIEIRA, 2006). Por se tratar de um importante produto regional e com características de interesse, a rocha fosfática tem sido historicamente usada como material particulado em trabalhos de hidrociclonagem na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (VIEIRA, 2001; SILVA 2012; SALVADOR, 2013).

Não obstante, no presente trabalho uma amostra de concentrado de rocha fosfática, cordialmente cedida pela Vale Fertilizantes sediada em Tapira-MG, foi preparada para uso nos

testes experimentais. A densidade da rocha fosfática disponível foi determinada através de técnicas de picnometria a gás hélio, com auxílio do densímetro *AccuPyc1330* da *Micromeritics®*, cuja densidade real encontrada foi de $3147,8 \pm 0,5 \text{ kg/m}^3$.

O material *in natura* apresentava faixa de distribuição de tamanho de partículas superior ao cascalho contido na entrada dos hidrociclones das sondas de perfuração amostradas por Pereira (2010). Dessa forma, para avaliar melhor o desempenho dos hidrocyclones otimizados para uso em um sistema de controle de sólidos em fluidos de perfuração, a rocha fosfática foi previamente cominuída em um moinho de bolas da FEQUI/UFU. O moinho trata-se de um vaso cerâmico de 20 cm de diâmetro interno e 30 cm de altura, com 75 bolas de cerâmica, cada uma com cerca de 4 cm de diâmetro, submetido a uma rotação de 23 rpm. Foram realizadas moagens em batelada com aproximadamente 3 kg de material por cerca de 5,5 h, até que a quantidade suficiente para execução dos testes fosse obtida (cerca de 200 kg).

Após a moagem, o material foi devidamente quarteado, homogeneizado e amostrado para análise de granulometria no equipamento *Mastersizer Microplus* da *Malvern*. Com base em técnicas de difração a *laser*, este equipamento é capaz de determinar a fração volumétrica de partículas que possuem tamanho em determinada faixa, e então estas informações podem ser ajustadas a um modelo de distribuição granulométrica. Com auxílio do software *Statistica®*, o modelo que melhor representou a distribuição acumulada de partículas foi o RRB (*Rosin-Rammler-Bennet*), cujo ajuste aos dados experimentais está apresentado na Figura 3.3-1.

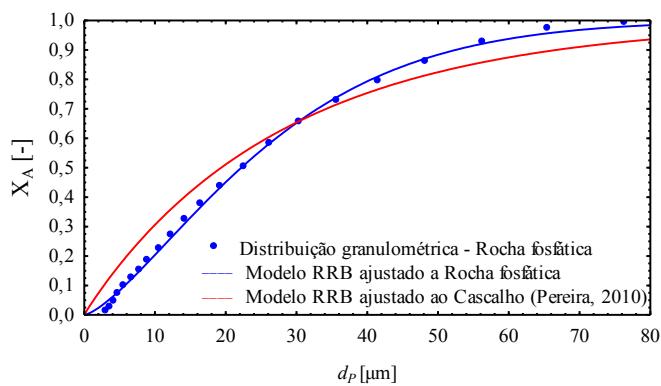


Figura 3.3-1 – Distribuição granulométrica da rocha fosfática moída.

A Figura 3.3-1 também apresenta a distribuição granulométrica do cascalho amostrado por Pereira (2010). Como um dos objetivos era de reproduzir condições próximas as condições operacionais vigentes em um sistema de limpeza de fluidos de perfuração, pode-se observar que a distribuição granulométrica da rocha fosfática usada nos testes esteve bem próxima a do

cascalho. Os parâmetros ajustados ao modelo RRB da distribuição granulométrica acumulada da rocha fosfática, $d_{63,2}$ e N , foram de 28,98 μm e 1,40, respectivamente, com R^2 de 0,99 (Equação 3.3-1).

$$X_A = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{28,98} \right)^{1,40} \right] \quad (3.3-1)$$

3.4. VISCOSIFICANTE

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e até mesmo gases. São classificados em fluidos de base aquosa e de base não aquosa (base óleo ou sintéticos). Apresentam caráter não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico (PEREIRA, 2010). Com o objetivo de simular uma suspensão com características reológicas próximas à dos fluidos processados em uma operação em campo da indústria petroquímica, foi proposta a adição de um viscosificante para tornar a suspensão aquosa newtoniana em pseudoplástica.

Portanto, foi selecionado como agente viscosificante a carboximetilcelulose (CMC), um polímero aniónico derivado da celulose solúvel em água. Este material é usado em diversas aplicações na indústria como espessante, estabilizante, viscosificante, redutor de filtrado, agente de volume, estabilizador de espuma entre outras. É comercializado na forma de sal de sódio, um pó de coloração entre branca e bege, com caráter higroscópico (MOREIRA, 2014).

A Carboximetilcelulose Sal Sódico P.A. usado nos experimentos e testes preliminares foi adquirida de um mesmo lote de produção da empresa Dinâmica Química Contemporânea LTDA®. Este cuidado deve-se às diferenças que este polímero pode apresentar de um lote de fabricação para outro, ou de um fabricante para outro, em função das peculiaridades da reação de polimerização.

3.4.1. Testes preliminares de Reologia

Para definir a quantidade de viscosificante a ser utilizada na formulação das suspensões de trabalho com caráter pseudoplástico, testes preliminares para avaliação do comportamento reológico de soluções com diferentes concentrações de CMC em água foram realizados. Variou-se a concentração de CMC de 0,1 a 1,0% em massa e observou-se o comportamento reológico dessas soluções.

Para realização destes ensaios foi utilizado o reômetro coaxial de *Brookfield* modelo *R/S Plus*, com *spindle* coaxial de 40 mm (CC-40) e banho termostático ligado a uma jaqueta de aquecimento para manter a temperatura do material constante. É possível coletar dados de tensão cisalhante, viscosidade aparente, temperatura e tixotropia para uma dada faixa de taxa de deformação, obtidos instantaneamente com o uso do software *Rheo3000* (PEREIRA, 2010).

Em virtude das características de operação da unidade experimental, como a recirculação do fluido, a temperatura da suspensão durante os experimentos de hidrociclonagem é superior à temperatura ambiente, mesmo com o uso da serpentina de refrigeração. Dessa forma, foi escolhida a temperatura de 30°C para realização dos testes reológicos por se tratar de uma temperatura próxima à média observada nos testes experimentais.

De acordo com Pereira (2010), para assegurar que as estruturas géis dos fluidos de perfuração sejam quebradas e, consequentemente, inibição da histerese típica de curvas de fluxo de fluidos tixotrópicos, um cisalhamento prévio deve ser realizado antes da obtenção dos dados de tensão cisalhante para uma dada faixa de taxa de deformação. Dessa forma, as amostras testadas no presente estudo foram submetidas a um pré-cisalhamento, durante 60 s à taxa de 1021s^{-1} (mesma taxa de cisalhamento e tempo de ensaio utilizados por Pereira (2010) na análise dos fluidos de perfuração). Após o pré-cisalhamento, as amostras foram submetidas à taxa de cisalhamento de 0 a 2100s^{-1} com ciclo crescente de 5 min. A Figura 3.4-1 apresenta o Reograma obtido, enquanto a Figura 3.4-2 apresenta a Curva de viscosidade obtida para os ensaios de reologia das soluções aquosas contendo de 0,1 a 1,0% em massa de CMC.

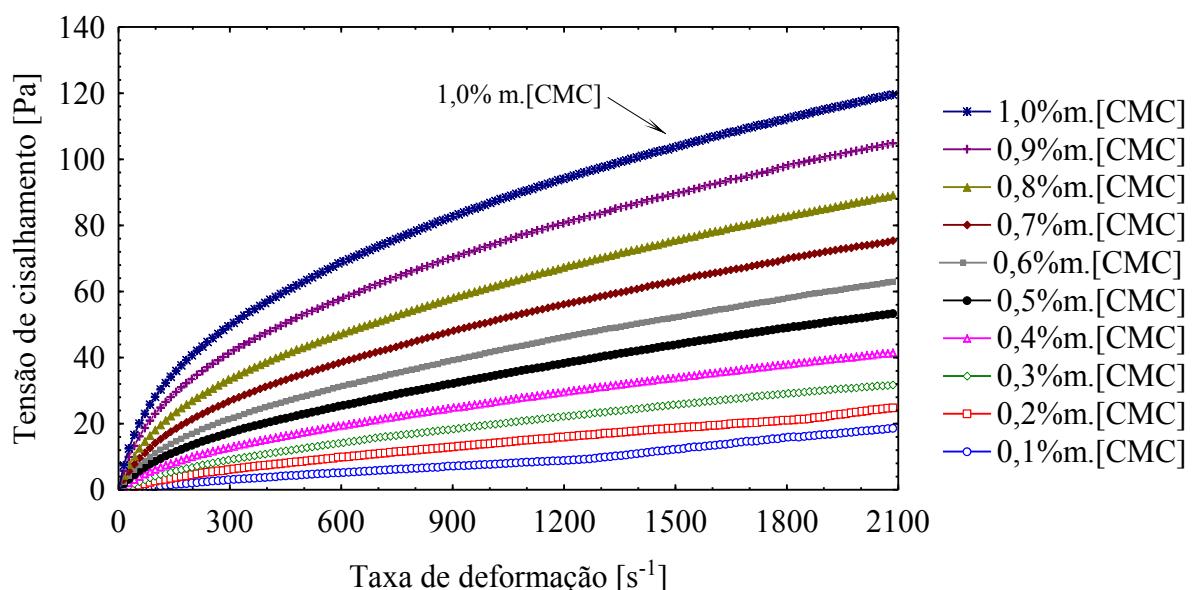


Figura 3.4-1 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação das soluções aquosas de carboximetilcelulose (CMC) de 0,1% a 1,0% em massa.

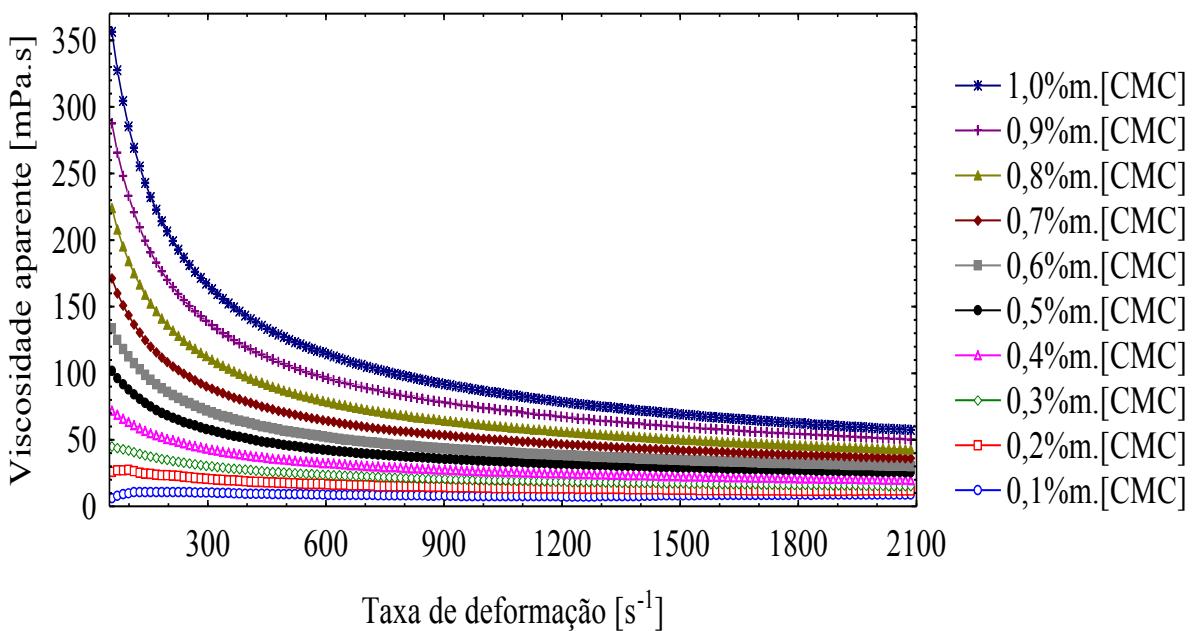


Figura 3.4-2 – Viscosidade aparente em função da taxa de deformação das soluções aquosas de carboximetilcelulose (CMC) de 0,1% a 1,0% em massa.

A partir das informações contidas na Figura 3.4-1 é possível certificar que a tensão de cisalhamento (τ) não possui comportamento linear em relação à taxa de deformação, ou seja, as soluções testadas possuem caráter não newtoniano. A viscosidade aparente (μ) das amostras, como observado na Figura 3.4-2, diminuiu com o aumento da taxa de deformação, característica típica de fluidos pseudoplásticos, atingindo um valor praticamente constante a 2100 s^{-1} .

Existem modelos matemáticos que descrevem o comportamento reológico de fluidos não newtonianos, como os modelos de Bingham, Power Law, Herschel-Bulkley e Robertson-Stiff (CHHABRA, 2007). Com o auxílio do software *Statistica®* os dados obtidos de tensão cisalhante (τ) em função da taxa de deformação (γ) foram ajustados ao Modelo de Power-Law (Equação 3.4-1). Os parâmetros índice de consistência (K) e índice de comportamento (n) ajustados ao modelo estão apresentados na Tabela 3.4-1, assim como o coeficiente de correlação quadrático (R^2) e a viscosidade aparente à taxa de deformação de 2100 s^{-1} .

$$\tau = K\gamma^n \quad (3.4-1)$$

Observa-se que acima de 0,2% em massa de CMC todos fluidos exibiram n menor que “um” o que implica na diminuição da tensão cisalhante com o aumento da taxa de deformação. Como esperado, à medida que a concentração de CMC aumenta, o parâmetro n diminui, ou

seja, mais pseudoplástico o fluido se torna. À medida que o parâmetro K aumenta mais consistente o fluido se torna e maior a viscosidade aparente. Portanto, as amostras com concentração acima de 0,2% em massa de CMC podem ser classificadas como fluidos de caráter pseudoplástico. Ainda, com base nas informações a respeito da reologia dos fluidos na entrada dos hidrociclos dessiltadores do sistema de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás analisado por Pereira (2010) optou-se por utilizar nos testes do presente trabalho concentrações de CMC de 0,2% até 1,0% em massa.

Tabela 3.4-1 – Parâmetros ajustados ao modelo de *Power-Law* das amostras de solução aquosa de CMC contendo 0,1 a 1,0% em massa.

CMC [%m.]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	R^2	μ a 2100 s ⁻¹ [mPa.s]
0,1	0,005 ± 0,001	1,077 ± 0,015	0,987	8,90
0,2	0,101 ± 0,003	0,715 ± 0,004	0,998	11,90
0,3	0,219 ± 0,002	0,652 ± 0,001	0,999	15,20
0,4	0,397 ± 0,003	0,609 ± 0,001	0,999	19,90
0,5	0,575 ± 0,005	0,593 ± 0,001	0,999	25,50
0,6	0,863 ± 0,006	0,561 ± 0,001	0,999	30,10
0,7	1,232 ± 0,009	0,539 ± 0,001	0,999	36,00
0,8	1,797 ± 0,014	0,511 ± 0,001	0,999	42,60
0,9	2,609 ± 0,023	0,484 ± 0,001	0,999	50,10
1,0	3,658 ± 0,041	0,458 ± 0,002	0,999	57,20

3.5. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Para analisar o desempenho dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, foi proposto um Planejamento Composto Central (PCC) para cada equipamento com cinco variáveis, a saber: concentração de sólidos (C_{VA}), concentração de CMC (C_{CMC}), diâmetro de *underflow* (D_U), comprimento de *vortex finder* (ℓ) e queda de pressão ($-\Delta P$), totalizando 26 experimentos e uma réplica no ponto central. De acordo com a ortogonalidade igual a dois, as variáveis foram estudadas em cinco níveis igualmente espaçados: C_{VA} de 1,0 a 10,0%v., C_{CMC} de 0,2 a 1,0%m., D_U de 3 a 7 mm, $-\Delta P$ de 25 a 45 psi, e ℓ de acordo com cada equipamento de forma que o comprimento correspondente ao nível mais alto (+2) não adentrasse a parte cônica do hidrociclo. As equações de codificação das variáveis para concentração de sólidos (X_1), concentração de viscosificante (X_2), diâmetro de *underflow* (X_3) e queda de pressão (X_5) valem para todos equipamentos e estão apresentadas nas Equações 3.5.1 a 3.5.4.

$$X1 = \frac{C_{VA}[\%v.] - 5,5}{2,25} \quad (3.5-1)$$

$$X2 = \frac{C_{CMC}[\%m.] - 0,6}{0,2} \quad (3.5-2)$$

$$X3 = \frac{D_U[mm] - 5}{1} \quad (3.5-3)$$

$$X5 = \frac{-\Delta P [psi] - 35}{5} \quad (3.5-4)$$

Os orifícios de *underflow* rosqueáveis dos hidrociclones MAX e HOT, manufaturados de poliacetal assim como todo o corpo do hidrociclone, estão mostrados na Figura 3.5-1 e na Figura 3.5-2, respectivamente. Os hidrociclones HGOT1 e HGOT3, por apresentarem a mesma estrutura da base intercambiável, utilizaram os mesmos acessórios de *teflon* para o orifício de *underflow* apresentados na Figura 3.5-3.

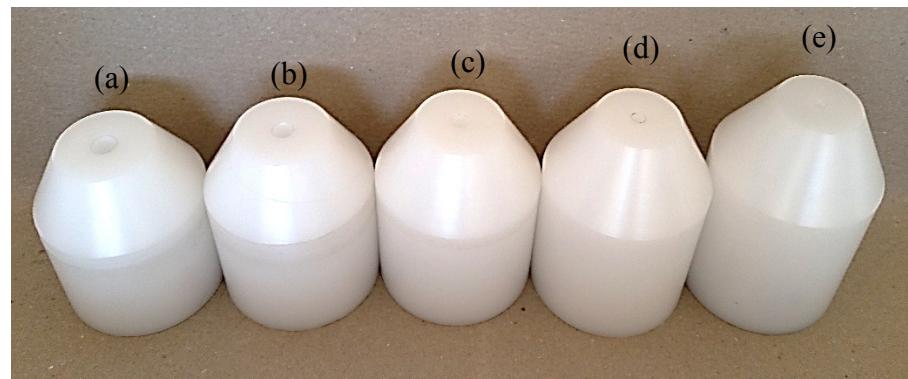


Figura 3.5-1 – Orifícios de *underflow* (D_U) do hidrociclone MAX: (a) 7 mm, (b) 6 mm, (c) 5 mm, (d) 4 mm, (e) 3 mm.

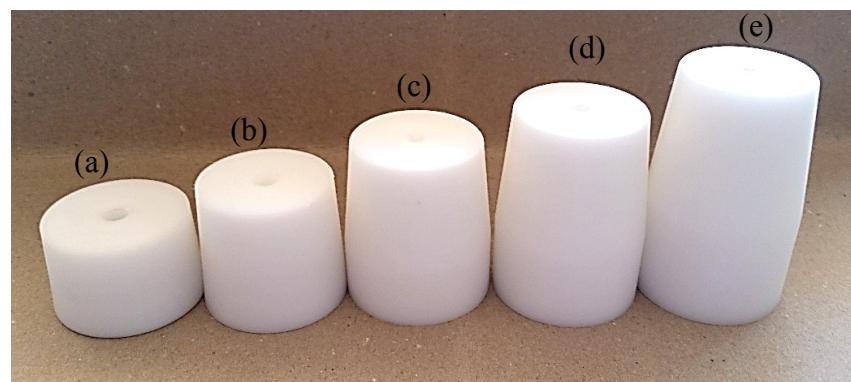


Figura 3.5-2 – Orifícios de *underflow* (D_U) do hidrociclone HOT: (a) 7 mm, (b) 6 mm, (c) 5 mm, (d) 4 mm, (e) 3 mm.

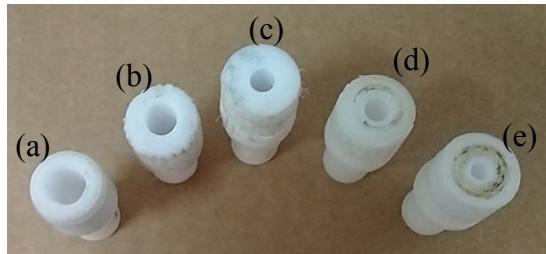


Figura 3.5-3 – Dutos de *underflow* (D_U) dos hidrociclones HGOT1 e HGOT3: (a) 7 mm, (b) 6 mm, (c) 5 mm, (d) 4 mm, (e) 3 mm.

As equações de codificação para a variável comprimento de *vortex finder* ($X4$) para os hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 estão representadas pelas Equações 3.5-5 a 3.5-8, respectivamente.

$$X4_{MAX} = \frac{\ell_{MAX}[mm] - 44}{16} \quad (3.5-5)$$

$$X4_{HOT} = \frac{\ell_{HOT}[mm] - 22}{5} \quad (3.5-6)$$

$$X4_{HGOT1} = \frac{\ell_{HGOT1}[mm] - 41}{14,5} \quad (3.5-7)$$

$$X4_{HGOT3} = \frac{\ell_{HGOT3}[mm] - 68}{23} \quad (3.5-8)$$

A Figura 3.5-4 ilustra os dutos de *overflow* do equipamento MAX e na Figura 3.5-5 estão mostrados os do equipamento HOT. Estas peças também foram confeccionadas de poliacetal de modo a encaixar facilmente na parte da alimentação do hidrociclone a que pertence, conforme a montagem ilustrada anteriormente na Figura 3.2-2.

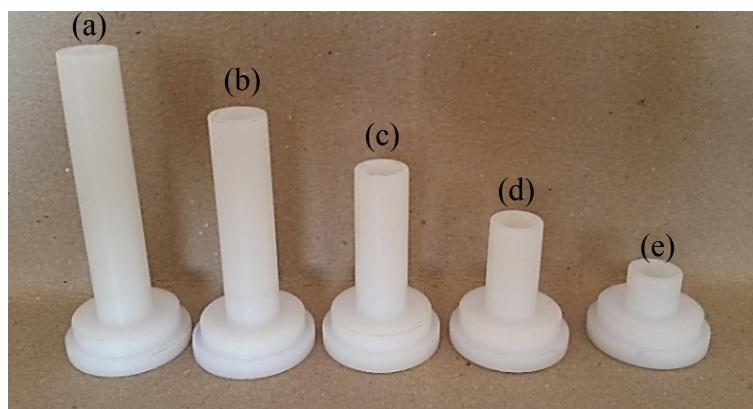


Figura 3.5-4 – Tubos de *vortex finder* (ℓ) do hidrociclone MAX: (a) 76 mm, (b) 60 mm, (c) 44 mm, (d) 28 mm, (e) 12 mm.

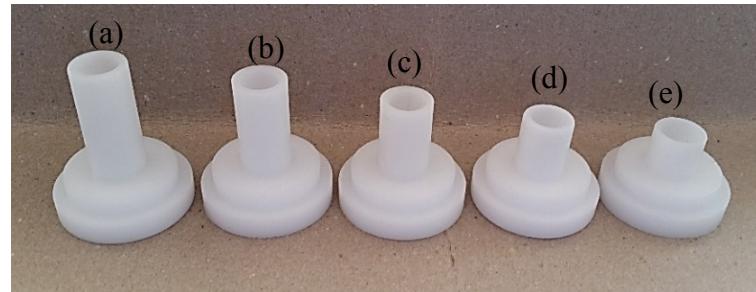


Figura 3.5-5 – Tubos de *vortex finder* (ℓ) do hidrociclone HOT: (a) 32 mm, (b) 27 mm, (c) 22 mm, (d) 17 mm, (e) 12 mm.

A Figura 3.5-6 e a Figura 3.5-7 mostram, respectivamente, os tubos de *vortex finder* dos equipamentos HGOT1 e HGOT3 manufaturados de latão/alumínio, rosqueáveis no respectivo cilindro de alimentação.

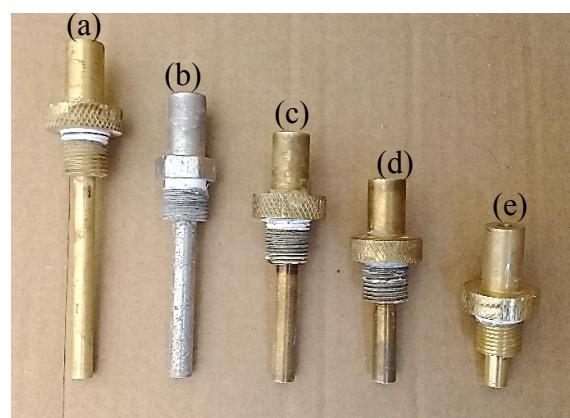


Figura 3.5-6 – Tubos de *vortex finder* (ℓ) do hidrociclone HGOT1: (a) 69 mm, (b) 55 mm, (c) 41 mm, (d) 26 mm, (e) 12 mm.



Figura 3.5-7 – Tubos de *vortex finder* (ℓ) do hidrociclone HGOT3: (a) 114 mm, (b) 91 mm, (c) 68 mm, (d) 45 mm, (e) 22 mm.

É possível avaliar os efeitos das variáveis concentração de sólidos (C_{VA}), concentração de viscosificante (C_{CMC}), diâmetro de *underflow* (D_U), comprimento de *vortex finder* (ℓ) e queda de pressão ($-\Delta P$) sobre cada um dos equipamentos avaliados através da combinação destes fatores. Tem-se na Tabela 2.1-1 a matriz de planejamento experimental codificada proposta para execução dos testes. Dessa forma, as variáveis codificadas $X1$, $X2$, $X3$, $X4$ e $X5$ foram devidamente combinadas em seus cinco níveis (-2), (-1), (0), (+1) e (+2), totalizando 27 experimentos.

Tabela 3.5-1 – Matriz de planejamento experimental dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3

Experimento	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$
1	-1	-1	-1	-1	+1
2	-1	-1	-1	+1	-1
3	-1	-1	+1	-1	-1
4	-1	-1	+1	+1	+1
5	-1	+1	-1	-1	-1
6	-1	+1	-1	+1	+1
7	-1	+1	+1	-1	+1
8	-1	+1	+1	+1	-1
9	+1	-1	-1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1
11	+1	-1	+1	-1	+1
12	+1	-1	+1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1	+1
14	+1	+1	-1	+1	-1
15	+1	+1	+1	-1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1
17	-2	0	0	0	0
18	+2	0	0	0	0
19	0	-2	0	0	0
20	0	+2	0	0	0
21	0	0	-2	0	0
22	0	0	+2	0	0
23	0	0	0	-2	0
24	0	0	0	+2	0
25	0	0	0	0	-2
26	0	0	0	0	+2
27	0	0	0	0	0

Ainda, em virtude da facilidade de executar novos testes apenas alterando a vazão de alimentação, ou seja, mantendo mesma configuração geométrica (mesmo D_U e ℓ) e caráter da

suspensão alimentada (mesmo C_{VA} e C_{CMC}) em diferentes $-\Delta P$, foram realizados testes adicionais ao planejamento proposto. Além disso, uma maior exatidão nas estimativas das equações de regressão pode ser obtida com um maior número de pontos experimentais apenas variando a queda de pressão na entrada do hidrociclone.

Sendo assim, em todos os 27 experimentos propostos foram realizados testes nos níveis (-1), (0) e (+1) da variável X_5 (queda de pressão). Por exemplo, para a “linha 1” da matriz de planejamento ilustrada na Tabela 3.5-1 além da combinação (-1), (-1), (-1), (-1), (+1) para as respectivas variáveis X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 , também foram realizados testes com a combinação (-1), (-1), (-1), (0) e com a combinação (-1), (-1), (-1), (-1), (-1), correspondente as variáveis X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 , respectivamente.

Ainda, há de se considerar que para o experimento da “linha 25” e “linha 26” da Tabela 3.5-1, foram feitas quatro combinações diferentes. Assim, em cada uma das linhas “25”, “26” e “27” uma combinação de todas variáveis no nível central foi realizada, totalizando 3 réplicas no ponto central. Portanto, foram executados 83 testes para cada hidrociclone.

3.6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A ordem de execução dos testes foi determinada de acordo com o fluido de trabalho preparado, alterando as outras variáveis D_U , ℓ e $-\Delta P$ conforme a matriz de planejamento. Assim, selecionado um primeiro bloco de experimentos num determinado nível de concentração de CMC e de sólidos, o bloco de testes subsequente seria o que mantivesse o nível de viscosificante e acrescentasse apenas sólidos no tanque. Por exemplo, para os experimentos 1, 2, 3 e 4 a suspensão de trabalho foi preparada contendo 3,25%v. de sólidos e 0,4%m. de CMC. Após a realização deste conjunto de testes a quantidade de sólidos necessária, previamente calculada, foi acrescentada ao reservatório para realização dos testes 9, 10, 11 e 12, mantendo, a concentração de CMC no mesmo nível. Antes da execução dos testes do segundo bloco, a concentração de sólidos do tanque era aferida através de técnicas de gravimetria para garantir o nível determinado. Dessa forma, alcançou-se um melhor aproveitamento do material particulado, considerando seu oneroso preparo para alcançar as características de interesse.

Para o preparo das suspensões de trabalho, primeiramente água era adicionada ao tanque, volume de aproximadamente 150 L, e então a quantidade previamente calculada de viscosificante era adicionada lentamente ao tanque sob agitação constante. Após a solubilização do polímero o agitador era desligado e aguardado o tempo de hidratação do polímero por 24 h

de acordo com a literatura (MOREIRA, 2014). Após o tempo de hidratação, o sólido era adicionado ao tanque, devidamente agitado e, após a homogeneização da suspensão, uma amostra era coletada para aferição da concentração de sólidos e outra amostra para análise da reologia da suspensão. Os testes foram realizados com uma variação de $\pm 0,5\%$ v. na concentração de sólidos.

Ainda, para manter a suspensão de trabalho em condições adequadas, impedindo a proliferação de microrganismos e a alteração da reologia do fluido, foi adicionado formaldeído (37%) como agente bactericida. O volume de formaldeído utilizado era numericamente igual à quantidade em gramas de carboximetilcelulose adicionada. Esta proporção seguiu a relação proposta por Pereira (2006) ao preparar soluções de goma xantana e adotada também por Moreira (2014) na formulação de soluções de carboximetilcelulose. Dessa forma, foi possível trabalhar por até dois meses com a mesma suspensão com uma insignificante alteração na reologia.

Para realização do teste, primeiramente, os inversores de frequência da bomba e do agitador eram ligados, bem como o manômetro digital. A suspensão então era homogeneizada com o auxílio do agitador mecânico, e, devido ao acúmulo de sólidos no fundo do reservatório, esta etapa durava cerca de 30 min. Antes do acionamento da bomba, era verificado se a mesma se encontrava afogada por meio da abertura da válvula de saída de material do tanque. Além disso, as válvulas das linhas de alimentação e *by-pass* eram abertas. O controle da vazão de alimentação do hidrociclone era realizado através do inversor de frequência da bomba e da abertura/fechamento das válvulas de alimentação e *by-pass*. A temperatura da suspensão era aferida ao longo dos testes e caso ultrapassasse os 28°C, a serpentina de refrigeração era ligada para que a temperatura não excedesse 30°C. Os testes eram realizados da menor para a maior queda de pressão.

Definida a queda de pressão e mantido o sistema em operação por cerca de 5 min para estabilização, os dados experimentais eram coletados. A vazão de alimentação era aferida através da pesagem das amostras, com auxílio de uma balança semi-analítica ($\pm 0,01$ g), e a tomada do tempo de coleta por meio de um cronômetro digital ($\pm 0,01$ s). O mesmo procedimento era realizado para medição da vazão mássica das correntes de *underflow* e *overflow*. Para cada corrente, três medidas ou mais eram realizadas para cada condição operacional e ainda o balanço das correntes era efetuado para garantir um erro relativo menor que 3%.

Para determinação do percentual de sólidos das correntes, amostras da suspensão do tanque e da corrente de *underflow* eram coletadas em triplicata, previamente pesadas e levadas

à estufa a 105°C por 24 h. Após a secagem, as amostras eram novamente pesadas e, então, calculadas as concentrações mássica e volumétrica das correntes.

Também eram coletadas alíquotas em triplicata da corrente de *underflow* e da suspensão de alimentação do hidrociclone para determinação da distribuição granulométrica e posterior cálculo do diâmetro de corte. Para tanto, foi usado o equipamento *Mastersizer* da *Malvern*, o qual utiliza de técnicas de difração a *laser* para determinação do tamanho de partículas. O procedimento para análise consiste em, primeiramente, realizar a leitura de uma amostra “branco” contendo apenas água e dispersante (Calgon na concentração de 1g/L), posteriormente a amostra é adicionada e submetida ao banho ultrassônico para desfazer possíveis aglomerados durante 30 s e então a análise e aquisição de dados é realizada pelo *Mastersizer*. Os dados obtidos são relacionados às respectivas frações mássicas cumulativas podendo ser correlacionados a um modelo de distribuição granulométrica.

Em seguida, o tratamento dos dados de distribuição granulométrica das correntes de alimentação e de *underflow* foi realizado no software *Statistica®* e estimados os parâmetros do modelo RRB, ($d_{63,2}$ e N) através de regressão não linear.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados experimentais obtidos mediante o procedimento experimental descrito no Capítulo 3 foram correlacionados através de gráficos e técnicas de regressão múltipla para avaliar o desempenho dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 frente à alteração das variáveis propostas no planejamento composto central. Foram obtidos resultados de capacidade de processamento, número de Euler, razão de líquido, eficiência total, eficiência total reduzida, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido.

Para avaliar a influência das variáveis estudadas, concentração de sólidos (X_1), concentração de viscosificante (X_2), diâmetro do orifício de *underflow* (X_3) e comprimento de *vortex finder* (X_4), em cada um dos equipamentos de forma isolada, as respostas relacionadas à hidrocyclonagem obtidas nos níveis (-2), (0) e (+2) dos fatores do planejamento foram analisadas graficamente com a variação da queda de pressão na alimentação em 30, 35 e 40 psi. Dessa forma, foi possível avaliar qualitativamente o grau de influência de cada fator no consumo energético, na eficiência de separação e na capacidade de espessamento de cada equipamento e comparar o desempenho deles.

Ainda, para avaliar quantitativamente a influência conjunta dos fatores estudados e a interação entre os mesmos em cada equipamento foram utilizadas Técnicas de Regressão Múltipla e Superfícies de Resposta. Foram usados na análise por regressão não linear todos os dados experimentais coletados. Equações foram propostas, capazes de descrever o comportamento das principais respostas da hidrocyclonagem em função das variáveis estudadas, concentração de sólidos (X_1), concentração de CMC (X_2), diâmetro de *underflow* (X_3), comprimento de *vortex finder* (X_4) e queda de pressão (X_5). As equações de regressão foram levantadas por meio de análises estatísticas no software *Statistica®* considerando significativos apenas os efeitos com nível de significância menor ou igual a 5%.

As Superfícies de Resposta contribuíram para localizar melhores níveis das variáveis geométricas na operação de cada um dos equipamentos: MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Os apêndices A, B, C e D apresentam todos os resultados experimentais obtidos para os hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, respectivamente.

4.1. INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

A influência da concentração de sólidos (C_{VA}) na operação de hidrociclonagem dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico, foi avaliada de forma independente considerando três níveis de quedas de pressão: 30, 35 e 40 psi. Para isso, foram mantidos constantes os fatores: concentração de CMC (C_{CMC}) em 0,6% em massa na suspensão de trabalho, diâmetro de *underflow* (D_U) igual a 5 mm para todos equipamentos e comprimento de *vortex finder* (ℓ) de 44 mm, 22 mm, 41 mm e 68 mm para os respectivos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Tais valores são referentes ao nível zero destas variáveis no planejamento proposto.

Considerando, portanto, as variáveis estudadas em sua forma codificada, foram comparados os resultados obtidos alterando a variável $X1$, concentração de sólidos, nos níveis (-2), (0) e (+2), mantendo $X2$, $X3$ e $X4$ no nível zero (0) e variando $X5$, queda de pressão, em (-1), (0) e (1). Ou seja, de acordo com a matriz de planejamento (Tabela 3.5-1), foram levantados gráficos com os resultados obtidos para os experimentos 17, 27, e 18 para avaliar o desempenho de hidrociclonagem frente à alteração da concentração de sólidos na alimentação de 1,0% a 5,5% e a 10,0% em volume.

Primeiramente o comportamento reológico das suspensões testadas nos experimentos 17, 27 e 18 foi avaliado. Amostras foram coletadas e testes utilizando o reômetro coaxial de *Brookfield* foram realizados conforme procedimento descrito na seção 3.4.1. Os dados obtidos de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação foram ajustados ao modelo de Power-Law (Equação 3.4-1) utilizando técnicas de regressão não linear. Os parâmetros obtidos para os três casos, teste 17, 27 e 18, estão mostrados na Tabela 2.1-1 juntamente com o coeficiente de correlação quadrático (R^2) de cada curva.

Tabela 4.1-1 – Parâmetros ajustados ao modelo de Power-Law das suspensões de trabalho dos testes 17, 27 e 18 contendo 0,6%m. de CMC e 1,0%, 5,5% e 10,0% em volume de sólidos respectivamente.

Teste	CMC [%m.]	C_{VA} [%v.]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	R^2	μ a 2100 s ⁻¹ [mPa.s]
17	0,6	1,0	$0,279 \pm 0,006$	$0,672 \pm 0,003$	0,998	22,5
27	0,6	5,5	$0,160 \pm 0,002$	$0,764 \pm 0,002$	0,999	26,3
18	0,6	10,0	$0,167 \pm 0,003$	$0,768 \pm 0,003$	0,999	29,0

A Figura 4.1-1 apresenta as curvas ajustadas aos dados experimentais obtidos a partir das suspensões formuladas contendo 0,6% de CMC em massa com percentuais de sólido em

suspensão de 1,0%, 5,5% e 10,0% em volume referentes às suspensões de trabalho utilizadas nos testes 17 (Curva A), 27 (Curva B) e 18 (Curva C) respectivamente.

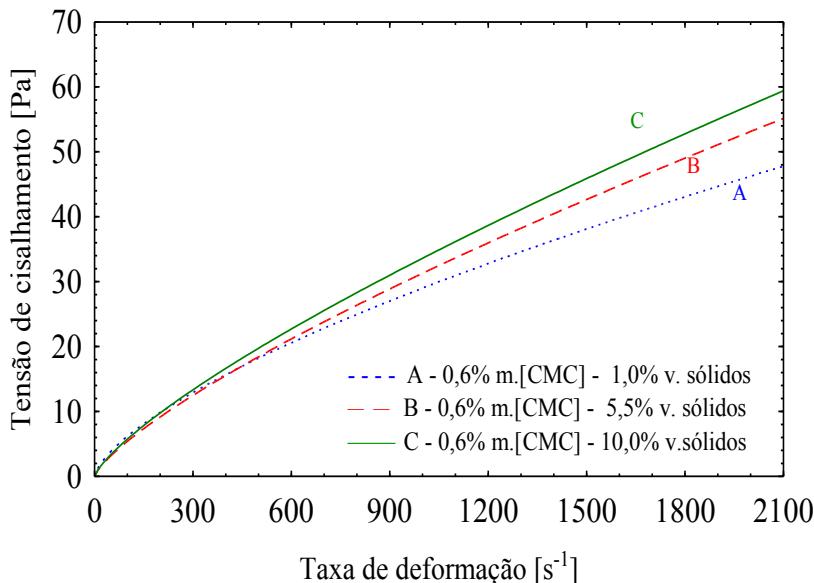


Figura 4.1-1 – Reograma das suspensões de trabalho contendo 0,6% m. de CMC e diferentes concentrações de sólidos: A - 1,0%v.; B - 5,5%v.; C - 10,0%v.

Como pode-se observar o comportamento das curvas representadas na Figura 4.1-1 e os parâmetros obtidos no ajuste ao modelo de Power-Law exibidos na Tabela 4.1-1 ($n < 1$), os fluidos testados apresentam caráter pseudoplástico. À medida que a taxa de deformação aumenta, a tensão cisalhante cresce de forma não linear. De acordo com a Lei da Viscosidade de Newton, para uma determinada taxa de deformação, quanto maior a tensão cisalhante, maior é a resistência ao escoamento e, então, maior a viscosidade. Nota-se que, no fluido contendo 5,5%v. de sólidos o perfil da tensão é superior à suspensão contendo 1,0% de sólidos, e ainda, no fluido contendo 10,0% de sólidos o perfil da tensão é superior aos demais, ou seja, a viscosidade aparente da suspensão é majorada com a adição de sólidos. Ainda, na Tabela 4.1-1 são exibidos os valores de viscosidade aparente crescente com a concentração de sólidos na alimentação (C_{VA}) para cada suspensão à taxa de 2100 s^{-1} .

Todavia, há de se notar que a curva A, referente à suspensão contendo 1,0% de sólidos, apresenta maior curvatura que as outras. Ao observar a Tabela 4.1-1, tem-se que o índice de comportamento (n) das curvas aumentou com o acréscimo de sólidos. Este comportamento denota uma diminuição do caráter pseudoplástico da suspensão; isto porque à medida que o valor de n se aproxima da unidade o fluido assemelha-se ao caráter newtoniano. Tem-se, então, que o sólido adicionado contribuiu para diluir a concentração de viscosificante no volume total,

já que na formulação da suspensão, a C_{CMC} refere-se à massa de CMC em relação à massa total de água e CMC, excluindo-se o sólido a ser adicionado. Considera-se ainda que o sólido pode ter adsorvido parte do polímero diminuindo sua ação como modulador reológico.

Os seguintes itens discutem a respeito do efeito da concentração de sólidos na capacidade de processamento e espessamento, na eficiência de separação e de coleta dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico.

4.1.1. Capacidade de Processamento e Consumo Energético

Em cada configuração testada, os dados coletados do balanço mássico das correntes de *overflow* e *underflow* puderam inferir a vazão mássica de alimentação no sistema para cada queda de pressão determinada previamente. Assim, de acordo com as propriedades do fluido e do sólido, a vazão volumétrica na entrada do equipamento (Q_A) foi calculada em cada condição. A capacidade de processamento, então representada pela vazão volumétrica sendo alimentada em uma dada queda de pressão ($-\Delta P$), é importante para análise de custos de operação e de manufatura de equipamentos, os quais estão vinculados ao volume de material a ser processado.

A Figura 4.1-2 representa o perfil de capacidade de operação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 com a alteração do percentual de sólidos na alimentação (C_{VA}) de 1,0 a 10,0% em volume, mantendo a concentração de viscosificante (C_{CMC}) em 0,6% em massa.

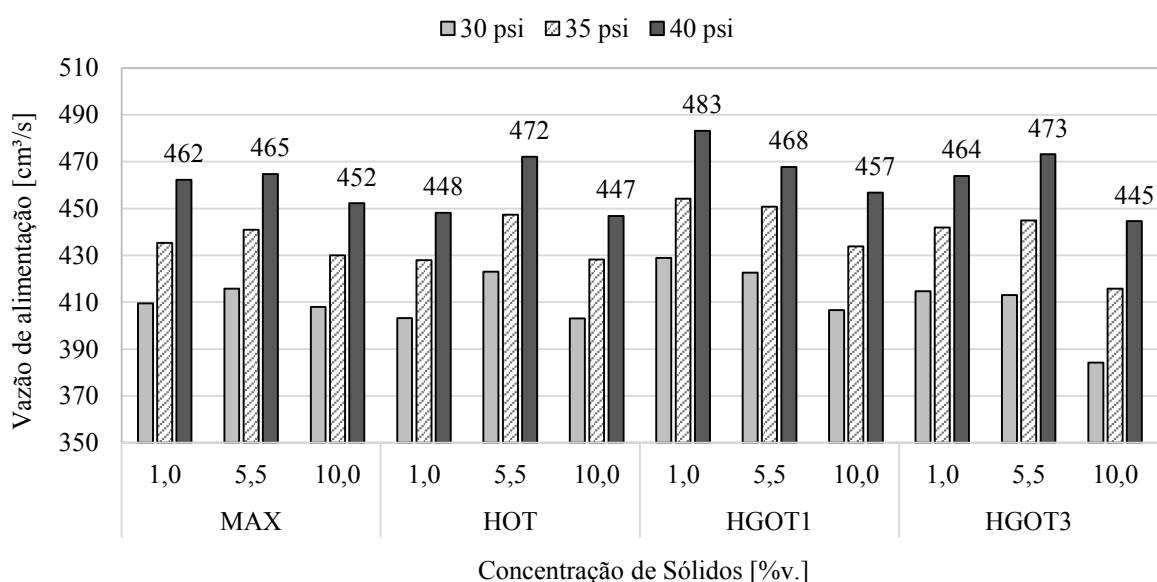


Figura 4.1-2 – Efeito da concentração de sólidos na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Assim como esperado, observou-se o aumento do volume de fluido processado à medida que a queda de pressão na linha de alimentação era majorada. Como visto na Figura 4.1-2, este comportamento foi validado em todas configurações geométricas testadas independentemente da quantidade de sólidos presente na suspensão.

Quanto ao acréscimo na concentração de sólidos para uma queda de pressão fixa, houve uma flutuação entre os resultados de capacidade de processamento em torno de um valor médio nos equipamentos MAX e HOT. Em geral, ao majorar a C_{VA} de 5,5%v. para 10,0%v. houve uma diminuição na vazão sendo alimentada em todos equipamentos. Sabe-se que quanto maior a quantidade de partículas presente no sistema, menor é a velocidade tangencial (DAVAILLES *et al.*, 2012b). Além disso, a viscosidade aparente do fluido contendo 10,0% de sólidos era maior que a do fluido contendo 5,5% de sólidos, o que conferiu ao sistema uma maior resistência ao escoamento e menor capacidade de processamento. Portanto, nesta faixa operacional ($5,5\%$ v. $< C_{VA} < 10,0\%$ v.), o aumento do percentual de sólidos elevou a perda de carga no equipamento o que diminuiu o volume de fluido sendo alimentado. Todavia, ao se passar da concentração de sólidos de 1,0 para 5,5%v., não houve redução em Q_A . A partir deste fato, pode-se pressupor que nesta faixa de operação ($C_{VA} < 5,5\%$) os efeitos partícula-partícula ainda não são expressivos na fluidodinâmica do hidrociclone operando com fluido pseudoplástico.

Outro ponto a levar em consideração é que, embora a viscosidade aparente do fluido tenha aumentado ao elevar a concentração de sólidos de 1,0%v. para 5,5%v., houve uma diminuição do caráter pseudoplástico da suspensão conforme as informações da Tabela 4.1-1 discutidas anteriormente. Pode-se dizer que neste ponto houve uma interação entre os fatores concentração de CMC e concentração de sólidos. A adição de sólidos alterou o perfil reológico do fluido, tornando-o menos pseudoplástico, favorecendo sua capacidade de processamento e superando o prejuízo acarretado pelo acréscimo no volume de partículas acima do percentual de 5,5%v. Assim, pode-se concluir que o fluido contendo 1,0%v. de sólidos apresentou pior capacidade de processamento, ou semelhante ao fluido contendo 5,5% de sólidos, por tratar de um fluido com caráter pseudoplástico mais pronunciado que os demais.

Ainda relacionado à capacidade de operação e consumo energético, tem-se o adimensional de Euler (Eu) que representa a queda de pressão do sistema ($-\Delta P$) em relação à energia cinética por unidade de volume. Dessa forma, numa dada queda de pressão, quanto maior a vazão do hidrociclone menor é o número de Euler e menor o consumo energético. Assim, para averiguar o consumo energético dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, sob suspensões pseudoplásticas de diferentes concentrações, tem-se a Figura 4.1-3 que

apresenta a variação do número de Euler (Eu) com a concentração de sólidos (C_{VA}) de 1,0% a 10,0% em volume numa suspensão com 0,6%m. de CMC.

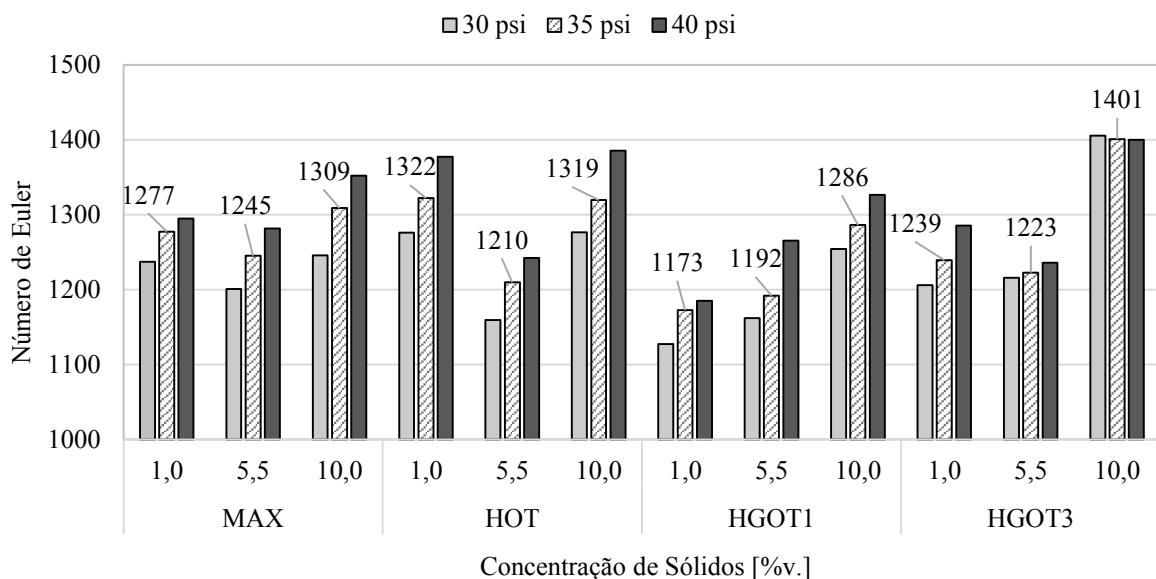


Figura 4.1-3 – Efeito da concentração de sólidos no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Por definição, de acordo com a Equação 2.2-5, o número de Euler é proporcional à queda de pressão no sistema, como mostrado na Figura 4.1-3. Além disso, sabe-se que quanto maior a queda de pressão na entrada do hidrociclone tem-se uma maior vazão de fluido (Q_A) sendo alimentada, como discutido anteriormente; assim, é de se esperar que, numa mesma condição, quanto maior $-\Delta P$ maior o número de Euler (Eu) e por consequência maior o consumo energético.

Assim como a vazão do sistema (Q_A), os valores encontrados para Euler não estabeleceram uma relação direta com o acréscimo de sólidos na suspensão contendo 0,6%m. de CMC, apresentando flutuações para mais ou para menos quando a concentração de sólidos passou de 1,0%v. para 5,5%v. Este comportamento ocorreu em função da interação entre o polímero e o sólido que modificou a reologia da suspensão. No entanto, ao comparar apenas os resultados referentes ao acréscimo de sólidos de 5,5%v. para 10,0%v., e os resultados passando de 1,0%v. para 10,0%v., o número de Euler se elevou, caracterizando maior consumo energético no sistema contendo acima de 5,5% de sólidos.

De acordo com os resultados experimentais da Figura 4.1-3, o número de Euler do hidrociclone MAX esteve entre 1201 e 1352, do equipamento HOT entre 1160 e 1385, do HGOT1 entre 1127 e 1326 e do equipamento HGOT3 entre 1206 e 1406.

Considerando o sistema mais concentrado exibido ($C_{VA} = 10,0\%v.$), o hidrociclone HGOT3 alcançou o maior patamar para o número de Euler ($Eu = 1406$ a 40 psi), o que significa que nos sistemas mais concentrados mais energia foi demandada por este equipamento do que na operação dos demais. Em contrapartida o equipamento HGOT1 sendo alimentado com C_{VA} de 10,0%v. apresentou o menor número de Euler dentre os demais hidrociclos estudados nas mesmas condições operacionais.

4.1.2. Capacidade de Espessamento

A razão de líquido (R_L) representa a fração de líquido que inicialmente alimentada no hidrociclone é descarregada na corrente de *underflow*. Quando o principal objetivo da hidrociclonagem é a elevação da concentração de sólidos, o equipamento deve possuir baixa razão de líquido. Por consequência, dependendo da geometria, grande parte dos grossos pode escapar no *overflow* destes equipamentos espessadores e a eficiência de separação pode ser baixa.

Os hidrociclos MAX e HOT foram projetados para minimizar a razão de líquido e manter a eficiência em patamares aceitáveis. De acordo com os trabalhos anteriores, foram encontrados resultados promissores no que tange à capacidade de espessamento desses equipamentos quando operados com suspensão diluída. Para o hidrociclo MAX, por exemplo, a razão de líquido obtida operando entre 25 e 75 psi, com fluido newtoniano e C_{VA} igual a 1,0%v., foi em média igual a $3,2 \pm 0,2\%$ (PANISSET, 2014). Todavia, em muitos casos na indústria a concentração de sólidos é notadamente superior ao percentual usado nos testes de otimização de tais equipamentos.

A fim de avaliar a capacidade de espessamento dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com suspensão pseudoplástica com até 10,0%v. de sólidos e observar os efeitos deste acréscimo de concentração isoladamente de outros fatores, tem-se a variação da resposta razão de líquido (R_L), representada pela Figura 4.1-4, e a concentração de sólidos no *underflow* (C_{VU}), exibida na Figura 4.1-5.

Nota-se, através da Figura 4.1-4, que o acréscimo da pressão na alimentação dos hidrociclos diminuiu a razão de líquido (R_L). Como a queda de pressão ($-\Delta P$) tem influência direta na intensidade do campo centrífugo, era de se esperar que com o aumento da vazão (Q_A) grande parte dos sólidos fosse direcionada à parede do hidrociclone constituindo o fluxo descendente e, por consequência, a quantidade de líquido descarregada na corrente de *underflow* fosse menor, como foi observado.

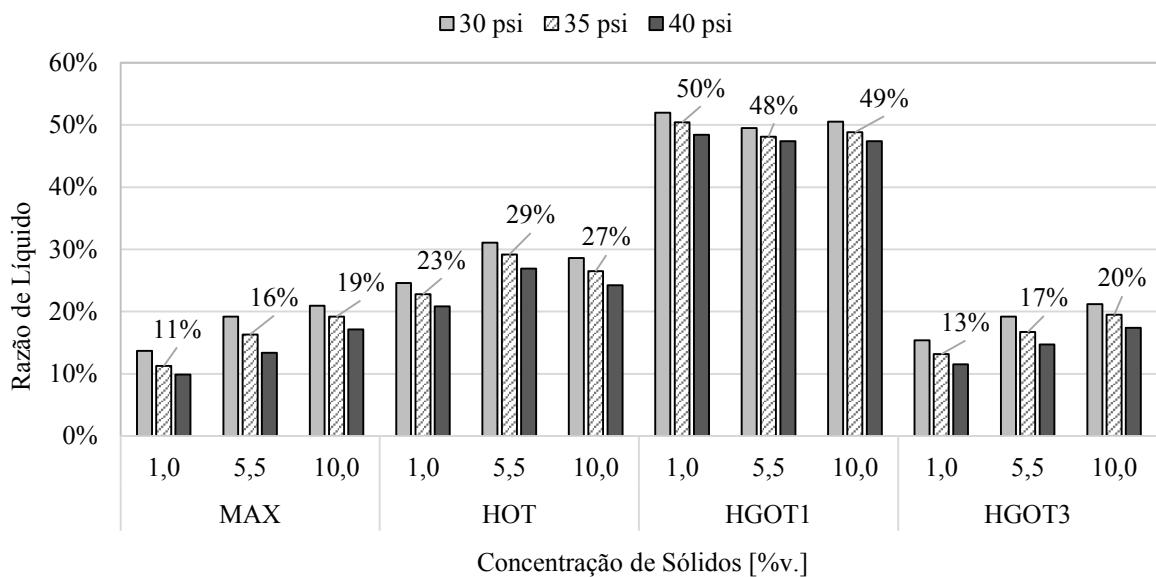


Figura 4.1-4 – Efeito da concentração de sólidos na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

De acordo com os resultados expressos na Figura 4.1-4, a mínima razão de líquido do hidrociclo MAX foi de 10%, na maior queda de pressão testada em suspensão diluída, e a máxima de 21% quando operado a 30 psi com de 10,0%v. de sólidos na alimentação. Observa-se que, para este equipamento, ao majorar a concentração de sólidos em 10 vezes, a razão de líquido duplicou. Além disso, comparando o resultado do teste 17 com o obtido por Panisset (2014) com fluido newtoniano e concentração de sólidos de 1,0%, tem-se uma avaliação direta do efeito da presença de viscosificante na suspensão. Neste caso, tem-se que com a alteração da reologia do fluido (newtoniano para pseudoplástico) houve aumento da viscosidade aparente e aumento de R_L em aproximadamente 3,3 vezes.

Assim como para o equipamento MAX operando com fluido pseudoplástico, a razão de líquido do equipamento HGOT3 praticamente dobrou ao sair de uma condição diluída ($C_{VA} = 1,0\%$ v., $R_L = 13\%$) e passar para uma concentrada ($C_{VA} = 10,0\%$ v., $R_L = 20\%$). Em se tratando do HGOT3, Kyriakidis (2018) encontrou, ao trabalhar com fluido newtoniano e C_{VA} igual a 1,0%v. de sólidos, R_L de aproximadamente 4%. Comparando com o teste 17, cuja C_{VA} também era de 1,0%v., tem-se que a alteração da reologia elevou a razão de líquido deste equipamento em cerca de 3 vezes.

Mognon (2015), ao testar o equipamento HOT com fluido pseudoplástico e concentração de sólidos de 0,3 a 2,0%v., não observou efeito relevante da concentração de sólidos na resposta razão de líquido. Neste patamar, a velocidade de sedimentação das partículas não foi alterada de forma relevante a influenciar na quantidade de líquido sendo

enviada ao *underflow*. No presente estudo, elevando a concentração de sólidos até 10,0%v., mantendo o percentual de CMC em 0,6%m., o equipamento HOT alcançou valores mínimo e máximo de R_L entre 21% e 31%. A maior quantidade de partículas presente no sistema culminou numa menor velocidade de sedimentação, devido à diminuição da velocidade tangencial do fluido inerente aos sistemas concentrados (DAVAILLES *et al.*, 2012b; KAWATRA *et al.*, 1996a). Assim, a quantidade de líquido em relação a quantidade de sólidos sendo descarregada no *underflow* foi majorada devido a perda do potencial de separação de sólidos com o aumento da concentração.

O hidrociclone HGOT1, concebido com o objetivo de maximizar a eficiência de separação, proporcionou nos testes realizados por Kyriakidis (2018), sob suspensão aquosa diluída a 25 psi, razão de líquido de aproximadamente 49%. No presente estudo, a variação da concentração de sólidos entre os testes 17, 27 e 18 não influenciou de forma expressiva a razão de líquido do HGOT1, retornando valores de R_L de aproximadamente 48%. Ainda, por se tratar de um hidrociclone de alta eficiência, sua razão de líquido é superior à dos outros equipamentos.

Em suma, através de R_L é possível avaliar o poder de espessamento do equipamento de maneira que, quanto menor a razão de líquido maior é a concentração de sólidos na corrente de *underflow* (C_{VU}). A Figura 4.1-5 descreve este comportamento, pois à medida que $-\Delta P$ cresce a concentração no *underflow* aumenta e a razão de líquido diminui (Figura 4.1-4). Além disso, pode-se observar que em cada uma das C_{VA} , o equipamento HGOT1 apresentou C_{VU} menor que os demais equipamentos em função da sua maior razão de líquido.

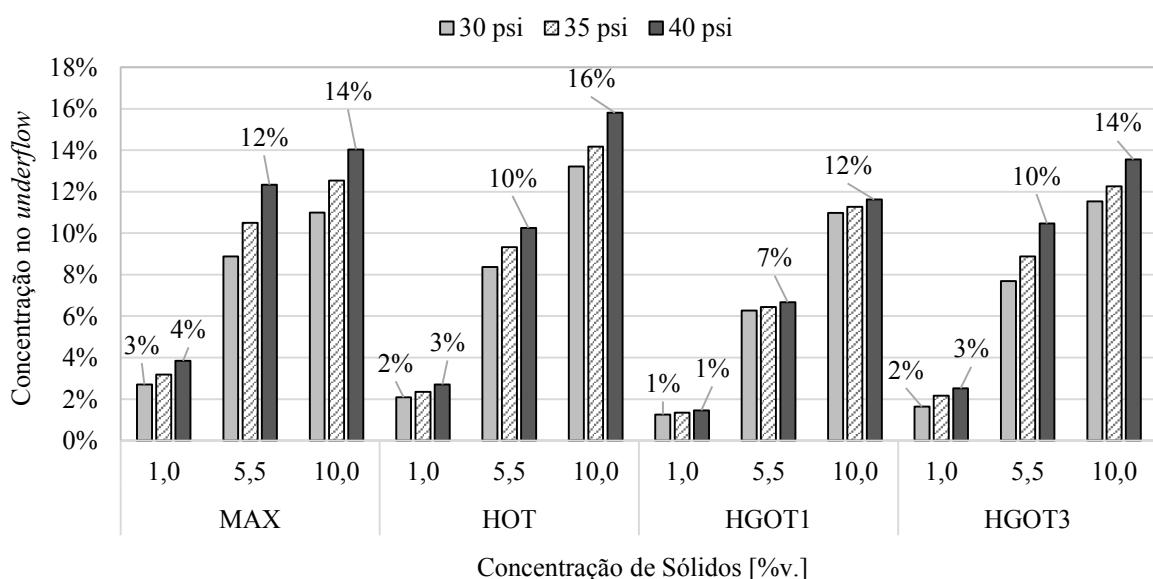


Figura 4.1-5 – Efeito da concentração de sólidos na concentração do *underflow* dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Ao analisar a Figura 4.1-5 é possível observar que o acréscimo de sólidos na alimentação aumenta o percentual dos mesmos na corrente de *underflow*, conforme literatura existente (DAVAILLES *et al.*, 2012b; GHODRAT *et al.*, 2014b). Todavia, ao se calcular a relação de elevação da concentração do produto em relação à concentração inicial da suspensão (C_{VU}/C_{VA}) tem-se que, partindo da concentração de 1,0%v. esta relação é maior que partindo de uma alimentação concentrada ($C_{VA} = 10,0\%$ v.). Por exemplo, para o equipamento MAX operando a 40 psi, ao se trabalhar com C_{VA} de 1,0% a concentração da suspensão elevou-se cerca de 4 vezes (passou de 1,0%v. para 4%v.); todavia ao alimentar o hidrociclone com 10,0%v. de sólidos a concentração aumentou cerca de 40% (ao passar de 10,0%v. para 14%v.). Esta análise reflete o fato de que o aumento de C_{VA} , embora leve a um acréscimo na concentração de sólidos do *underflow*, tem como consequência a elevação de R_L devido ao menor potencial de separação dos sistemas concentrados. Neste sentido, pode-se concluir que nos sistemas com maior percentual de sólidos presente maior é a razão de líquido e, embora a concentração no *underflow* seja superior, o potencial de espessamento (C_{VU}/C_{VA}) do hidrociclone é prejudicado.

Em se tratando do sistema diluído ($C_{VA} = 1,0\%$ v.), os equipamentos MAX, HOT e HGOT3 obtiveram resultados de C_{VU} próximos, entre 2% e 4% em volume, para as diferentes quedas de pressão ($-\Delta P$). Kyriakidis (2018) observou experimentalmente que o equipamento HGOT3 alcançou C_{VU} de 14,3% ao trabalhar com fluido aquoso newtoniano e com C_{VA} de 1,0%v.; confrontando este resultado com o obtido no teste 17, observa-se que houve uma diminuição drástica em C_{VU} , de aproximadamente 80%. Mais uma vez nota-se a influência da reologia do fluido no desempenho de hidrocyclonagem.

Ainda de acordo com a Figura 4.1-5, tem-se que nos testes contendo 10,0%v. de sólidos na alimentação, o hidrociclone HOT conseguiu elevar a concentração coletada no *underflow* até 16%v., comparado à C_{VU} de 14%v. dos hidrociclos MAX e HGOT3, e de 12%v. do hidrociclone HGOT1. Era de se esperar que o hidrociclone HGOT1 obtivesse o menor desempenho de espessamento por ter sido otimizado com o objetivo de elevar a eficiência de separação. Todavia, as diferenças de C_{VU} alcançadas pelos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 não são tão grandes quando eles estão operando a 30 psi e C_{VA} de 10,0%v.

4.1.3. Eficiência de separação

A fim de avaliar a Eficiência Total (η) dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 frente à alteração da concentração da suspensão de 1,0%v. a 10,0%v., tem-se a Figura 4.1-6 que exibe os resultados obtidos de η para os testes 17, 27 e 18, conduzidos a 30, 35 e 40 psi.

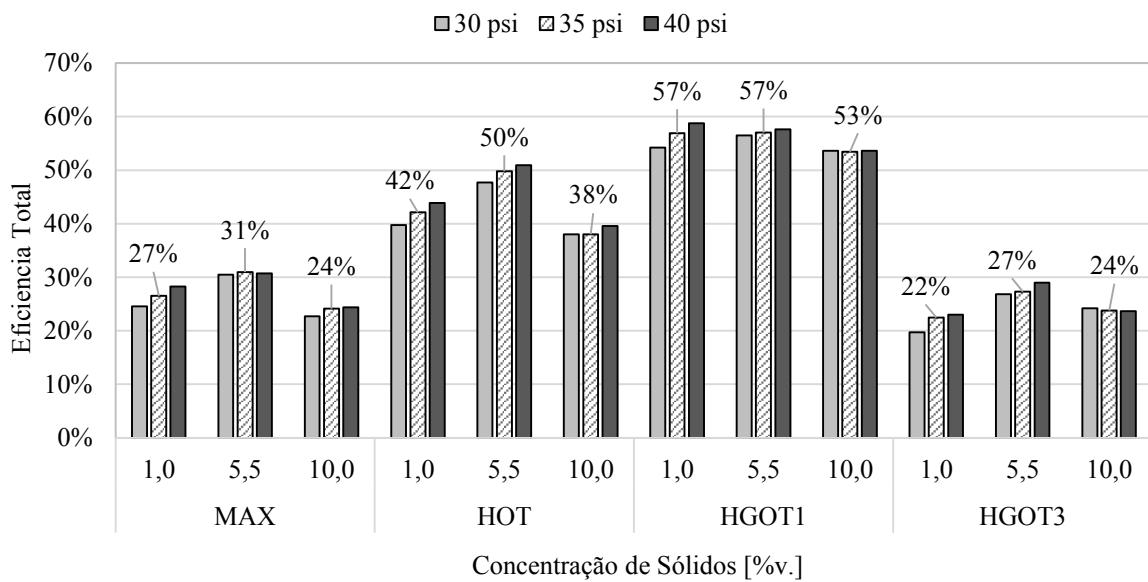


Figura 4.1-6 – Efeito da concentração de sólidos na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Sabe-se que a queda de pressão ($-\Delta P$) é um parâmetro operacional que além de influenciar no consumo energético também é proporcional ao desempenho de separação (NEESSE et al., 2015). Conforme os resultados apresentados na Figura 4.1-6, verificou-se que nos testes com suspensão diluída ($C_{VA} = 1,0\%v.$), o aumento da queda de pressão foi benéfico para a Eficiência Total, exibindo um acréscimo de cerca de 10% ao passar da queda de pressão de 30 para 40 psi em todos equipamentos.

Há de se observar que, ao aumentar a quantidade de sólidos presente na suspensão para $C_{VA} = 10,0\%v.$, não houve diferença significativa na Eficiência Total dos hidrociclos para as diferentes $-\Delta P$. Sabe-se que um crescente aumento na vazão estabiliza a eficiência podendo até mesmo torná-la decrescente devido ao baixo tempo de residência das partículas no hidrociclo e à possível criação de uma região de baixa pressão no centro do hidrociclo (TIAN et al., 2018). Assim, verificou-se que este efeito de estabilização da eficiência foi alcançado numa faixa operacional que para suspensões diluídas ainda não ocorre. A diminuição da velocidade de sedimentação das partículas, devido à elevada quantidade de sólidos no sistema contendo 10,0%v. de sólidos, contribuiu para dissipar a energia de pressão adicionada ao sistema e manter a eficiência num mesmo patamar.

Ao observar a Figura 4.1-6, tem-se que a Eficiência Total dos hidrociclos esteve entre 23 e 31% para o equipamento MAX, entre 38% e 51% para o HOT, entre 53% e 59% para o HGOT1 e entre 20% e 29% para o HGOT3. Como esperado, o hidrociclo HGOT1 apresentou maior eficiência que os demais nas situações testadas. Todavia, ao comparar o resultado obtido

por Kyriakidis (2018), verificou-se que a autora encontrou η de aproximadamente 91% ao trabalhar com 1,0%v. de sólidos em água a 25 psi, e no presente trabalho, para a mesma concentração de sólidos ($C_{VA} = 1,0\%$ v.), mas na presença de 0,6%m. de CMC, o HGOT1 alcançou apenas 54%, 57% e 59% de η ao operar com 30, 35 e 40 psi, respectivamente.

Ainda, de acordo com Kyriakidis (2018), o hidrociclone HGOT3 havia alcançado Eficiência Total de aproximadamente 73% nas condições diluídas testadas pela autora. No presente estudo, em condição diluída, mas não newtoniana, o equipamento HGOT3 desempenhou eficiência notadamente inferior, entre 20% e 23%, mesmo em patamares superiores de $-\Delta P$. Ou seja, houve uma redução de η em aproximadamente 73%. No entanto, somente a alteração de C_{VA} no fluido com características pseudoplásticas levou a flutuações no valor de η do HGOT3 ao redor do valor médio central, conforme os resultados expressos na Figura 4.1-6.

Nos resultados obtidos por Panisset (2014), a Eficiência Total do MAX a 25 psi foi de 70%. Ao se passar da condição diluída newtoniana para a não newtoniana viscosa, o decréscimo em η também foi acentuado, de cerca de 64%. No entanto, ao majorar a concentração de sólidos na suspensão, contendo 0,6%m. de CMC, de 1,0%v. para 10,0%v. de sólidos, o decréscimo não foi tão acentuado, sendo de no máximo 10%.

É possível correlacionar a eficiência obtida no teste 17 com o hidrociclone HOT, com os resultados reportados na literatura por Mognon (2015). O autor avaliou o desempenho do hidrociclone HOT operando a 40 psi com C_{CMC} de 0,6%m., C_{VA} de aproximadamente 1,1%v. e encontrou η de 32% e de 49% ao utilizar diâmetro de *underflow* (D_U) de 4 e 6 mm, respectivamente. Tem-se na Figura 4.1-6 que, nas mesmas condições operacionais (C_{VA} , C_{CMC} , $-\Delta P$), porém com $D_U = 5$ mm, o equipamento HOT alcançou 44% de Eficiência Total (valor intermediário ao encontrado por Mognon, 2015). Também para o HOT houve um decréscimo de cerca de 10% ao majorar C_{VA} de 1,0%v. para 10,0%v. mantendo as outras variáveis constantes.

Não houve uma clara tendência linear decrescente da eficiência com o aumento da concentração de sólidos no sistema operando com fluido pseudoplástico. Ao levar em consideração o perfil reológico dos fluidos apresentados na Figura 4.1-1 e na Tabela 4.1-1, em que o fluido com C_{VA} igual a 1,0% apresentou caráter mais pseudoplástico que os demais, o fato da eficiência neste caso não ter sido superior aos casos mais concentrados pode ser justificada. Assim, comparando apenas os resultados de η referentes à mudança de C_{VA} de 5,5%v. para 10,0%v., observa-se que houve um decréscimo de aproximadamente 22%, 24%, 7% e 18% na Eficiência Total dos respectivos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

De acordo com a literatura, o aumento do percentual de sólidos proporciona o rápido decaimento da eficiência (GONÇALVES *et al.*, 2017; KUANG *et al.*, 2012) devido à diminuição da velocidade tangencial das partículas (DAVAILLES *et al.*, 2012b). Na presente análise, devido ao fato de os equipamentos estarem sujeitos a uma condição já desfavorável de viscosidade ($C_{CMC} = 0,6\%m$.), o efeito da concentração de sólidos na Eficiência Total foi relativamente baixo. Por outro lado, ao analisar os resultados obtidos em trabalhos anteriores com os equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 com fluido newtoniano, foi possível ver como o efeito da reologia prejudicou de forma intensa a Eficiência Total dos hidrociclos mesmo em suspensão diluída de sólidos. Pode se afirmar que o acréscimo de sólidos ao sistema não apresentou grande variação na Eficiência Total dos equipamentos operando com fluido pseudoplástico, já que as eficiências se encontravam em patamares notadamente inferiores aos alcançados com suspensão aquosa diluída.

Destarte, uma outra forma de verificar o quanto a adição de sólidos interferiu no efeito centrífugo dos hidrociclos dá-se através do cálculo da Eficiência Total Reduzida (η'). Esta resposta quantifica apenas os sólidos separados devido à atuação da força centrífuga, excluindo aqueles conduzidos ao *underflow* pela simples divisão de correntes no equipamento, ou seja, o efeito relacionado à razão de líquido é descontado. A Figura 4.1-7 trata dos resultados de Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 dos testes 17, 27 e 18, os quais avaliam o efeito direto da variação da concentração de sólidos de 1,0%v. a 10,0%v. na hidrocyclonagem de fluidos pseudoplásticos.

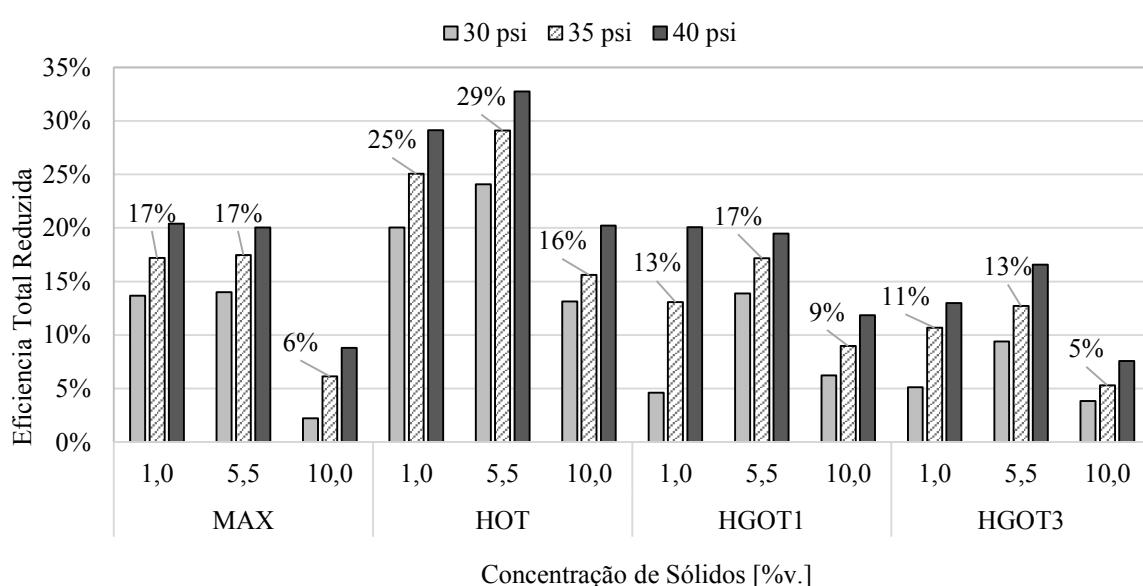


Figura 4.1-7 – Efeito da concentração de sólidos na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Consoante aos resultados de Eficiência Total (η) apresentados na Figura 4.1-6, tem-se que a Eficiência Total Reduzida (η') seguiu semelhante tendência em relação à queda de pressão do sistema (Figura 4.1-7). Notadamente, observa-se uma alteração na ordem de classificação dos equipamentos. O hidrociclone HGOT1 que apresentou a maior Eficiência Total em relação aos demais equipamentos, não permaneceu na mesma posição ao analisar os resultados de η' ; isto porque sua razão de líquido também foi elevada, o que levou a sua Eficiência Total Reduzida a patamares menores. Portanto, ao comparar os equipamentos, pode-se afirmar que o hidrociclone HOT, em todas concentrações de alimentação testadas, apresentou desempenho centrífugo de separação superior.

Novamente, ao analisar a Figura 4.1-7, foi possível notar que o acréscimo da concentração de sólidos na alimentação de 1,0%v. para 5,5%v. não exibiu diferença significativa no potencial de separação dos hidrocyclones operando com fluido pseudoplástico. Todavia, ao comparar os resultados passando-se de C_{VA} de 5,5%v. para 10,0%v., na queda de pressão de 35 psi, tem-se uma diminuição de η' de 17% para 6% no MAX, de 29% para 16% no HOT, de 17% para 9% no HGOT1 e de 13% para 5% no HGOT3. Os decréscimos na Eficiência Total Reduzida foram expressivos nesta faixa operacional de C_{VA} , dessa forma, pode-se afirmar que houve uma atenuação na força centrífuga atuante sobre as partículas. Sabe-se que a velocidade tangencial é a principal responsável pela separação de partículas no hidrociclone. À medida que o percentual de sólidos cresce, o perfil de velocidade tangencial se torna linear ao longo da seção cilíndrica, o movimento diferencial entre partículas é prejudicado e a eficiência de separação reduz (DAVAILLES *et al.*, 2012b).

4.1.4. Diâmetro de Corte

De posse dos resultados obtidos de Eficiência Total (η), Razão de Líquido (R_L) e com os dados de distribuição granulométrica das correntes de alimentação e *underflow*, é possível calcular o Diâmetro de Corte (d_{50}) e o Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}'). O Diâmetro de Corte representa o diâmetro das partículas com 50% de probabilidade de serem coletadas no *underflow*, ou seja, partículas maiores que d_{50} terão mais chances de seguir para o *underflow*. Assim, um equipamento é classificado como de alta eficiência de coleta se seu d_{50} for o menor possível. Ainda, tem-se que o Diâmetro de Corte Reduzido contabiliza apenas as partículas conduzidas ao *underflow* devido ao efeito centrífugo, excluindo o arraste axial diretamente ligado à razão de líquido.

Assim, para avaliar o poder de classificação dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 frente à alteração da concentração de sólidos num fluido pseudoplástico, tem-se as

respostas Diâmetro de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}') representadas pelas Figura 4.1-8 e Figura 4.1-9 respectivamente.

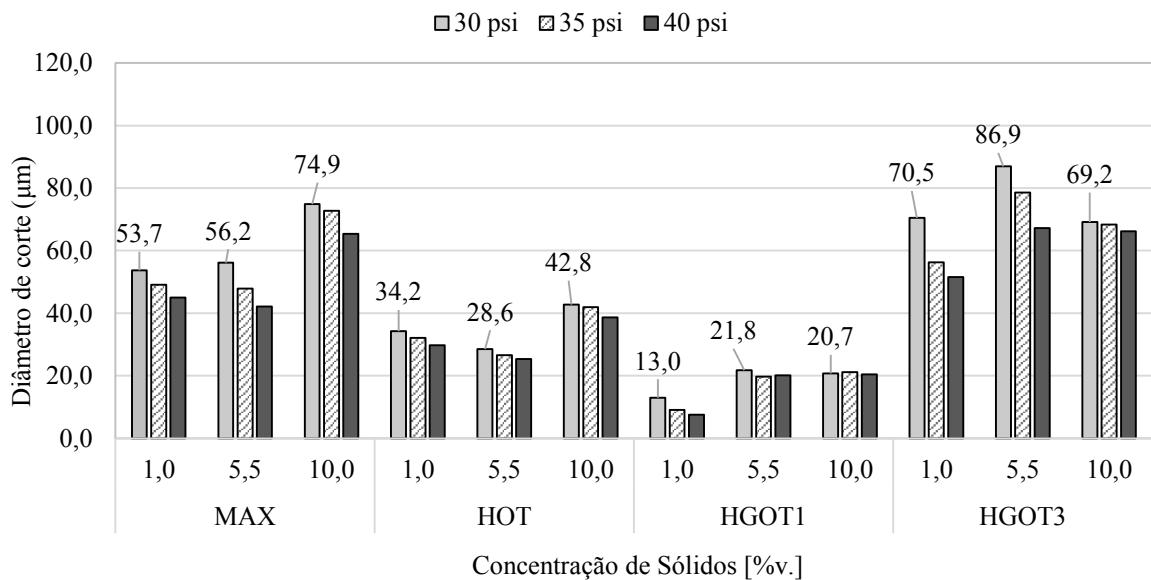


Figura 4.1-8 – Efeito da concentração de sólidos no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

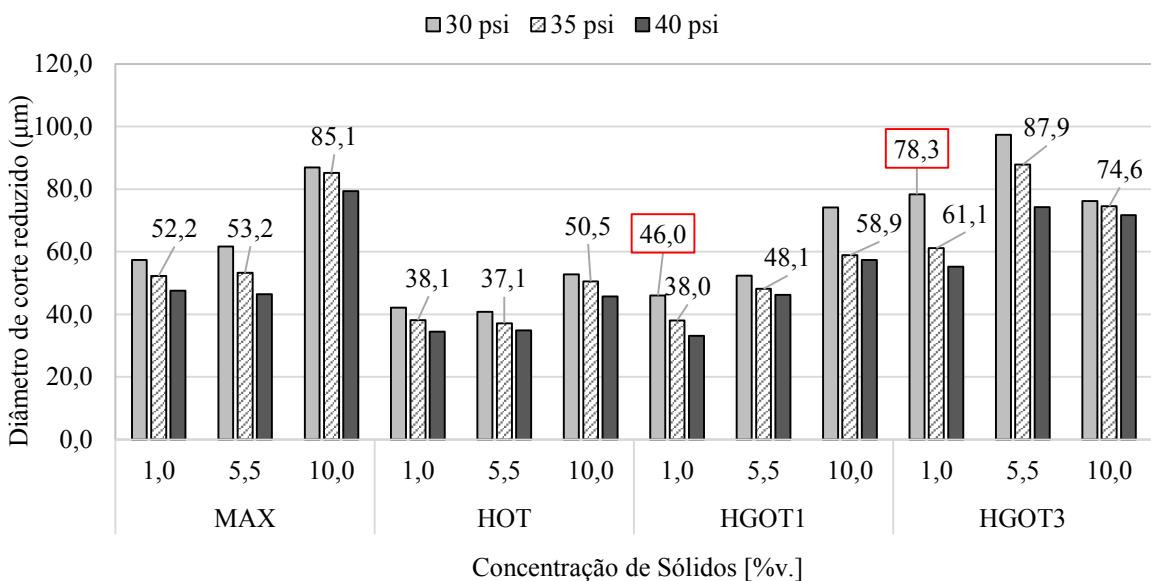


Figura 4.1-9 – Efeito da concentração de sólidos no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Observa-se através da Figura 4.1-8 e da Figura 4.1-9 que o aumento da queda de pressão favoreceu a eficiência de coleta. Ainda, assim como esperado os valores experimentais de d_{50}' foram superiores aos valores de d_{50} para as mesmas condições testadas. Devido à alta razão de

líquido proporcionada pelo equipamento HGOT1, este acréscimo foi mais pronunciado, sendo que os valores de d_{50} que estavam entre 7,6 e 21,8 μm passaram em d_{50}' de 33,1 para 74,1 μm . Todavia, para todos equipamentos, os dados de d_{50} e d_{50}' seguiram a mesma tendência com relação ao acréscimo de sólidos alimentação.

De acordo com os resultados apresentados por Kyriakidis (2018), nos ensaios com C_{VA} de 1,0%v. e ausência de viscosificante a 25 psi, o equipamento HGOT1 e o equipamento HGOT3 alcançaram Diâmetro de Corte Reduzido de 6,6 e 14,2 μm , respectivamente. No presente estudo, para a concentração de 1,0%v. em fluido pseudoplástico a 30 psi, os hidrociclos HGOT1 e HGOT3 obtiveram d_{50}' de 46,0 e 78,3 μm . Nota-se o quanto a alteração da reologia do fluido modificou a eficiência de coleta dos respectivos hidrociclos.

Analizando os dados referentes à Figura 4.1-9, tem-se que o acréscimo no percentual de sólidos alimentado aumentou o diâmetro de corte reduzido dos equipamentos. Sabe-se que, quanto maior a concentração de sólidos na alimentação, partículas leves e grossas tendem a escapar pelo *overflow* (GHODRAT *et al.*, 2016). Tomando como base a queda de pressão intermediária de 35 psi, ao elevar C_{VA} de 1,0%v. para 10,0%v, o equipamento MAX elevou o d_{50}' de 52,2 para 85,1 μm , o hidrociclo HOT passou de 38,1 para 50,5 μm , HGOT1 de 38,0 para 58,9 μm , e para o HGOT3 d_{50}' subiu de 61,1 para 74,6 μm , ou seja, o potencial de classificação de finos dos hidrociclos estudados foi comprometido ao acrescentar sólidos no sistema.

À medida que a concentração da suspensão aumenta, as partículas ficam mais próximas e interferem umas nas outras começando a sentir os efeitos de viscosidade e densidade da suspensão (KAWATRA *et al.*, 1996a). Assim, a velocidade terminal das partículas e a taxa de sedimentação reduz, por consequência a eficiência diminui (MASSARANI, 2001; ORTEGA-RIVAS; SVAROVSKY, 1998). À medida que a velocidade de sedimentação das partículas decai, partículas mais grossas deixam de atingir o *underflow* e o diâmetro de corte se torna cada vez maior (TAVARES *et al.*, 2002). Outro ponto que deve-se levar em consideração, diz respeito ao leito de partículas que é formado na parte inferior do equipamento à medida que sólidos vão se acumulando, como mostrado na Figura 2.2-1 (DAVAILLES *et al.*, 2012b). Esta redução do volume útil disponível para separação leva a eficiência a patamares reduzidos e maiores diâmetros de corte.

4.2. INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CMC

Nesta seção foi avaliada a influência da concentração de carboximetilcelulose (C_{CMC}), usada como modulador reológico, na suspensão de trabalho dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Assim como a análise realizada na seção 4.1, nesta seção também serão avaliados o consumo energético, através das respostas vazão alimentada (Q_A) e número de Euler (Eu), a capacidade de espessamento, pelas respostas razão de líquido (R_L) e concentração no *underflow* (C_{VU}), assim como a eficiência de separação, através da Eficiência Total (η) e Reduzida (η'), e a eficiência de coleta, pelo Diâmetros de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}').

Para tanto serão analisados graficamente os experimentos 19, 27 e 20, nos quais a variável X_2 , referente à C_{CMC} , está estabelecida nos respectivos níveis codificados de (-2), (0), e (+2), que correspondem às concentrações de CMC de 0,2%; 0,6% e 1,0% em massa. Nestes experimentos, as variáveis X_1 , X_3 e X_4 permanecem no nível central igual a zero, correspondentes à C_{VA} igual a 5,5%v.; D_U igual a 5 mm e ℓ de 44 mm, 22 mm, 41 mm e 68 mm para os respectivos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Quanto à queda de pressão ($-\Delta P$), os testes foram realizados com os equipamentos operando de 30 a 40 psi.

Para averiguar o comportamento reológico das três suspensões de trabalho, formuladas contendo 5,5%v. de sólidos e 0,2%m.; 0,6%m. e 1,0%m. de CMC, dados de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação foram obtidos através de testes de reologia, conforme item 3.4.1. As informações obtidas foram ajustadas ao modelo reológico de Power-Law (Equação 3.4-1) e os parâmetros encontrados estão mostrados na Tabela 4.2-1, assim como o coeficiente de correlação quadrático (R^2) de cada ajuste.

Tabela 4.2-1 - Parâmetros ajustados ao modelo de Power-Law das suspensões de trabalho dos testes 19, 27 e 20 contendo 5,5%v. de sólidos e 0,2%, 0,6% e 1,0% em massa de CMC respectivamente.

Teste	CMC [%m.]	C_{VA} [%v.]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	R^2	μ a 2100 s ⁻¹ [mPa.s]
19	0,2	5,5	$0,007 \pm 0,001$	$0,993 \pm 0,006$	0,998	10,2
27	0,6	5,5	$0,160 \pm 0,002$	$0,764 \pm 0,002$	0,999	26,3
20	1,0	5,5	$3,179 \pm 0,060$	$0,480 \pm 0,003$	0,997	58,5

Com base nos ajustes obtidos foi possível construir o reograma das suspensões analisadas. Tem-se, portanto, na Figura 4.2-1 a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa

de deformação, variando de 0 a 2100 s^{-1} , para as suspensões contendo 5,5%v. de sólido e 0,2%m. de CMC (Curva A'), 0,6%m. (Curva B) e 1,0%m. (Curva C').

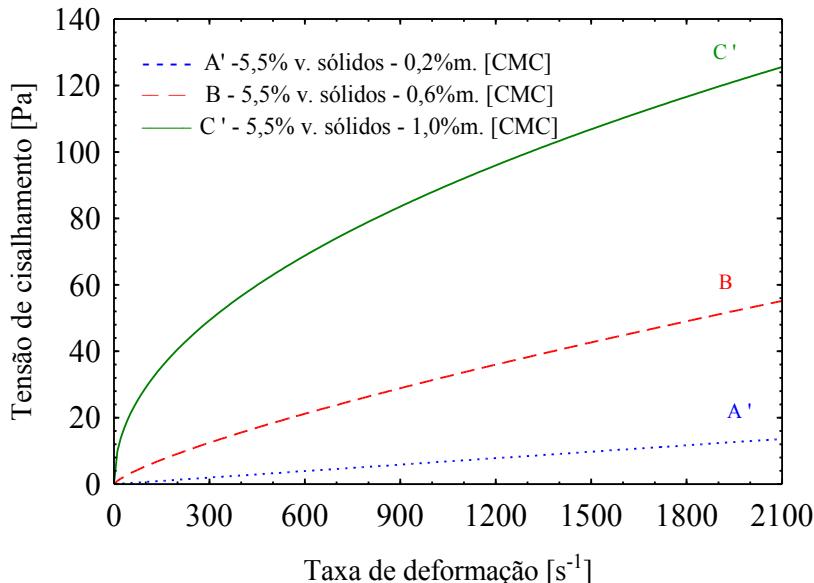


Figura 4.2-1 – Reograma das suspensões de trabalho contendo 5,5%v. de sólidos e diferentes concentrações de CMC: A' – 0,2%m.; B – 0,6%m.; C' - 1,0%m.

É possível observar, na Figura 4.2-1, o quanto a adição de CMC modificou o comportamento reológico dos fluidos. Tem-se que, à medida que CMC é adicionada o caráter pseudoplástico torna-se mais intenso. O índice de comportamento (n) obtido através do ajuste ao modelo de Power-Law, quantifica este comportamento pois, à medida que C_{CMC} é elevada o valor de n decresce proporcionalmente. Além de conferir caráter pseudoplástico às suspensões, a CMC tornou a suspensão mais viscosa. Como pode-se observar na Tabela 4.2-1, a viscosidade aparente dos fluidos à taxa de deformação de 2100 s^{-1} foi de 10,2 cP, 26,3cP e 58,5 cP para C_{CMC} de 0,2%m., 0,6%m. e 1,0%m., respectivamente.

Destarte, os seguintes itens discorrem a respeito do efeito da concentração de CMC sobre o desempenho de hidrociclonagem dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

4.2.1. Capacidade de Processamento e Consumo Energético

A Figura 4.2-2 ilustra o efeito da concentração de CMC (C_{CMC}) na vazão de alimentação (Q_A) dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 sob a queda de pressão de 30, 35 e 40 psi.

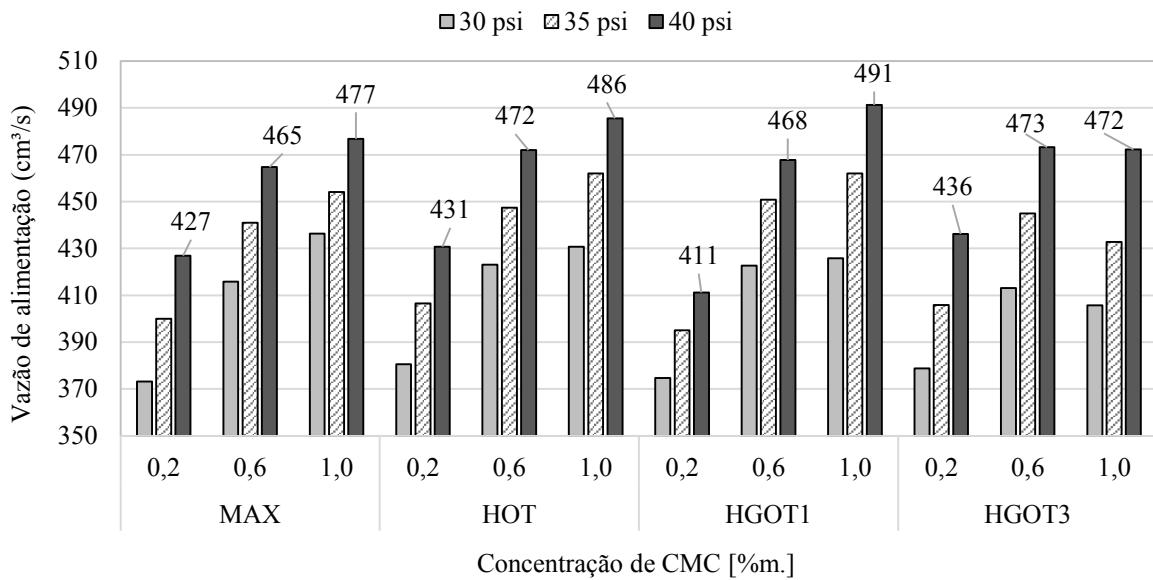


Figura 4.2-2 – Efeito da concentração de CMC na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Tem-se que a vazão alimentada (Q_A) em uma dada queda de pressão ($-\Delta P$) representa a capacidade de processamento de um hidrociclo, que por sua vez tem relação direta com os custos de operação. Observa-se na Figura 4.2-2 que ao aumentar a quantidade de CMC, a vazão alimentada nos equipamentos aumentou. Diferentemente do esperado, o aumento da viscosidade dos fluidos beneficiou a capacidade de processamento dos hidrociclos. Considerando os resultados obtidos para o hidrociclo MAX à queda de pressão de 35 psi, ao elevar a concentração de CMC de 0,2%m. para 1,0%m. a vazão alimentada passou de 400 cm³/s para 454 cm³/s, ou seja, houve um aumento de cerca de 14% na capacidade de processamento.

Ainda em relação aos resultados exibidos na Figura 4.2-2, nota-se que com as diferentes C_{CMC} testadas, os equipamentos trabalharam em faixas de Q_A semelhantes. O equipamento MAX estabeleceu Q_A mínimo de 373 cm³/s quando operado com $-\Delta P$ de 30 psi e C_{CMC} igual a 0,2%m., e Q_A máximo de 477 cm³/s quando operado com $-\Delta P$ de 40 psi e C_{CMC} igual a 1,0%m. Para os demais equipamentos, esta faixa esteve entre 381 e 486 cm³/s para o HOT, entre 375 e 491 cm³/s para o HGOT1 e entre 379 e 472 cm³/s para o HGOT3, nas mesmas condições estabelecidas de $-\Delta P$ e C_{CMC} .

Os resultados para o número de Euler (Eu) em função da variação da concentração de CMC nas quedas de pressão de 30, 35 e 40 psi estão apresentados na Figura 4.2-3. Em virtude de a vazão dos equipamentos ter se elevado com acréscimos na concentração de CMC, o número de Euler foi reduzido como mostrado na Figura 4.2-3. Tomando por base a queda de pressão média de 35 psi, foram observados decréscimos na ordem de 22% em Eu ao modificar

a C_{CMC} de 0,2% m. para 1,0% m. para os equipamentos MAX e HOT. Para o hidrociclone HGOT1 este decréscimo foi de aproximadamente 27% e para o HGOT3 de cerca de 12%. Ou seja, o aumento da viscosidade aparente dos fluidos reduziu o consumo energético na operação de hidrociclonagem.

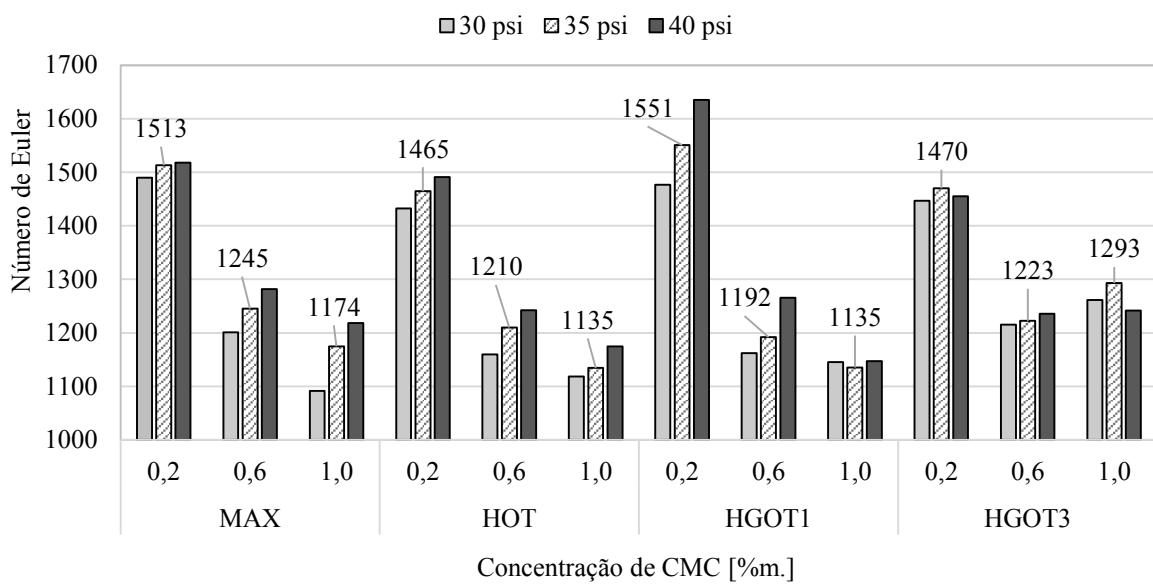


Figura 4.2-3 – Efeito da concentração de CMC no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Sabe-se que, o aumento da viscosidade reduz a intensidade do movimento helicoidal (MARTHINUSSEN *et al.*, 2014) em detrimento da intensificação das demais componentes da velocidade (axial e radial). Ainda de acordo com Hoffmann e Stein (2008), o decréscimo da intensidade do vórtice com o aumento da viscosidade, além de influenciar a eficiência centrífuga, também diminui a queda de pressão no equipamento. Sendo assim, nos casos em que o fluido apresentou maior viscosidade aparente, pontos de maior concentração de CMC, menor foi o tempo de residência do fluido no equipamento que culminou numa maior capacidade de processamento, como revelado através da Figura 4.2-2. Assim, a diminuição do número de Euler com o aumento do percentual de viscosificante observado na Figura 4.2-3 ocorreu devido à diminuição da intensidade do movimento rotacional do fluido.

4.2.2. Capacidade de Espessamento

As respostas razão de líquido (R_L) e concentração de sólidos no *underflow* (C_{VU}) também foram influenciadas pela concentração de viscosificante (C_{CMC}) devido a diminuição do potencial de separação de sólidos, o qual foi abordado seção seguinte (4.2.3) com a comparação

dos resultados de eficiência de separação. A Figura 4.2-4 e a Figura 4.2-5 mostram o quanto a C_{CMC} influenciou na capacidade de espessamento dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 nas quedas de pressão de 30, 35 e 40 psi.

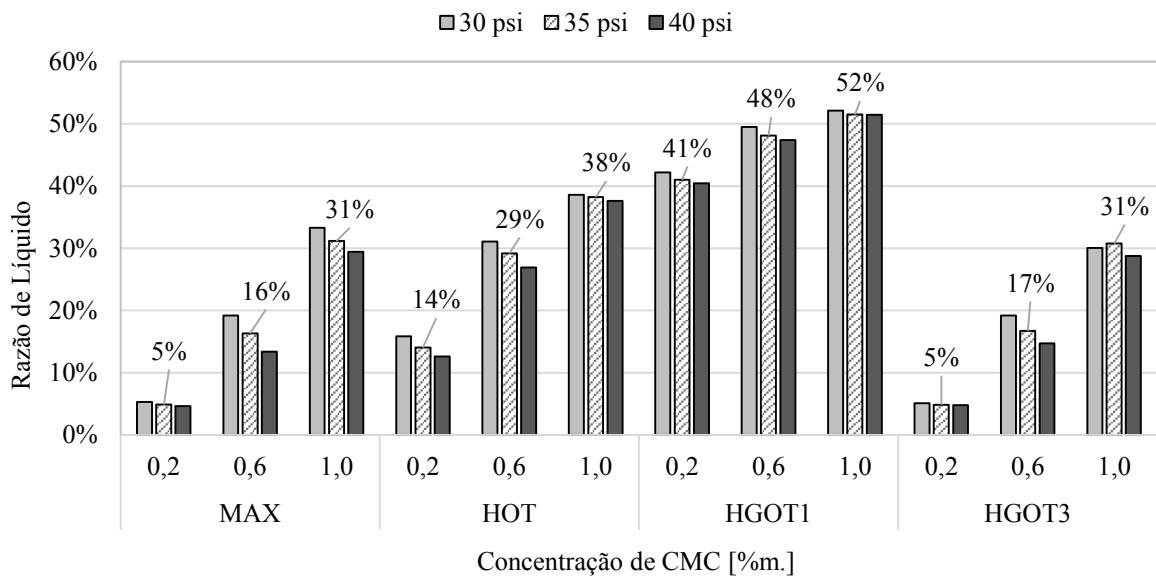


Figura 4.2-4 – Efeito da concentração de CMC na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

É possível observar na Figura 4.2-4 que, em geral, houve uma pequena redução da razão de líquido dos hidrociclos com a queda de pressão ($-\Delta P$). Quanto à variação da concentração de CMC de 0,2% m. para 1,0% m., tomando por base os resultados a 35 psi, tem-se que a razão de líquido dos hidrociclos MAX e HGOT3 passou de 5% para 31%, no hidrociclo HOT R_L passou de 14% para 38% e no HGOT1 de 41% para 52%. O acréscimo da viscosidade efetiva acarreta o aumento da velocidade axial e a diminuição da velocidade tangencial do fluido que proporciona um maior fluxo de líquido para o *underflow* e um menor arraste de sólidos para o *underflow* (KAWATRA *et al.*, 1996b).

A alteração da reologia do fluido alterou a fluidodinâmica do hidrociclo e uma maior quantidade de líquido, e uma menor quantidade de sólidos, foi descarregada na corrente de *underflow* com a adição do viscosificante, levando a maiores valores de R_L . De igual forma, pode-se observar na Figura 4.2-5, através dos resultados de concentração de sólidos no *underflow* (C_{VU}), o quanto a concentração de CMC prejudicou a capacidade de espessamento dos hidrociclos.

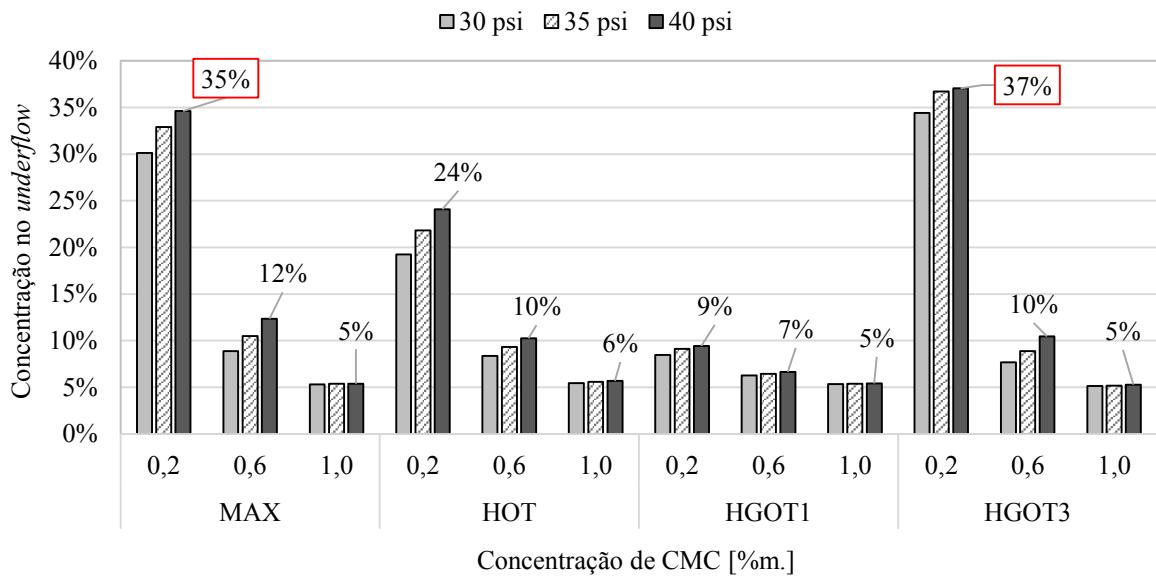


Figura 4.2-5 – Efeito da concentração de CMC na concentração de *underflow* dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Observa-se na Figura 4.2-5 que o aumento da queda de pressão ($-\Delta P$) beneficia a concentração de sólidos, entretanto esse acréscimo não é tão pronunciado quando a C_{CMC} é igual a 1,0% m. Ao trabalhar com o fluido contendo 0,2% m. de CMC, cujo caráter é próximo ao fluido newtoniano ($n = 0,993$ de acordo com a Tabela 4.2-1), tem-se que os equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 elevaram a concentração de sólidos inicialmente contendo 5,5% v. de sólidos para, respectivamente, até 35%, 24%, 9% e 37%. Os resultados obtidos ao trabalhar com esta suspensão ($C_{VA} = 5,5\%$ v., $C_{CMC} = 0,2\%$ m.) estabelecem que o equipamento HGOT3 possui maior poder de espessamento que os demais, seguido pelo hidrociclo MAX, HOT e HGOT1.

Ao observar os resultados dos experimentos realizados com C_{CMC} de 1,0% m., em que o fluido apresenta índice de comportamento n igual a 0,480, não houve diferença significativa entre o desempenho de espessamento dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. É possível visualizar através da Figura 4.2-5 que trabalhando com este fluido a elevação da concentração de sólidos no *underflow*, C_{VU} , em relação à concentração inicial da alimentação ($C_{VA} = 5,5\%$ v) foi mínima para todos hidrociclos. À medida que o parâmetro n do modelo de Power Law, decresce, a velocidade tangencial do fluido diminui, assim como a força que direciona as partículas para a parede do hidrociclo; por consequência, menor é a coleta de partículas no *underflow* (WU *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2015) por deficiência do campo centrífugo.

A adição de viscosificante na suspensão diminuiu a relação entre a concentração final do produto em relação à concentração inicial da suspensão (C_{VU}/C_{VA}). Portanto, assim como observado para a resposta razão de líquido (R_L), o aumento da viscosidade aparente do fluido, devido à diminuição da intensidade do campo centrífugo, prejudicou de forma intensa o potencial de espessamento dos hidrociclos.

4.2.3. Eficiência de separação

O efeito da concentração de CMC (C_{CMC}) na eficiência de separação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 pode ser visualizado através da Figura 4.2-6 e da Figura 4.2-7, as quais exibem as respectivas respostas Eficiência Total (η) e Eficiência Total Reduzida (η').

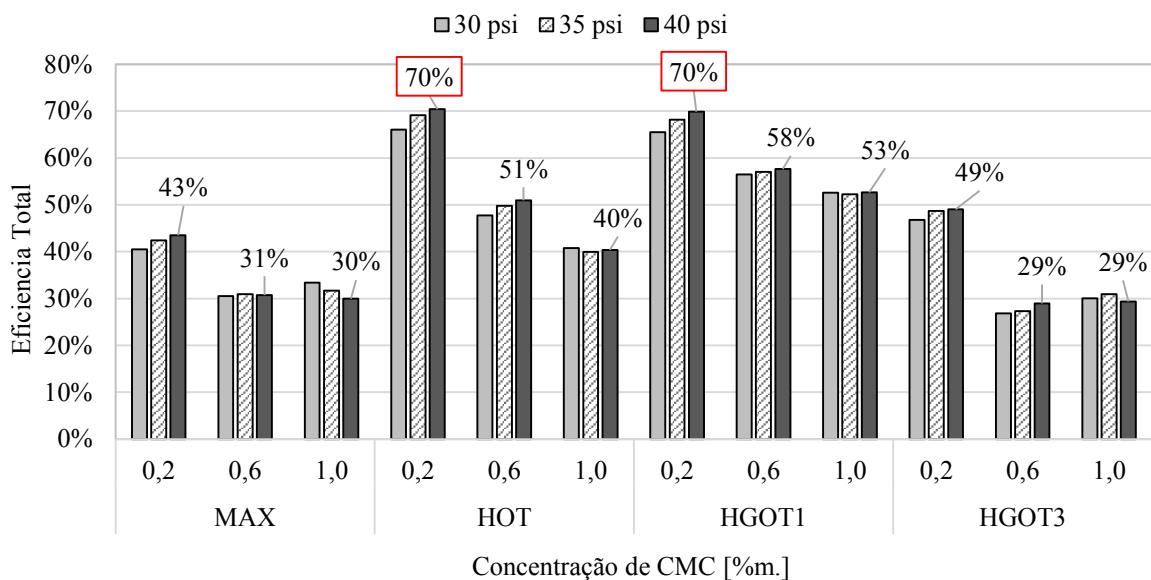


Figura 4.2-6 – Efeito da concentração de CMC na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Na análise representada pela Figura 4.2-6, os maiores níveis de Eficiência Total foram alcançados com o fluido que possuía a menor concentração de CMC (0,2% m.), cujo caráter foi mais próximo ao newtoniano. Nesta condição, o aumento da queda de pressão favoreceu a separação, de modo que os equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 obtiveram η de 43%, 70%, 70% e 49%, respectivamente a 40 psi.

O aumento da viscosidade aparente da suspensão levou a uma diminuição de η em função da diminuição da velocidade tangencial do fluido e aumento da força de arraste pela componente radial. Nota-se através da Figura 4.2-6 que houve um decréscimo mais

pronunciado na Eficiência Total dos hidrociclos ao elevar a C_{CMC} de 0,2%m. para 0,6%m. do que de 0,6%m. para 1,0%m. Para os equipamentos MAX e HGOT3, a eficiência se estabilizou em um valor mínimo ao utilizar C_{CMC} acima de 0,6%m. Nos demais hidrociclos a eficiência ainda decresceu cerca de 20% no HOT e 8% no HGOT1. Em suma, a eficiência dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 caiu cerca de 28%, 43%, 24% e 41%, respectivamente, quando o valor de n (índice de comportamento) passou de 0,993 (praticamente considerado newtoniano) para 0,480 (fluído pseudoplástico).

No sistema menos víscido, à medida que a vazão alimentada no hidrociclo aumenta, a força centrífuga torna-se mais intensa favorecendo a separação. No entanto, pode-se observar que para C_{CMC} acima de 0,6%m. a queda de pressão não foi benéfica para a separação dos equipamentos, e em alguns casos tornou a eficiência decrescente. O crescente aumento da queda de pressão levou a um baixo tempo de residência das partículas no equipamento devido à alta vazão. Este fenômeno, somado ao decréscimo acentuado da intensidade da força centrífuga devido à alta viscosidade, levou à estabilização da eficiência. A alta vazão também pode levar à formação de uma região de baixa pressão no centro do hidrociclo capaz de tornar a eficiência decrescente com o aumento da queda de pressão (TIAN *et al.*, 2018) como observado para o hidrociclo MAX a 40 psi e C_{CMC} de 1,0%m.

Através dos resultados de Eficiência Total Reduzida (η'), apresentados na Figura 4.2-7, é possível notar o quanto a força centrífuga é apassivada nos hidrociclos em função o aumento da viscosidade aparente com a adição de CMC.

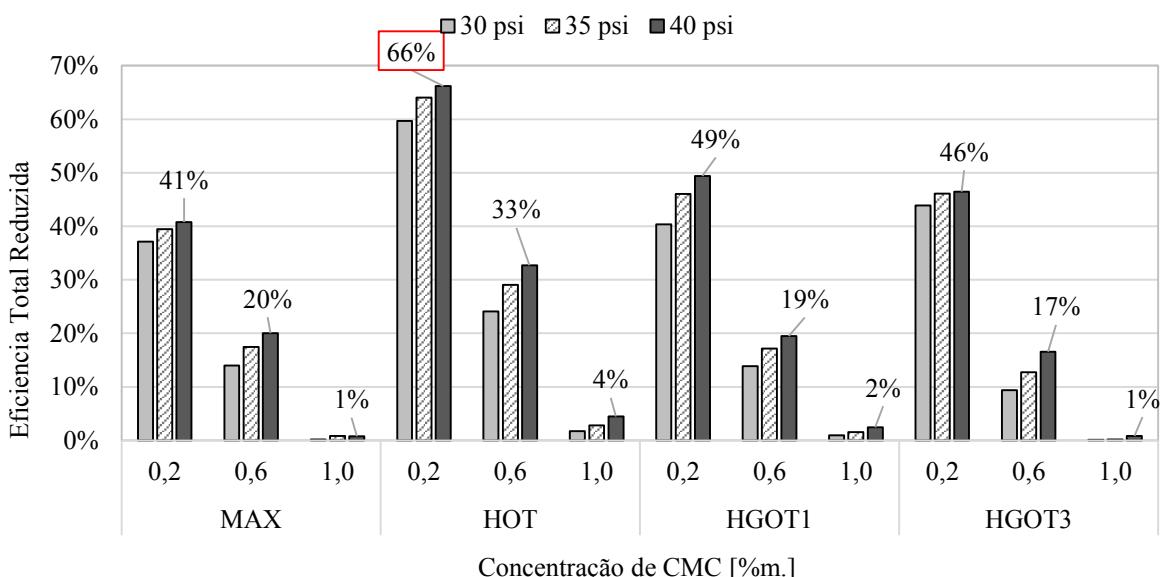


Figura 4.2-7 – Efeito da concentração de CMC na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Nos casos em que C_{CMC} foi estabelecida em 1,0%m. os valores de razão de líquido (R_L) estiveram muito próximos aos valores de Eficiência Total (η). Dessa forma, ao calcular a Eficiência Total Reduzida (η') foram obtidos valores bem próximos de zero, como pode ser verificado na Figura 4.2-7, ou seja, nessa condição os equipamentos trabalharam apenas como divisores de corrente.

Com base nos resultados de Eficiência Total Reduzida (η'), expressos na Figura 4.2-7, pode-se classificar, dentre os hidrociclos estudados, o equipamento HOT como sendo o de maior eficiência centrífuga ao operar com suspensão contendo 5,5% de sólidos e C_{CMC} de até 0,6%m. Considerando os resultados obtidos a 40 psi, C_{CMC} de 0,2%m, os equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 obtiveram η' de 41%, 66%, 49% e 46%, respectivamente.

A adição de CMC na suspensão prejudicou de forma intensa a Eficiência Total Reduzida. Conforme Figura 4.2-7, houve redução de 50 a 60% na Eficiência Reduzida ao modificar a C_{CMC} de 0,2%m. para 0,6%m, que em outras palavras representa a modificação da reologia do fluido com índice de comportamento, n , de aproximadamente 0,99 para n de 0,76. Ainda, observou-se que a intensidade da força centrífuga atuante na separação por hidrociclonagem foi quase nula quando o fluido de trabalho apresentava índice de comportamento (n) de aproximadamente 0,48 ($C_{CMC} = 1,0\%$ m.). Mais uma vez foi possível observar o intenso efeito da reologia do fluido na eficiência de separação por hidrociclonagem. As velocidades dos vórtices são muito diminuídas que explica a diminuição do número de Euler e a drástica redução na eficiência de separação de partículas.

4.2.4. Diâmetro de Corte

Para verificar o quanto a adição de CMC ao fluido de trabalho prejudicou a eficiência de coleta de finos dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 tem-se a Figura 4.2-8 e a Figura 4.2-9. Nestas são apresentados os respectivos resultados de Diâmetro de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}') obtidos com a variação da queda de pressão ($-\Delta P$) e da concentração de CMC (C_{CMC}) de 0,2%m. a 1,0%m.

De acordo com a Figura 4.2-8, o Diâmetro de Corte dos hidrociclos aumentou com o acréscimo da viscosidade aparente da suspensão. Tem-se que o d_{50} do equipamento MAX esteve entre 26,2 e 86,2 μm , do HOT entre 13,0 e 53,4 μm , do HGOT1 entre 10,9 e 25,6 μm e do HGOT3 entre 24,1 e 94,4, a depender da queda de pressão e da C_{CMC} . De acordo com os patamares alcançados, para a condição de maior viscosidade ($C_{CMC} = 1,0\%$ m.), o equipamento HGOT1 é capaz de coletar no *underflow* partículas mais finas que os demais equipamentos.

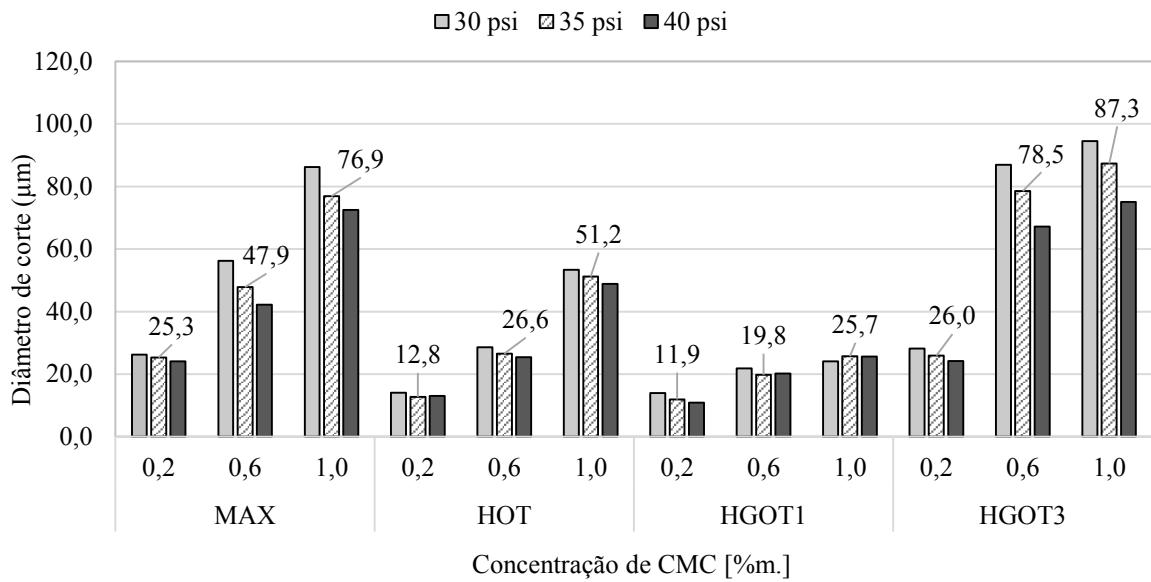


Figura 4.2-8 – Efeito concentração de CMC no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

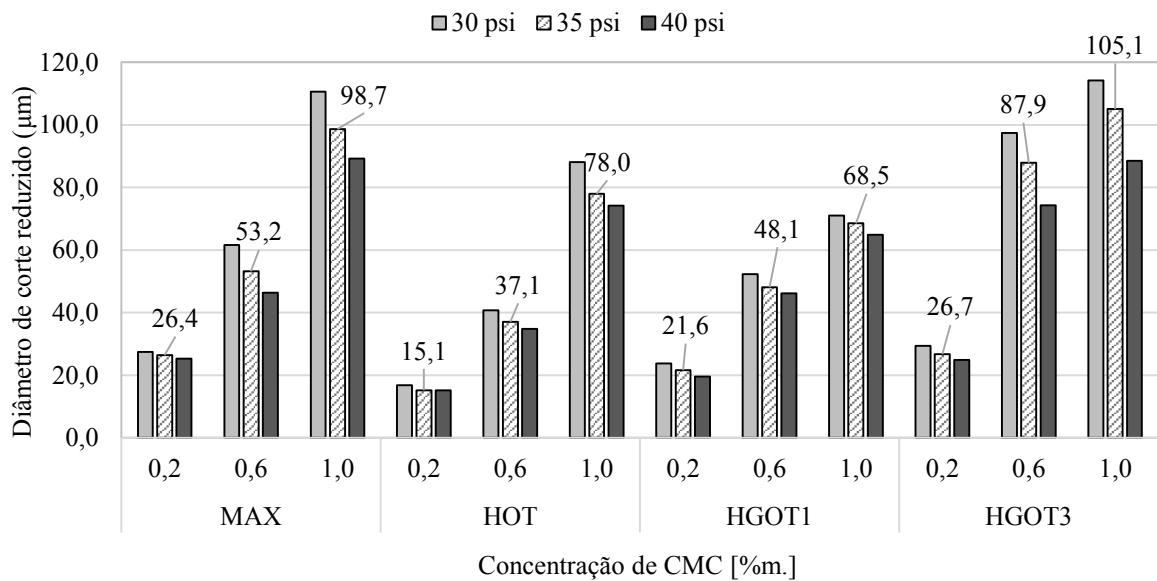


Figura 4.2-9 – Efeito da concentração de CMC no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Considerando apenas os resultados referentes à coleta de partículas pela ação da força centrífuga, têm-se através da Figura 4.2-9 os valores de Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}'). Ao comparar os valores de Diâmetro de Corte (d_{50}) aos valores de Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}') numa mesma condição operacional, nota-se que para a concentração de CMC de 0,2%m. houve menor diferença entre eles. Quanto maior o percentual de CMC adicionado, maior é o caráter pseudoplástico do fluido e maior sua viscosidade efetiva, o que influencia na diminuição

da velocidade tangencial. A velocidade tangencial é a principal responsável pela coleta de partículas. Se há uma diminuição na força centrífuga, por consequência menor é a eficiência de coleta.

4.3. INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE *UNDERFLOW*

Embora o diâmetro de *underflow* (D_U) seja uma variável geométrica, alterações no seu tamanho são capazes de estabelecer diferentes regimes de operação em um hidrociclone. Seu correto dimensionamento é fundamental para o sucesso do processo de hidrociclonagem, pois a aplicação de uma maior ou menor resistência ao escoamento altera a fluidodinâmica do hidrociclone. Todavia, a intensidade deste efeito pode ser diferente em diferentes equipamentos e condições operacionais.

Portanto, nesta seção serão abordados os resultados experimentais referentes aos testes 21, 27 e 22, que correlacionam a variável codificada X_3 , referente ao diâmetro de *underflow* (D_U), nos respectivos níveis (-2), (0) e (+2). Neste caso, as variáveis X_1 , X_2 e X_4 permanecem no nível central para que apenas a influência do diâmetro de *underflow* no desempenho de hidrociclonagem dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 fosse avaliada na faixa de queda de pressão de 30 a 40 psi. Portanto, a C_{VA} permanece fixa em 5,5%v., C_{CMC} em 0,6%m. e o comprimento de *vortex finder* (ℓ) de 44 mm, 22 mm, 41 mm e 68 mm para os respectivos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Nesta análise, a característica reológica do fluido contendo 5,5%v. de sólidos e 0,6%m. de CMC permanece constante e corresponde à curva B representada na Figura 4.1-1 como também na Figura 4.2-1. De acordo com o ajuste ao modelo de Power-Law, esta formulação possui característica pseudoplástica com n , índice de comportamento, igual a $0,764 \pm 0,002$.

Os itens que seguem analisam o consumo energético, a capacidade de espessamento e eficiência dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 frente à alteração do diâmetro de *underflow* de 3 a 7 mm em suspensão pseudoplástica.

4.3.1. Capacidade de Processamento e Consumo Energético

A capacidade de processamento dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 com a alteração do diâmetro de *underflow* (D_U) de 3 para 5 e 7 mm pode ser visualizada através da Figura 4.3-1.

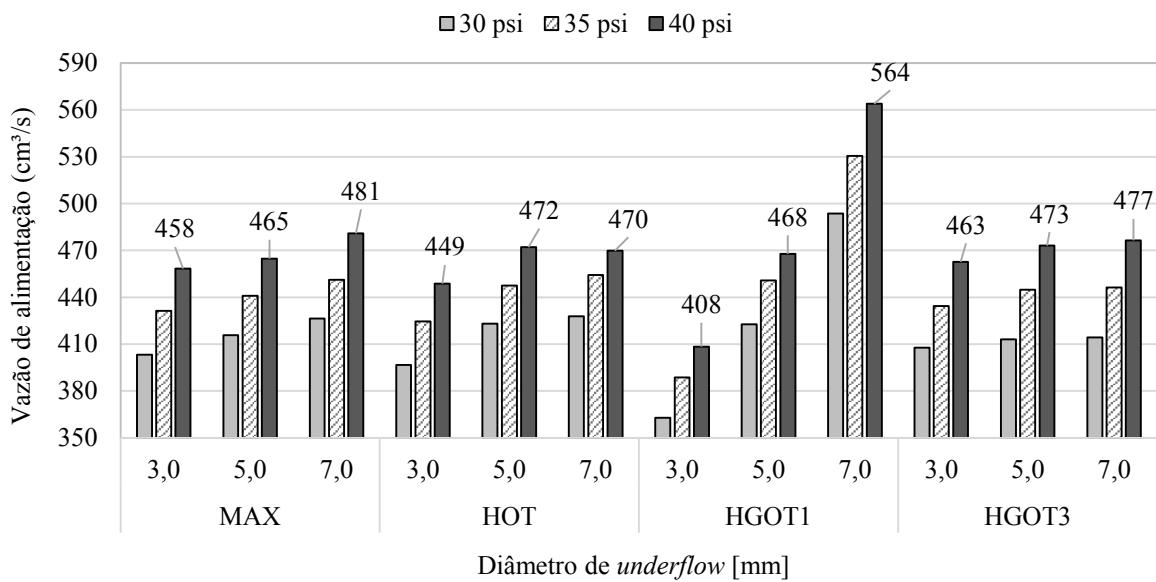


Figura 4.3-1 – Efeito do diâmetro de *underflow* na vazão de alimentação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

O aumento da abertura do orifício de *underflow* diminui a resistência ao escoamento e permite que um maior volume de fluido seja alimentado nos hidrociclos, como verificado experimentalmente e mostrado na Figura 4.3-1. Também é possível visualizar o efeito positivo dos acréscimos em $-\Delta P$ em Q_A . Tem-se que o aumento da capacidade de processamento com a mudança em D_U de 3 para 7 mm foi mais pronunciado para o equipamento HGOT1, consistindo em um aumento de cerca de 37%. Para os demais equipamentos, o respectivo acréscimo em Q_A foi de até 5%.

O hidrociclo HGOT1 possui diâmetro de *overflow* de 4,8 mm enquanto os hidrociclos MAX, HOT e HGOT3 possuem diâmetro de *overflow* de 10,5 mm. A combinação de duas grandes restrições ao escoamento, no *underflow* com D_U de 3 mm e no *overflow* com D_o de 4,8 mm, restringiu a capacidade de processamento do HGOT1. Em contrapartida, ao utilizar o diâmetro de *underflow* de 7 mm o HGOT1 exibiu a maior vazão de alimentação conforme a Figura 4.3-1. A influência do diâmetro de *underflow* na capacidade de processamento dos hidrociclos tem relação direta com a geometria do equipamento.

De acordo com os resultados de Q_A obtidos em suspensão pseudoplástica com C_{VA} de 5,5%v de sólidos, o equipamento MAX apresentou máxima vazão de 481 cm³/s a 40 psi utilizando D_U de 7 mm, e mínima vazão de 403 cm³/s a 30 psi e D_U de 3 mm. Nestas mesmas condições, o hidrociclo HOT apresentou Q_A máxima de 470 cm³/s e mínima de 397 cm³/s, o HGOT1 Q_A máxima de 564 cm³/s e mínima de 363 cm³/s, e HGOT3 Q_A máxima de 477 cm³/s e mínima de 408 cm³/s.

Logo, quanto maior o diâmetro de *underflow* (D_U), menor foi o consumo energético do equipamento e, por consequência, menor o número de Euler, assim como ilustrado na Figura 4.3-2. Esta mostra o efeito da diminuição do número de Euler (Eu) com o aumento do diâmetro de *underflow* de 3 mm para 5 mm e para 7 mm dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 à queda de pressão de 30, 35 e 40 psi.

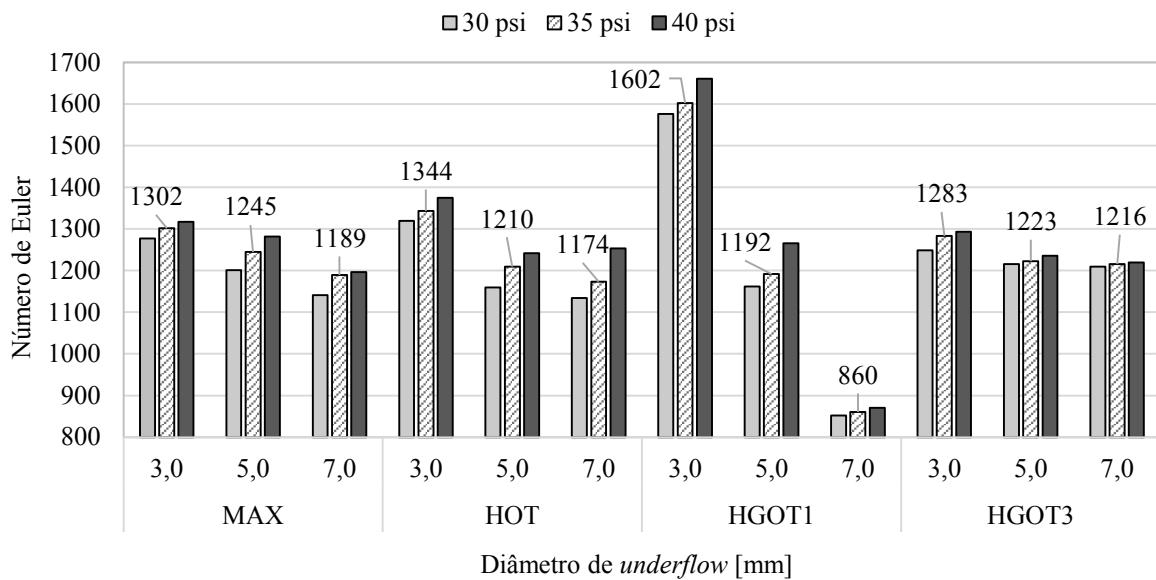


Figura 4.3-2 – Efeito do diâmetro de *underflow* no número de Euler dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Outra vez é visto que o equipamento HGOT1 foi o que sofreu maior influência do diâmetro de *underflow* no consumo energético. Tomando por base os resultados expressos na Figura 4.3-2 a 35 psi, o número de Euler passou de 1602 para 1192 ao modificar o diâmetro de *underflow* (D_U) de 3 mm para 5 mm, e para 860 quando operou com D_U de 7 mm. Para os demais equipamentos, ao passar do diâmetro de 3 mm para 7 mm houve, em média, uma diminuição de aproximadamente 9%, 12%, 5% no número de Euler dos respectivos hidrociclos MAX, HOT e HGOT3.

Em suma, os hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, operando com C_{VA} de 5,5%v. de sólidos e fluido pseudoplástico tiveram sua capacidade de processamento favorecida com o aumento do diâmetro de *underflow*. Para estas geometrias, a restrição ao escoamento no *underflow* aumentou a perda de carga, levando a uma menor vazão de entrada. Ainda, tem-se que a Q_A estabelecida pela geometria HGOT1 foi influenciada, sobremaneira, com a alteração em D_U . Existem casos na literatura em que a diminuição do diâmetro de *underflow* favorece a capacidade de processamento (GONÇALVES, 2016; ASCENDINO, 2019), por esta razão a

análise dos efeitos da alteração do diâmetro de *underflow* (D_U) no desempenho de cada geometria é importante. Assim, pode-se inferir que a geometria do equipamento tem fundamental influência nas respostas obtidas e na intensidade do efeito que determinada condição exerce em seu desempenho.

4.3.2. Capacidade de Espessamento

A avaliação da capacidade de espessamento dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 em relação à alteração do diâmetro de *underflow* (D_U), está representada pela Figura 4.3-3, através da resposta razão de líquido (R_L), e pela concentração de sólidos presente no *underflow* (C_{VU}) representada pela Figura 4.3-4. Nestas estão apresentados os resultados obtidos com os equipamentos operando a 30, 35 e 40 psi, mantendo o percentual de sólidos na alimentação em 5,5%v. e a concentração de viscosificante em 0,6%m.

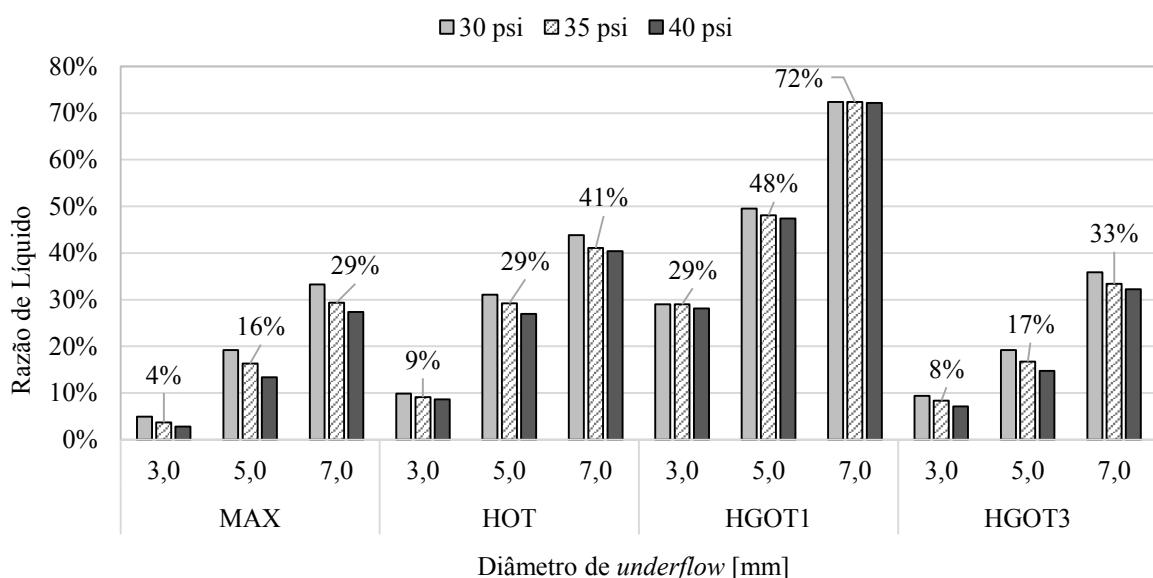


Figura 4.3-3 – Efeito do diâmetro de *underflow* na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Ao analisar os resultados de razão de líquido (R_L) através da Figura 4.3-3, pode-se observar o quanto o diâmetro de *underflow* (D_U) influenciou esta resposta. Incrementos na abertura do orifício de *underflow* contribuem para saída de líquido pelo *underflow*. Um decréscimo de apenas 2 mm em D_U é capaz de reduzir a razão de líquido do hidrociclo MAX, a 35 psi de 29% ($D_U = 7$ mm) para 16% ($D_U = 5$ mm) e ainda para 5% ($D_U = 3$ mm). Para os demais hidrociclos, HOT, HGOT1 e HGOT3, o mínimo de R_L alcançado a 35 psi foi de, respectivamente, 9%, 29% e 8% usando diâmetro de *underflow* de 3 mm.

Ainda, tem-se que o crescente fornecimento de energia ao sistema reduz a razão de líquido por aumentar a força centrífuga disponível para separar partículas, conduzindo-as à parede do hidrociclone e, então, ao *underflow*. A parte líquida que segue o fluxo descendente junto com as partículas, ao encontrar a restrição ao escoamento, tende a seguir o vórtice ascendente e sair pelo *overflow*.

Portanto, quanto menor o diâmetro de *underflow* (D_U) e maior a queda de pressão ($-\Delta P$) menor é a razão de líquido (R_L) e mais concentrado sai o produto no *underflow*. A Figura 4.3-4 ilustra este comportamento ao apresentar os resultados de concentração do *underflow* (C_{VU}) para os hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 em diferentes níveis de queda de pressão e diâmetro de *underflow*.

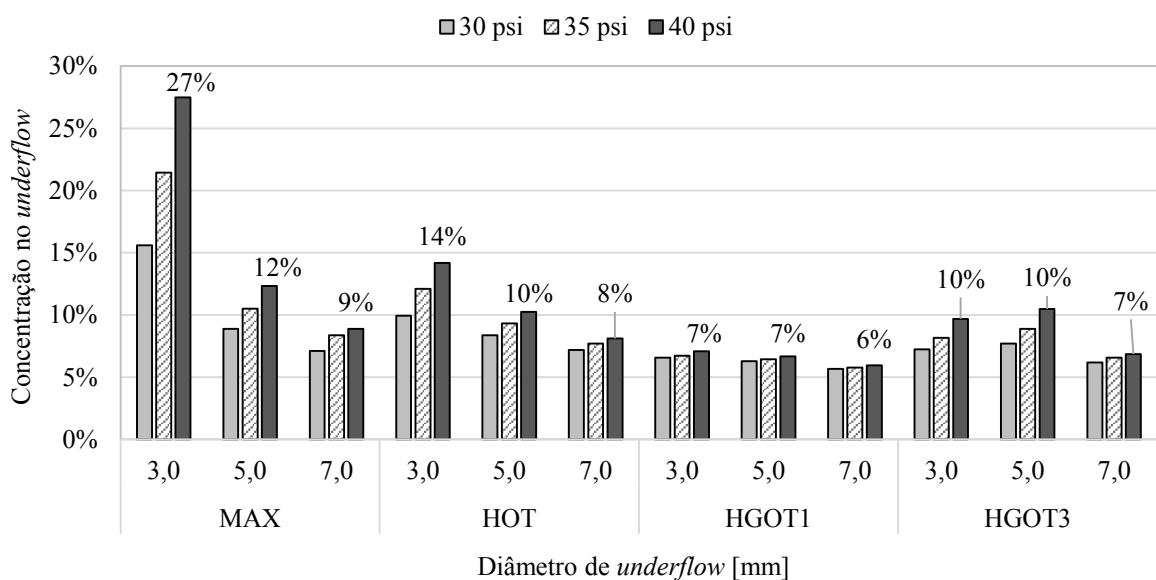


Figura 4.3-4 – Efeito do diâmetro de *underflow* na concentração de *underflow* dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

A razão de líquido reporta o percentual de líquido que é descarregado no *underflow*, no entanto, os resultados de C_{VU} deixam de forma explícita o potencial de espessamento dos hidrociclos. Conforme a Figura 4.3-4, ao operar com fluido pseudoplástico contendo 0,6%m de CMC, o hidrociclo MAX alcançou o melhor potencial de espessamento. A concentração da alimentação, inicialmente contendo 5,5%v. de sólidos, foi elevada a aproximadamente 27% pelo equipamento MAX operando com $-\Delta P$ de 40 psi. Para esta mesma queda de pressão, a máxima de concentração no *underflow* (C_{VU}) alcançada pelos demais equipamentos foi de 14% para o HOT, 7% para o HGOT1 e 10% para o HGOT3. Embora a redução em D_U tenha impactado de forma intensa a razão de líquido do hidrociclo HGOT1, sua capacidade de

espessamento se manteve baixa, como pode-se observar os valores de C_{VU} entre 6% e 7% para os diâmetros de *underflow* testados, o que pode-se explicar devido ao aumento de eficiência de coleta dos sólidos na mesma proporção, considerado a seguir.

4.3.3. Eficiência de separação

A Figura 4.3-5 apresenta os resultados de Eficiência Total (η) dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 em função do diâmetro de *underflow* (D_U) dos equipamentos e queda de pressão ($-\Delta P$). Estes resultados foram obtidos utilizando um fluido pseudoplástico como suspensão de trabalho contendo 0,6%m. de CMC e 5,5%v. de sólidos.

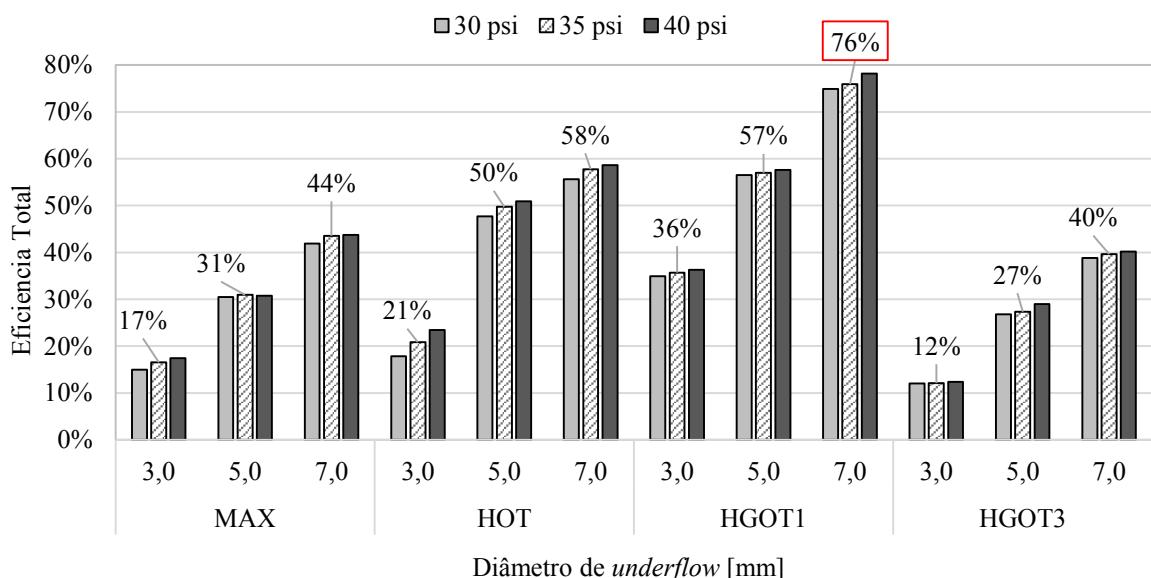


Figura 4.3-5 – Efeito do diâmetro de *underflow* na Eficiência Total dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Novamente, observou-se que a queda de pressão resultou em acréscimos na eficiência de separação. Todavia, diferentemente da capacidade de espessamento, a eficiência de separação é beneficiada com o aumento do diâmetro de *underflow*. Pode-se notar através da Figura 4.3-5 que a Eficiência Total do hidrociclo MAX a 35 psi passou de 17% para 44% ao alterar o D_U de 3 mm para 7 mm. Nesta mesma situação, o hidrociclo HOT elevou a η de 21% para 58%, enquanto o HGOT1 passou de 36% para 76% e o HGOT3 de 12% para 40%. O aumento da abertura inferior direciona uma maior quantidade de líquido ao *underflow*, evidenciado pelo aumento de R_L , e mais partículas saem por esta corrente arrastadas pelo fluido o que eleva a coleta de sólidos.

Ao escolher o diâmetro de *underflow* para determinada operação, deve-se levar em consideração tanto o efeito sobre a eficiência de separação de partículas, como também o efeito abordado no item 4.3.2 sobre a capacidade de espessamento. Tem-se que para o hidrociclone MAX o acréscimo da Eficiência Total com o aumento de D_U foi acompanhado pelo intenso decréscimo do potencial de espessamento. No entanto, ao observar o desempenho de separação do HGOT1, tem-se que o aumento do orifício de *underflow* favoreceu, sobremaneira, sua Eficiência Total sem alterar o potencial de espessamento. Sabe-se que o equipamento HGOT1 foi otimizado com o intuito de maximizar a eficiência de coleta, portanto, o aumento de D_U é favorável, no entanto para os equipamentos MAX e HOT, otimizados para concentrar suspensões, tem-se que o menor diâmetro de *underflow* é preferível.

O efeito de D_U sobre a Eficiência Total (η) e razão de líquido (R_L) de cada um dos equipamentos se pronunciou com intensidade diferente em cada um dos equipamentos. Para verificar o quanto a força centrífuga é alterada com a modificação na restrição ao escoamento do *underflow*, tem-se a resposta Eficiência Total Reduzida (η'). A Figura 4.3-6 exibe os resultados de Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico em concentração de sólidos não diluída, C_{VA} igual a 5,5%v., usando os diâmetros de *underflow* de 3, 5 e 7 mm.

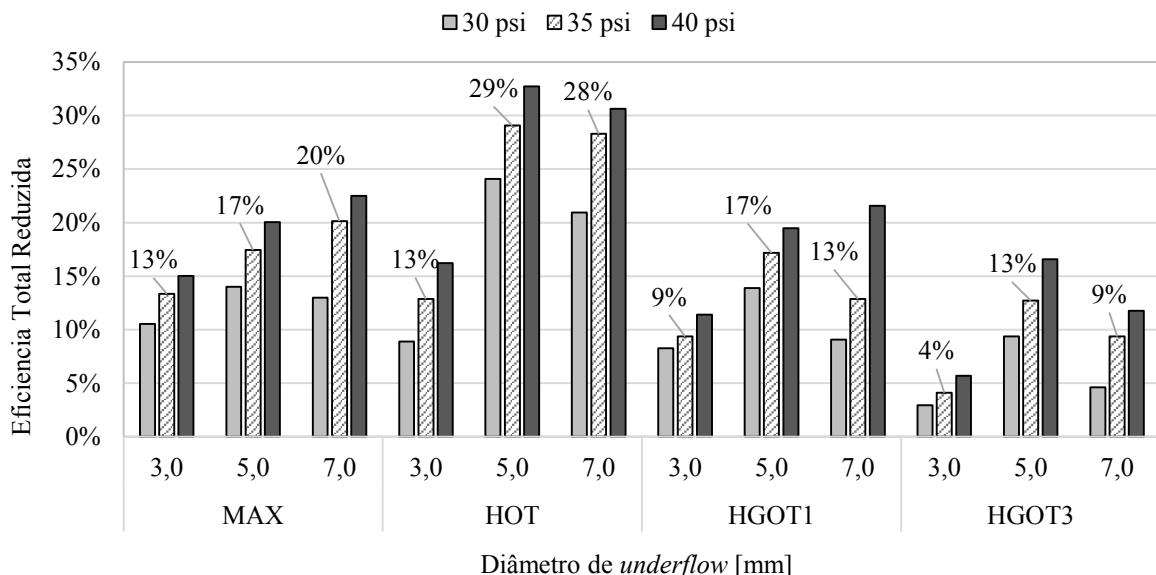


Figura 4.3-6 – Efeito do diâmetro de *underflow* na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

É evidente o aumento da Eficiência Total Reduzida (η') com o aumento da queda de pressão ($-\Delta P$) e com o diâmetro de *underflow* (D_U). Com base na Figura 4.3-6, pode-se verificar

que ao alterar o diâmetro de *underflow* de 3 mm para 5 mm houve um acréscimo médio de cerca de 31% na η' do MAX. Para o equipamento HOT, a 35 psi, η' passou de 13% para 29%, no HGOT1 η' passou de 9% para 17% e no HGOT3 de 4% para 13%. Todavia, o seguinte acréscimo em D_U de 5 para 7 mm não intensificou a separação por centrifugação, e em alguns equipamentos η' até mesmo diminuiu com o acréscimo em D_U . Assim, para cada equipamento deve existir um diâmetro que maximize a Eficiência Total Reduzida, ou seja, que beneficie a separação de partículas, e, acima deste D_U a descarga de fluido pelo *underflow* cresce apenas pelo efeito de divisão de fluxo.

4.3.4. Diâmetro de Corte

Quanto à influência do diâmetro de *underflow* sobre a eficiência de coleta de finos dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 operando com fluido pseudoplástico com 5,5%v. de sólidos, têm-se as respostas Diâmetro de Corte (d_{50}) e o Diâmetro de Corte Reduzido ($d_{50'}$), mostradas respectivamente através da Figura 4.3-7 e da Figura 4.3-8.

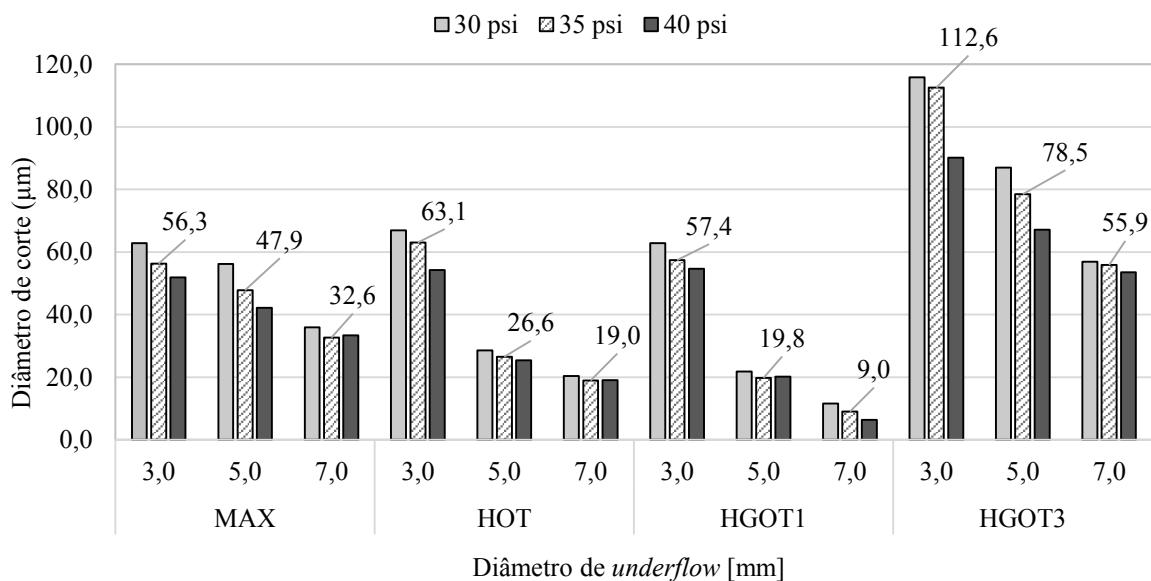


Figura 4.3-7 – Efeito do diâmetro de *underflow* no Diâmetro de Corte dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Ao observar a Figura 4.3-7, nota-se que houve uma redução expressiva no diâmetro de corte (d_{50}) dos equipamentos com o aumento do diâmetro de *underflow* (D_U). Portanto, assim como o diâmetro de *underflow* favoreceu a Eficiência Total, como discutido anteriormente no item a 4.3.3, a eficiência de coleta de finos foi favorecida com o aumento de D_U . Considerando

os resultados obtidos a 35 psi, ao modificar o diâmetro de *underflow* de 3 para 7 mm o hidrociclone MAX alterou o d_{50} de 56,3 μm para 32,6 μm , o HOT de 63,1 μm para 19,0 μm , o HGOT1 de 54,7 μm para 9,0 μm e o HGOT3 de 112,6 para 55,9. Neste cenário, o equipamento HGOT3 foi o que teve o maior escape de finos pelo *overflow*, e no outro extremo o HGOT1 com a melhor coleta de finos. Panorama coerente, haja vista o hidrociclone HGOT1 ter sido concebido para tarefas classificadoras e o HGOT3 para funções de concentração.

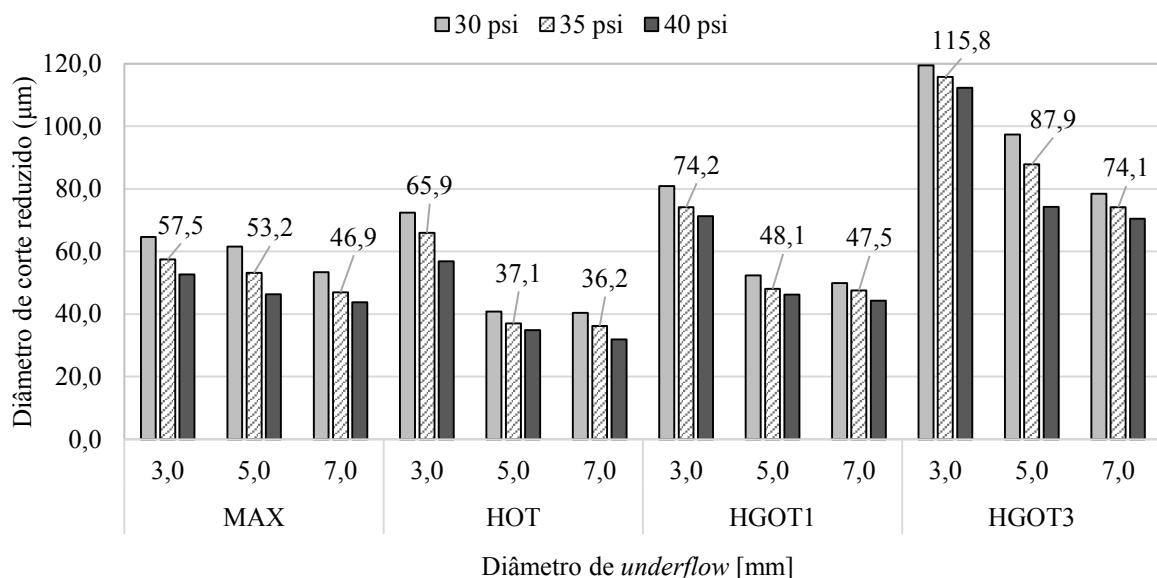


Figura 4.3-8 – Efeito do diâmetro de *underflow* no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Em relação ao efeito de D_U no Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}'), mostrado na Figura 4.3-8, ao utilizar o diâmetro de *underflow* de 3 mm, os resultados de d_{50}' foram ligeiramente superiores aos resultados d_{50} (Figura 4.3-7), todavia para os testes conduzidos com D_U de 7 mm, esta diferença foi maior porque a razão de líquido cresceu com o aumento de D_U .

Deste modo, ao aumentar a resistência ao escoamento, diminuindo o D_U , partículas mais grossas tentam a ser descarregadas pelo *overflow* e o Diâmetro de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}') se tornam maiores.

4.4. INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE VORTEX FINDER

O duto de *vortex finder* tem a principal função de conduzir o fluido clarificado em movimento ascendente até a descarga no orifício de *overflow*. Seu correto dimensionamento é

capaz de evitar fenômenos indesejáveis como o curto circuito de partículas e ainda influenciar na coleta de finos no *underflow*. Diversos autores têm verificado o quanto a alteração em sua geometria tem influência no desempenho de hidrociclonagem (CUI *et al.*, 2017; HWANG e CHOU, 2017; KYRIAKIDIS *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2015; TANG *et al.*, 2015; VAKAMALLA *et al.*, 2017; VIEIRA e BARROZO, 2014).

Por se tratar de um acessório de grande importância, a determinação do comprimento ótimo deve ser feita experimentalmente, pois depende de condições operacionais em vigor como a concentração de sólidos (GHODRAT *et al.*, 2014a) e distribuição do tamanho das partículas na alimentação (MARTÍNEZ *et al.*, 2008). Dessa forma, é de se esperar que a alteração da viscosidade do fluido também influencie na escolha do duto de *vortex finder*. Assim, o presente trabalho vem investigar experimentalmente a influência do comprimento deste acessório no desempenho de diferentes geometrias de hidrociclos operando com fluido pseudoplástico.

Para tanto, nesta seção serão analisados os resultados de desempenho dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, obtidos nos testes 23, 27 e 24, nos quais o comprimento de *vortex finder* pertence aos níveis (-2), (0) e (+2) da variável codificada X_4 . As demais variáveis X_1 , X_2 e X_3 são mantidas no nível zero, e correspondem a C_{VA} de 5,5%v., C_{CMC} de 0,6%m. e diâmetro de *underflow* de 5 mm. Assim, nesta análise a característica da suspensão é mantida constante e está representada pelo perfil reológico da curva B da Figura 4.1-1, também exibida na Figura 4.2-1. Como abordado nas seções 4.1 a 4.3, os testes 23, 27 e 24 foram conduzidos não somente no nível zero da variável X_5 , $-\Delta P$ igual a 35 psi, mas também a 30 e 40 psi.

Cada um dos equipamentos possui valores diferentes de comprimento de *vortex finder*, que representados pelos os níveis codificados (-2), (0) e (+2) da variável X_4 correspondem respectivamente a 12, 44 e 76 mm para o hidrociclo MAX; 12, 22 e 32 mm para o hidrociclo HOT; 12, 41 e 69 mm para o HGOT1; e 22, 68 e 114 mm para o HGOT3. O nível (+2) corresponde ao máximo comprimento possível de ℓ que não adentrasse a região cônica dos hidrociclos.

Assim, os itens que seguem avaliam o consumo energético, o potencial de espessamento e de separação de partículas dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, operando com fluido pseudoplástico e com dutos de *vortex finder* de comprimentos distintos.

4.4.1. Capacidade de Processamento e Consumo Energético

A Figura 4.4-1 exibe os resultados de vazão de fluido (Q_A) sendo alimentado nos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 com a alteração do comprimento de *vortex finder*

(ℓ) de cada equipamento em diferentes quedas de pressão ($-\Delta P$). Também, na Figura 4.4-2, tem-se o número de Euler dos respectivos equipamentos frente à mesma alteração em ℓ .

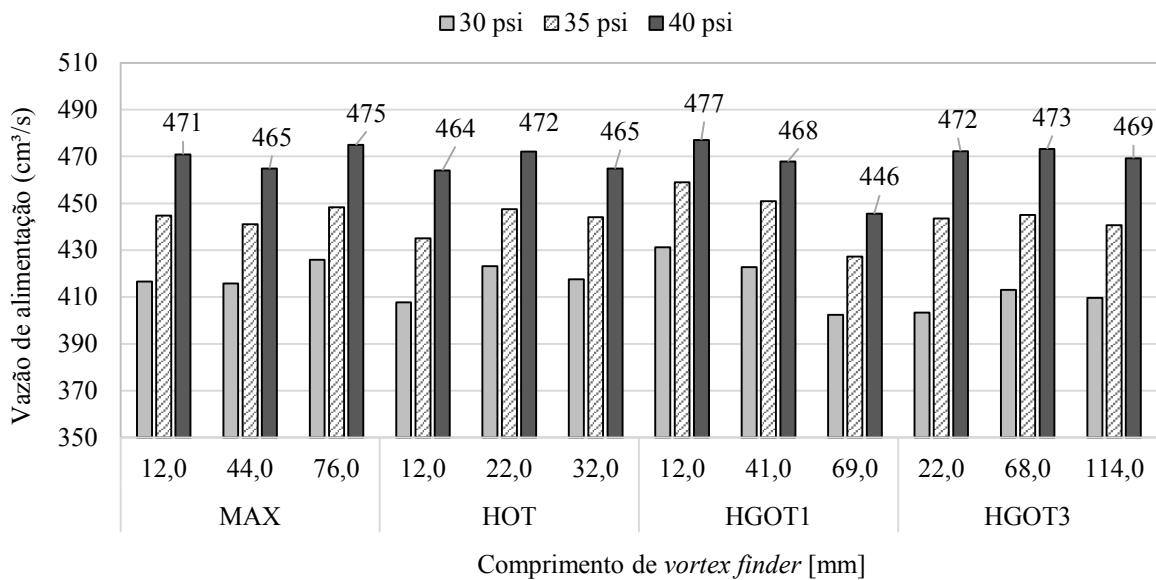


Figura 4.4-1 – Efeito do comprimento de *vortex finder* na vazão de alimentação dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

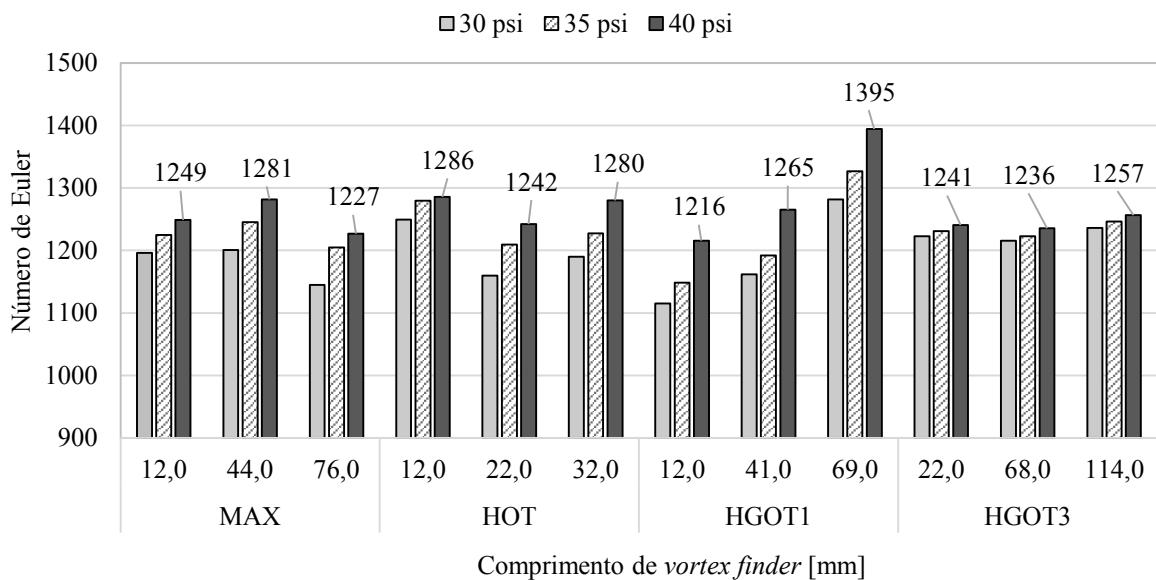


Figura 4.4-2 – Efeito do comprimento de *vortex finder* no número de Euler dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Ao observar a Figura 4.4-1, é possível perceber que a alteração da vazão (Q_A) com o comprimento de *vortex finder* (ℓ) é nitidamente menor que o efeito gerado pelo aumento da queda de pressão ($-\Delta P$). Também tem-se que o perfil da resposta Q_A em função de ℓ se repete para cada nível de $-\Delta P$. Ainda, observando os resultados referentes aos hidrociclones MAX,

HOT e HGOT3, a vazão flutuou cerca de 2% em torno de um valor médio com a alteração no comprimento ℓ , e, apenas para o HGOT1 notou-se um aumento de aproximadamente 6% em Q_A ao reduzir o comprimento de *vortex finder* de 69 para 12 mm.

De acordo com o observado quanto aos resultados de capacidade de processamento, o número de Euler (Eu) dos equipamentos MAX, HOT, HGOT3, operando com 5,5%v. de sólidos e fluido pseudoplástico, foi alterado de forma ínfima pelo comprimento de *vortex finder*, como mostrado através da Figura 4.4-1 e da Figura 4.4-2. Apenas o hidrociclone HGOT1 apresentou diferença significativa no consumo energético a depender de ℓ . Neste caso, o maior comprimento de ℓ , igual a 69 mm, dificultou a entrada de fluido e elevou em aproximadamente 10% o número de Euler.

4.4.2. Capacidade de Espessamento

O efeito do comprimento de *vortex finder* (ℓ) em relação à capacidade de espessamento pode ser analisado através das respostas razão de líquido (R_L) e concentração no *underflow* (C_{RV}), expressas através da Figura 4.4-3 e da Figura 4.4-4, respectivamente.

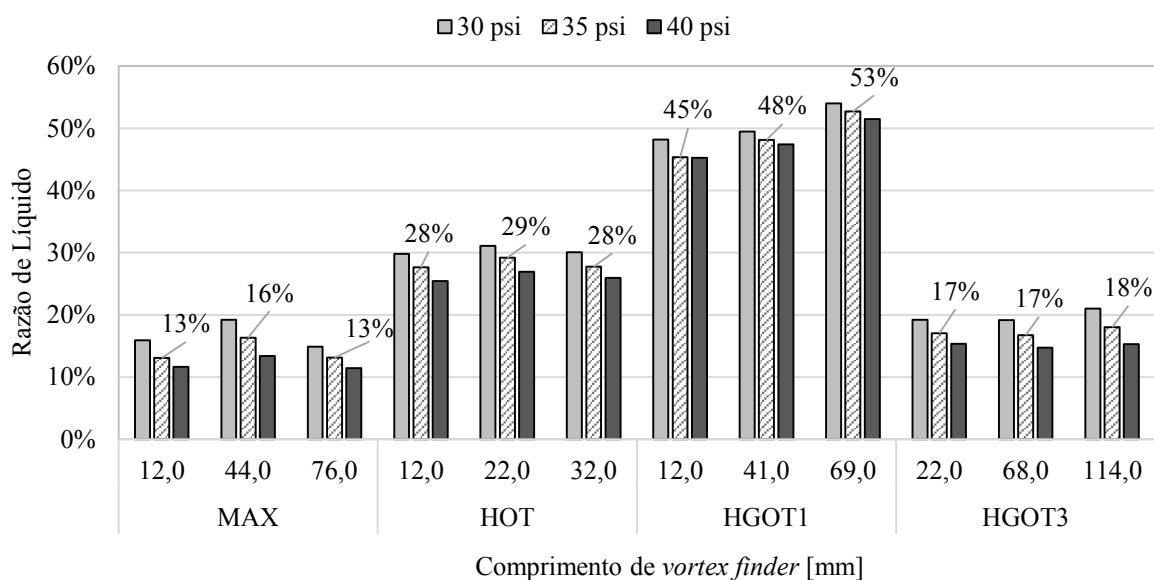


Figura 4.4-3 – Efeito do comprimento de *vortex finder* na Razão de Líquido dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Analizando os resultados exibidos na Figura 4.4-3, nota-se que, para a suspensão de trabalho contendo 5,5%v. de sólidos e 0,6%m de CMC, o hidrociclone MAX apresentou um maior valor de razão de líquido usando o comprimento de ℓ intermediário, igual a 44 mm. No equipamento HOT, em virtude da pequena diferença entre os níveis de ℓ , não houve grande

alteração em R_L , permanecendo em um valor médio de 28%. A razão de líquido do hidrociclone HGOT3 também variou pouco com o comprimento de ℓ , alcançando em média 17%.

Para o hidrociclone HGOT1, houve um acréscimo relativo de 17% em R_L ao modificar o comprimento de *vortex finder* de 12 mm ($X_4 = -2$) para 69 mm ($X_4 = +2$). É interessante observar que o diâmetro de *overflow* do hidrociclone HGOT1 ($D_O = 4,8$ mm) é o menor comparado aos demais, e pode ter influenciado nesse comportamento, já que a maior restrição ao escoamento no *overflow* somada ao longo comprimento de *vortex finder* contribuiu para uma maior saída de fluido pelo *underflow*.

Tem-se que decréscimos em R_L retornam correntes de *underflow* mais concentradas. De acordo com a Figura 4.4-4, nos casos em que a razão de líquido foi diminuída pela alteração em ℓ , o acréscimo da concentração do *underflow* (C_{VU}) foi de no máximo de 2% de sólidos no hidrociclone MAX. Embora o efeito do comprimento de *vortex finder* (ℓ) tenha sido pequeno nas respostas de R_L e C_{VU} , nas condições operacionais de $C_{VA} = 5,5\%$ v. e $C_{CMC} = 0,6\%$ v., a elevação da concentração de sólidos em apenas alguns percentuais pode fazer a diferença em determinadas operações em que o principal interesse é concentrar a suspensão alimentada.

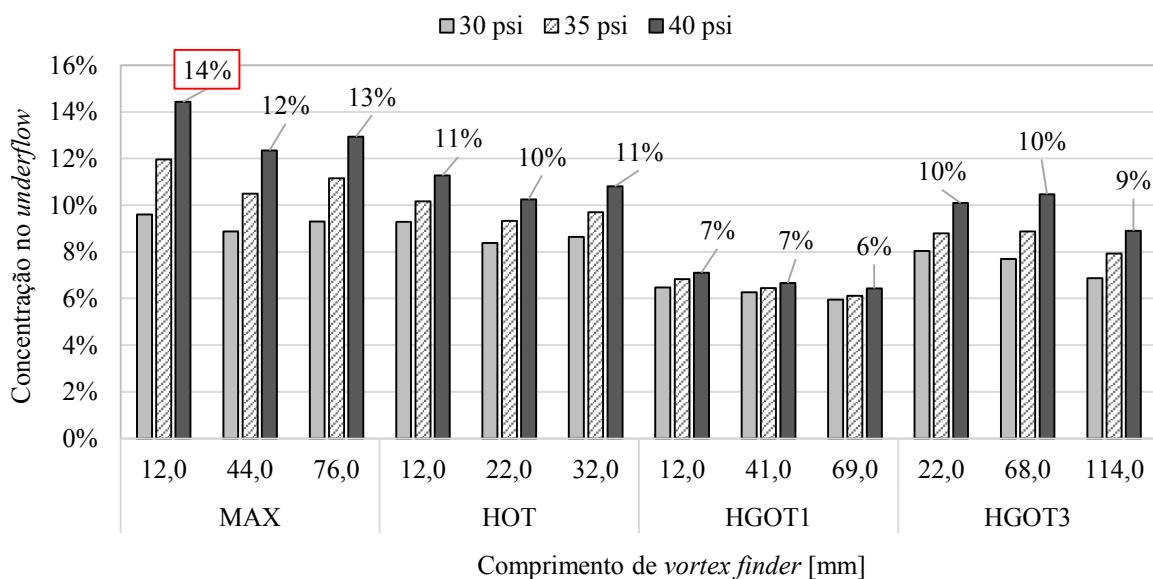


Figura 4.4-4 – Efeito do comprimento de *vortex finder* na concentração de *underflow* dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Ainda, é possível que o efeito de ℓ seja mais expressivo na capacidade de processamento e espessamento dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 em outras condições de C_{VA} e C_{CMC} . Na seção de número 4.5, analisam-se, o efeito do comprimento de *vortex finder* (ℓ) e sua interação com outros fatores.

4.4.3. Eficiência de separação

Para avaliar a influência do comprimento de *vortex finder* (ℓ) no potencial de separação dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 tem-se a Figura 4.4-5, que exibe os resultados de Eficiência Total (η), e a Figura 4.4-6, que traz os resultados de Eficiência Total Reduzida (η') obtidos nos testes 23, 27 e 24.

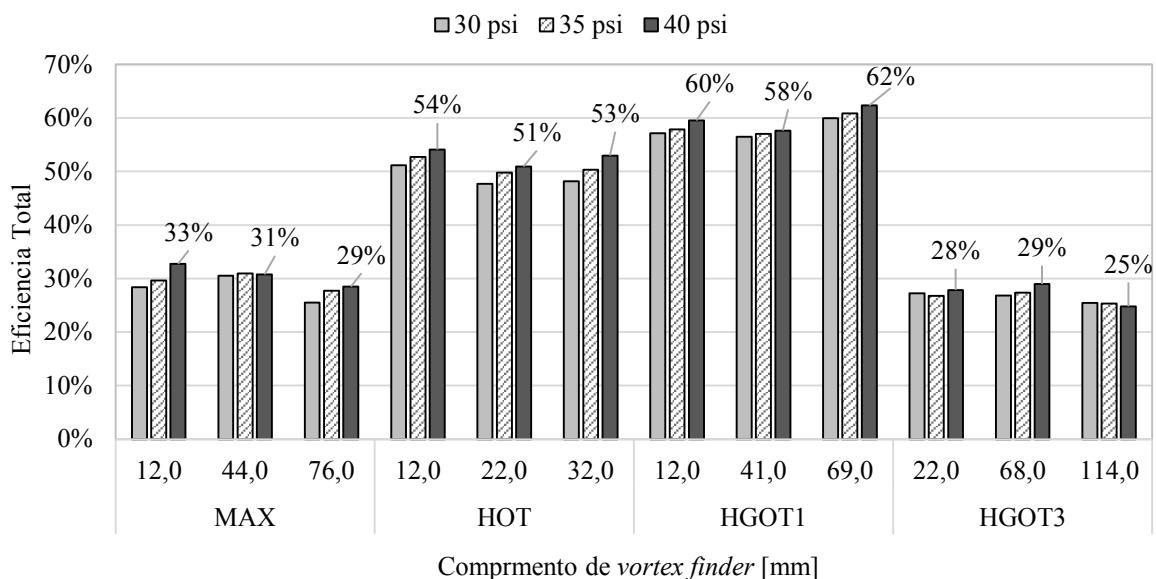


Figura 4.4-5 – Efeito do comprimento de *vortex finder* na Eficiência Total dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

Ao trabalhar com a suspensão contendo 5,5%v. de sólidos e 0,6%m. de CMC, referente à análise desta seção, a alteração no comprimento de *vortex finder* (ℓ) dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 pouco influenciou a Eficiência Total (η) dos mesmos, como pode ser visto através da Figura 4.4-5. Também quanto aos resultados de Eficiência Total Reduzida (η'), exibidos na Figura 4.4-6, houve uma proximidade entre eles com os diferentes comprimentos de *vortex finder* testados em cada hidrociclone.

De acordo com os resultados obtidos de η e η' , o hidrociclone MAX, majorou sua eficiência ao reduzir o comprimento de *vortex finder* de 76 para 12 mm, conferindo-lhe um aumento relativo de 14% em η e de 12% em η' . Para o hidrociclone HOT, não houve uma tendência clara, no entanto, a máxima eficiência alcançada também foi obtida utilizando o menor comprimento de *vortex finder*, de 12 mm. No hidrociclone HGOT3, a maior eficiência foi obtida no nível intermediário de X4, ao operar com *vortex finder* de 68 mm.

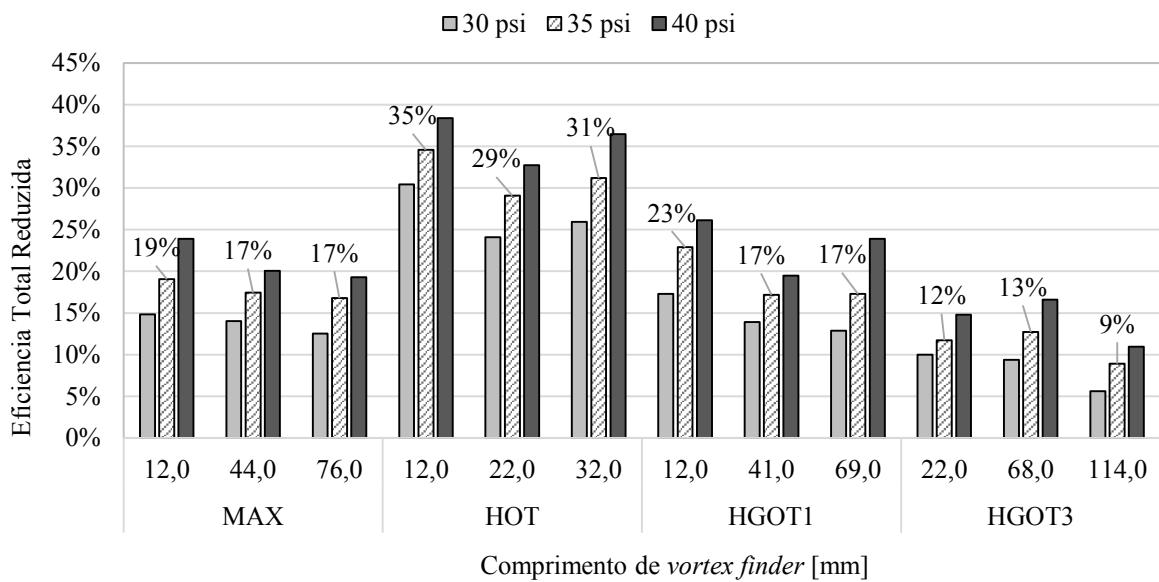


Figura 4.4-6 – Efeito do comprimento de *vortex finder* na Eficiência Total Reduzida dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

No hidrociclone HGOT1 o aumento de ℓ do menor para o maior nível, de 12 mm para 69 mm, elevou a Eficiência Total (η) em cerca de 3%. Tem-se que a razão de líquido aumentou com o aumento do comprimento de *vortex finder*, dessa forma mais partículas foram conduzidas para o *underflow* juntamente com a parcela de líquido referente a R_L . Todavia, ao observar os resultados de Eficiência Reduzida (η') é possível perceber que estes diminuíram com o aumento em ℓ , ou seja, a eficiência de separação por ação da força centrífuga foi prejudicada.

Tem-se na literatura que o aumento do comprimento de *vortex finder* diminui o efeito de migração de partículas do vórtice interno para o externo (ALMEIDA, 2008), e em se tratando de sistemas densos, pode até mesmo elevar a Eficiência Total de separação (GHODRAT *et al.*, 2014a). Na presente análise, considerando que a suspensão de trabalho não se encontrava em condições diluídas e que o fluido possuía caráter pseudoplástico, observou-se que a inserção de um longo duto de *overflow* nos hidrociclones estudados aumentou a perda de carga no equipamento modificando os perfis de velocidade tangencial do fluido, o que contribuiu para a minimização da Eficiência Total Reduzida.

Além disso, devido à alta viscosidade aparente do fluido de trabalho capaz de apassivar o movimento rotacional do fluido, como observado na seção que aborda a influência da concentração de CMC (seção 4.2), é de se imaginar que ao utilizar um longo *vortex finder* o fluido seja conduzido a uma região de separação em que a velocidade tangencial, responsável pela separação de partículas, seja muito baixa, o que reduz o potencial de separação de partículas pelos hidrociclones.

4.4.4. Diâmetro de Corte

Os resultados de Diâmetro de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido ($d_{50'}$), apresentados na Figura 4.4-7 e na Figura 4.4-8 respectivamente, analisam a influência do comprimento de *vortex finder* (ℓ) no desempenho de coleta de partículas dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. São apresentados resultados obtidos nas quedas de pressão de 30, 35 e 40 psi.

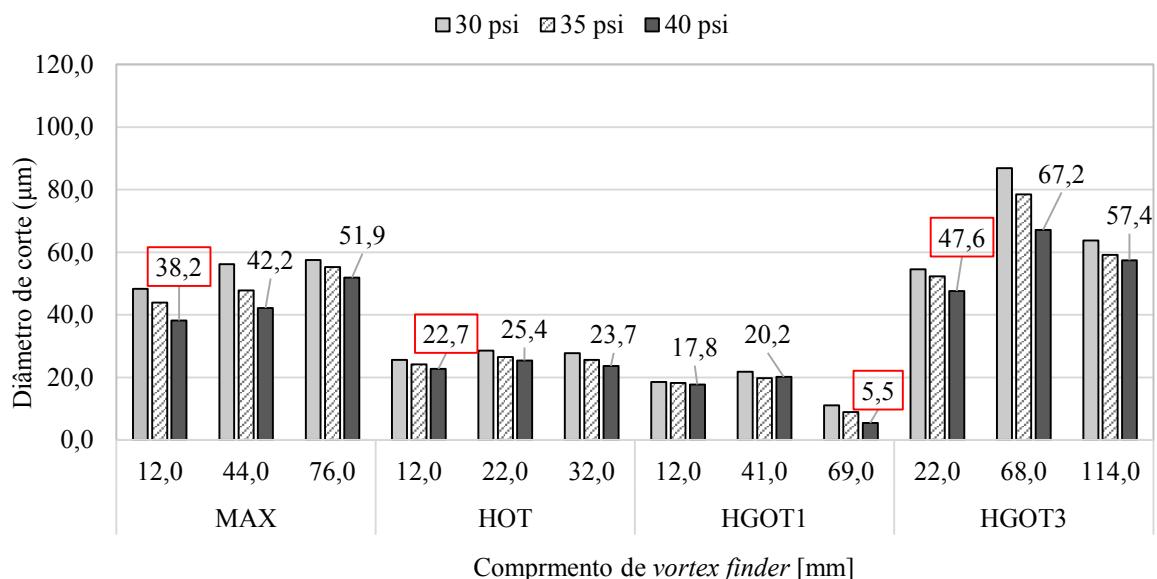


Figura 4.4-7 – Efeito do comprimento de *vortex finder* no Diâmetro de Corte dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

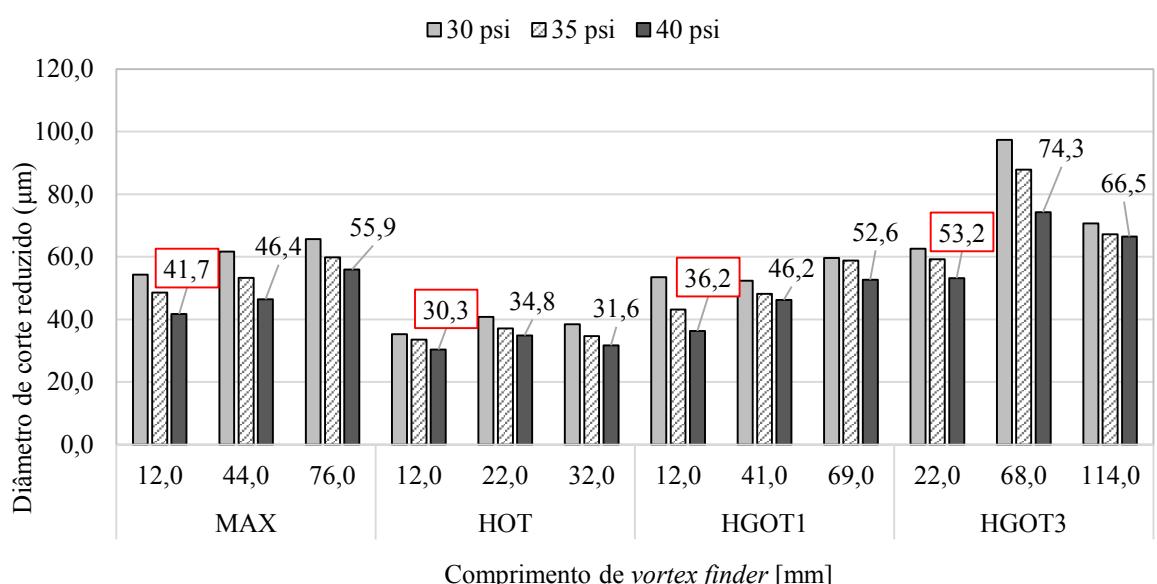


Figura 4.4-8 – Efeito do comprimento de *vortex finder* no Diâmetro de Corte Reduzido dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3.

De acordo com a literatura, pequenas alterações no tamanho do *vortex finder* provocam grandes efeitos na recuperação de sólidos e na distribuição do tamanho de partículas no *overflow* e *underflow* (WANG e YU, 2008). No presente estudo, a alteração do comprimento de *vortex finder* modificou a distribuição granulométrica da corrente de *underflow* e por consequência, foram obtidos diferentes diâmetros de corte. Por exemplo, ao modificar o comprimento do *vortex finder* do hidrociclone MAX de 12 para 44 mm, o Diâmetro de Corte (d_{50}) passou de 38,2 para 42,2 μm , e ao elevar ainda mais o valor de ℓ para 76 mm, o d_{50} subiu para 51,9 μm , considerando a operação a 40 psi.

Ao analisar a Figura 4.4-7, tem-se que, para as condições de C_{VA} e C_{CMC} estabelecidas, o menor Diâmetro de Corte alcançado pelos hidrociclos MAX, HOT e HGOT3, foi quando a variável $X4$ esteve no nível (-2), correspondente ao ℓ de 12 mm para os hidrociclos MAX e HOT, e ao ℓ de 22 mm para o HGOT3. Esta tendência também foi observada para o Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}'), porém com valores em patamares superiores por se tratar de uma variável que considera na separação apenas o efeito centrífugo, como pode-se observar na Figura 4.4-8.

Ao analisar os resultados de d_{50} e d_{50}' para o hidrociclone HGOT1, deve-se levar em consideração o efeito observado nos itens anteriores, em que a Eficiência Total foi favorecida com o aumento de ℓ , em função de R_L ter sido elevada, e que ao contrário, a Eficiência Total Reduzida foi favorecida no menor comprimento de ℓ . Dessa forma, o mínimo valor obtido de d_{50} , de aproximadamente 5,5 μm , foi obtido ao utilizar o *vortex finder* mais longo; todavia, nesta mesma condição ($\ell = 69$ mm) o d_{50}' apresentou o máximo valor entre os demais, de cerca de 52,6 μm . Assim, embora o diâmetro de corte (d_{50}) seja baixo para ℓ_{HGOT1} igual a 69 mm, houve uma menor coleta de finos por atuação da força centrífuga, apenas pelo arraste junto com a grande fração de líquido encaminhada ao *underflow*. Portanto, pode-se concluir que para o hidrociclone HGOT1, assim como nos demais equipamentos, a separação e coleta de finos por hidrocyclonagem foi majorada no menor comprimento de *vortex finder*.

Em geral, quanto menor o *vortex finder* maior a possibilidade de formação de curto circuito e consequente perda de grossos pelo *overflow* (GHODRAT *et al.* 2014a). Todavia, em função da baixa intensidade da força centrífuga existente nos equipamentos operando com C_{CMC} de 0,6% m , foi observado que o menor comprimento de *vortex finder* favoreceu a atuação da força centrífuga por não restringir a área destinada à separação e coleta de finos. Mais uma vez notou-se o efeito da reologia da suspensão sobre a fluidodinâmica do hidrociclone.

4.5. EQUAÇÕES DE DESEMPENHO

A influência dos seguintes fatores: concentração de sólidos na alimentação (C_{VA}), concentração de carboximetilcelulose (C_{CMC}) usada como viscosificante, diâmetro de *underflow* (D_U), comprimento de *vortex finder* (ℓ) e queda de pressão ($-\Delta P$) foi quantificada no desempenho dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Portanto, através da execução do planejamento experimental proposto para esta Tese, foram obtidas as seguintes respostas relacionadas à hidrociclonagem: vazão volumétrica de alimentação (Q_A), número de Euler (Eu), razão de líquido (R_L), concentração de sólidos no *underflow* (C_{VU}), Eficiência Total (η), Eficiência Total Reduzida (η'), Diâmetro de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}').

A fim de ajustar modelos que expressem as principais respostas relacionadas à hidrociclonagem com os fatores estudados, foi realizado o levantamento de equações por regressão não linear múltipla. Dessa forma é possível avaliar os efeitos lineares, quadráticos e de interação dos fatores das variáveis C_{VA} , C_{CMC} , D_U , ℓ e $-\Delta P$ no desempenho de cada um dos hidrociclos estudados. De posse das equações de regressão foi possível construir superfícies de resposta e predizer o desempenho dos equipamentos em outras condições que não foram testadas experimentalmente.

Tem-se que a equação geral da regressão não linear múltipla pode ser expressa na forma matricial, de acordo com a Equação 4.5-1, em que Y representa determinada resposta, b_0 é o valor da média, X é a matriz dos fatores estudados, $X^T b$ são os termos de primeira ordem na função de respostas e $X^T B X$ a contribuição quadrática ao modelo.

$$Y = b_0 + X^T b + X^T B X \quad (4.5-1)$$

Em que: $X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & b_{13}/2 & b_{14}/2 & b_{15}/2 \\ b_{12}/2 & b_{22} & b_{23}/2 & b_{24}/2 & b_{25}/2 \\ b_{13}/2 & b_{23}/2 & b_{33} & b_{34}/2 & b_{35}/2 \\ b_{14}/2 & b_{24}/2 & b_{34}/2 & b_{44} & b_{45}/2 \\ b_{15}/2 & b_{25}/2 & b_{35}/2 & b_{45}/2 & b_{55} \end{bmatrix}$

Portanto, para cada um dos equipamentos, MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, foram levantadas equações de regressão para as respostas Q_A , Eu , R_L , C_{VU} , η , η' , d_{50} e d_{50}' . Os seguintes itens reportam as equações obtidas para cada equipamento, assim como o coeficiente

de correlação, R^2 de cada ajuste. Os fatores foram correlacionados com nível de significância, (p) igual ou menor que 5%.

Com base nas equações de regressão obtidas, Superfícies de Resposta foram estimadas. Para representá-las graficamente, a combinação de fatores foi representada na forma de pares ($X1-X2$, $X1-X3$, $X1-X4$, $X1-X5$, $X2-X3$, $X2-X4$, $X2-X5$, $X3-X4$, $X3-X5$, $X4-X5$). Assim, em cada um dos gráficos construídos, a variável que não estiver contemplada no par de fatores, significa que foi fixada no nível central. Em virtude da quantidade de gráficos gerados para cada hidrociclone estudado, serão apresentadas apenas as Superfícies de Resposta para Número de Euler, relacionado ao consumo energético, para Razão de Líquido, relacionada à capacidade de espessamento e para Eficiência Total, relacionada ao potencial de separação de partículas.

4.5.1. Hidrociclone MAX

As Equações de 4.5-2 a 4.5-9 podem ser usadas para determinação do desempenho do hidrociclone MAX dentro da faixa de concentração de sólidos de 1,0 a 10,0%v., com comportamento reológico semelhante a suspensão contendo 0,2 a 1,0 %m. de CMC, e queda de pressão de 25 a 45 psi. Por se tratarem de dimensões acessórias, o diâmetro de *underflow* (D_U) e o comprimento de *vortex finder* (ℓ) podem ser selecionados a depender do objetivo da operação, desde que os valores estejam dentro da faixa experimental usada para levantamento das curvas, de 3 a 7 mm para o D_U e de 12 a 76 mm para o comprimento ℓ .

Em relação à capacidade de processamento e consumo energético, tem-se a Equação 4.5.2, que representa a vazão de alimentação do hidrociclone MAX (Q_A_{MAX}), estimada com R^2 de 0,97, e a Equação 4.5-3, para número de Euler (Eu_{MAX}), estimada com R^2 de 0,93.

$$Q_A_{MAX}[\text{cm}^3/\text{s}] = 443,62 + X^T \begin{bmatrix} -3,47 \\ 26,44 \\ 10,12 \\ 0 \\ 46,75 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -7,94 & -1,93 & 0 & 0 & 0 \\ -1,93 & -10,43 & 1,85 & 1,86 & 0 \\ 0 & 1,85 & -3,41 & 0 & 0 \\ 0 & 1,86 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-2)$$

$$Eu_{MAX} = 1222,37 + X^T \begin{bmatrix} 18,60 \\ -161,47 \\ -57,62 \\ 0 \\ 93,38 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 46,34 & 9,98 & 0 & 0 & 0 \\ 9,98 & 70,45 & -8,16 & -10,43 & 0 \\ 0 & -8,16 & 21,96 & 0 & 0 \\ 0 & -10,43 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-3)$$

Influenciaram diretamente a capacidade de processamento, e por consequência o consumo energético do hidrociclone MAX, as variáveis $X1$, $X2$, $X3$ e $X5$. De acordo com as Equações 4.5-2 e 4.5-3, nota-se que a queda de pressão representada pela variável $X5$ influenciou de forma positiva as respostas Q_A e Eu . As demais variáveis apresentaram coeficientes de sinais opostos. Por estarem intimamente ligadas, mas com comportamento oposto frente ao consumo energético, tem-se que pontos de máxima vazão apresentaram mínimo Euler. Considerando uma análise em torno do ponto central ($X = 0$), pôde-se verificar que o número de Euler foi mais impactado pela concentração de CMC, seguida pela queda de pressão, diâmetro de *underflow* e concentração de sólidos.

Todavia houve um pequeno efeito combinado entre o comprimento de *vortex finder* e a concentração de CMC, par $X2-X4$, nas respostas Q_A e Eu . No presente caso, o uso de longos comprimentos de ℓ desfavoreceram a capacidade de processamento em fluidos pouco viscosos. Também houve interações entre os fatores $X1-X2$ e $X2-X3$. Estes efeitos podem ser observados através das superfícies de resposta para número de Euler da Figura 4.5-1.

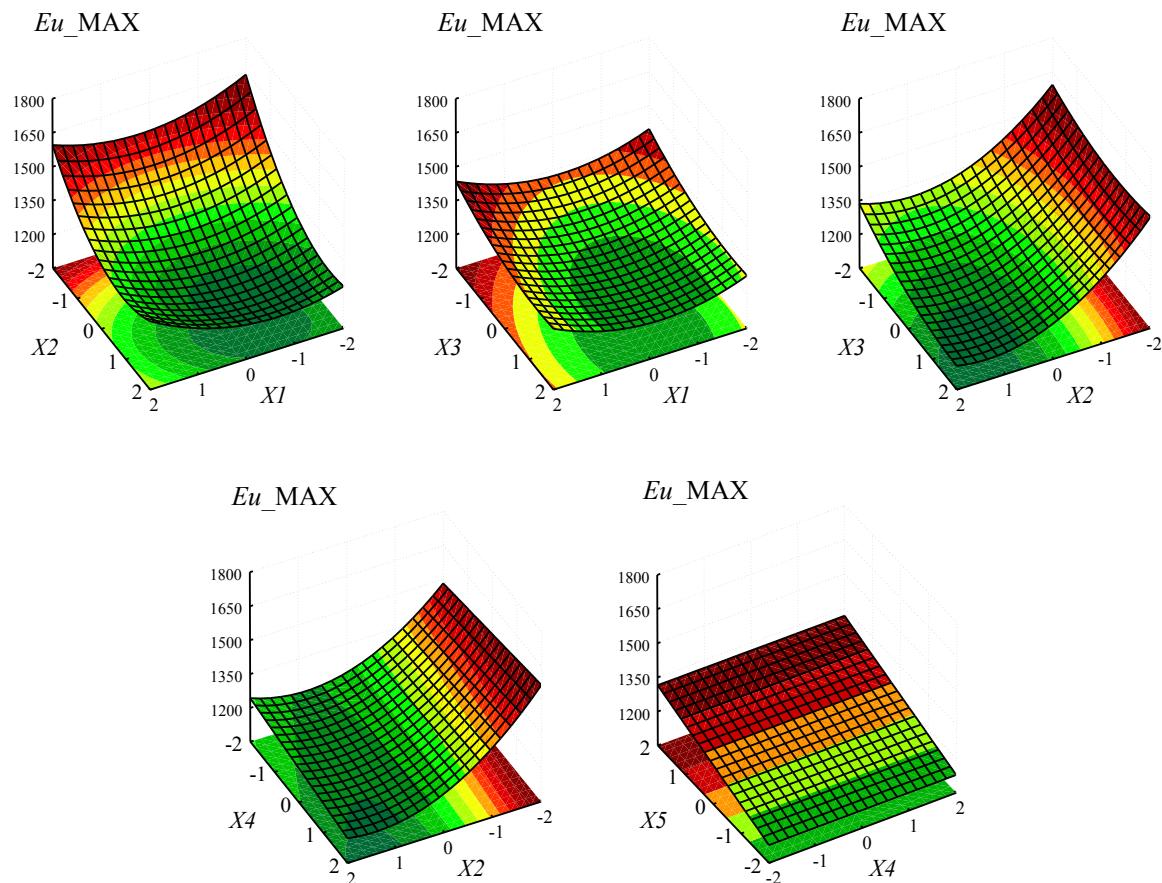


Figura 4.5-1 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone MAX segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$, $X2-X4$ e $X4-X5$.

Em relação à capacidade de espessamento, tem-se a Equação 4.5.4, que representa a razão de líquido do hidrociclone MAX (R_L_{MAX}) estimada com R^2 de 0,94, e a Equação 4.5-5 para cálculo da concentração de sólidos no *underflow* ($C_{VU_{MAX}}$) estimada com R^2 de 0,95.

$$R_L_{MAX} [\%] = 16,16 + X^T \begin{bmatrix} 4,07 \\ 9,62 \\ 11,93 \\ -1,14 \\ -3,70 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -1,17 & 0,86 & 0 & 0 & 0 \\ 0,86 & 0 & 0,64 & 0 & -0,62 \\ 0 & 0,64 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,18 & 0 \\ 0 & -0,62 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-4)$$

$$C_{VU_{MAX}} [\%] = 10,44 + X^T \begin{bmatrix} 3,80 \\ -10,91 \\ -6,06 \\ 0 \\ 3,75 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -1,66 & 0 & 0,75 & 0 & 0 \\ 0 & 3,87 & 2,19 & 0 & -0,75 \\ 0,75 & 2,19 & 1,80 & 0 & -0,96 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,75 & -0,96 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-5)$$

A variável $X3$, correspondente ao diâmetro de *underflow*, foi a que mais influenciou na razão de líquido do hidrociclone MAX, seguida pela concentração de CMC, $X2$. Foram significativas as interações entre fatores $X1-X2$, $X2-X3$ e $X2-X5$, ou seja, a depender se o sistema é concentrado ou diluído, maior ou menor é o efeito da variável na resposta. Conforme ilustra a Figura 4.5-2, tem-se que, para o sistema mais viscoso, contendo a máxima concentração de CMC ($X2 = +2$), a concentração de sólidos ($X1$) eleva a R_L , enquanto no sistema menos consistente a C_{VA} não tem efeito pronunciado.

Ainda considerando as superfícies da Figura 4.5-2, houve pontos de mínima razão de líquido ao minimizar as variáveis $X1$, $X2$, $X3$ e $X5$. O comprimento de *vortex finder*, representado por $X4$, também modificou a razão de líquido, alcançando máxima resposta no nível central ($\ell = 44$ mm); todavia, para a concentração de sólidos no *underflow* o comprimento de *vortex finder* não foi significativo. Considerando a necessidade de espessar uma corrente com alta concentração de sólidos e viscosidade, uma forma de elevar a C_{VU} é reduzir o D_U e elevar a queda de pressão.

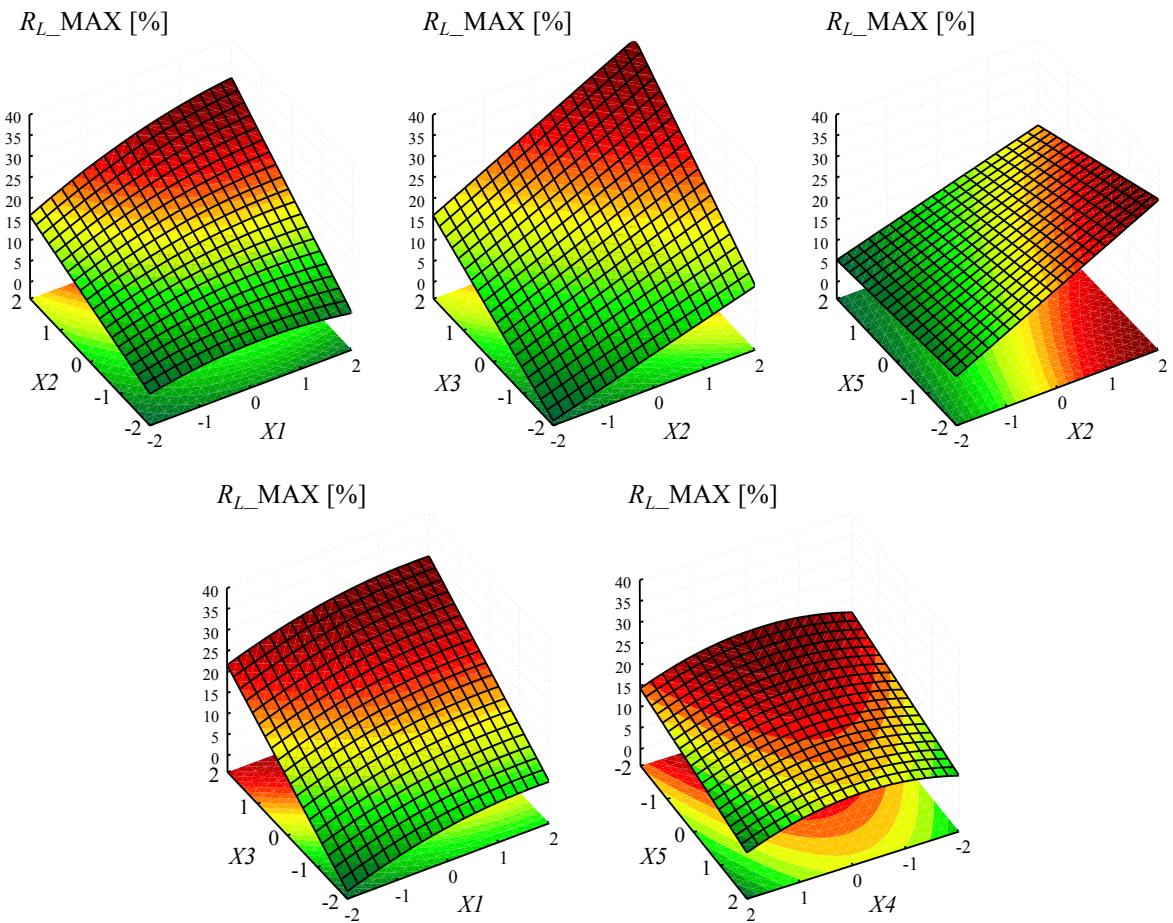


Figura 4.5-2 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclone MAX segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$, $X2-X5$, $X4-X5$.

Quanto à eficiência de separação e coleta do hidrociclone MAX, tem-se a Equação 4.5-6, que representa a Eficiência Total (η_{MAX}) com R^2 de 0,91 e a Equação 4.5-7 para a Eficiência Total Reduzida (η'_{MAX}) obtida com R^2 de 0,94. Além disso, a Equação 4.5-8 e a Equação 4.5-9 servem para predição do Diâmetro de Corte do hidrociclone MAX ($d_{50\text{MAX}}$) e do Diâmetro de Corte Reduzido ($d_{50'}_{\text{MAX}}$) cujos coeficientes de correlação, R^2 , são de 0,93 e 0,95 respectivamente.

$$\eta_{\text{MAX}} [\%] = 29,38 + \mathbf{X}^T \begin{bmatrix} -2,34 \\ -6,19 \\ 12,22 \\ -1,94 \\ 2,42 \end{bmatrix} + \mathbf{X}^T \begin{bmatrix} -3,61 & 1,88 & 0,78 & 0 & 0 \\ 1,88 & 2,30 & 0 & 0 & -1,06 \\ 0,78 & 0 & -1,31 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1,78 & 0 \\ 0 & -1,06 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} \quad (4.5-6)$$

$$\eta'_{\text{MAX}} [\%] = 15,11 + X^T \begin{bmatrix} -6,92 \\ -16,91 \\ 2,19 \\ 0 \\ 6,62 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -2,79 & 0,94 & 0 & 0 & 0 \\ 0,94 & 1,44 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-7)$$

$$d_{50\text{-MAX}} [\mu\text{m}] = 49,90 + X^T \begin{bmatrix} 14,05 \\ 33,42 \\ -12,00 \\ 5,10 \\ -12,31 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 8,14 & 2,57 & -1,70 & 0 & 0 \\ 2,57 & 4,01 & -1,83 & 0 & -2,10 \\ -1,70 & -1,83 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,69 & 0 \\ 0 & -2,10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-8)$$

$$d_{50'}_{\text{MAX}} [\mu\text{m}] = 57,05 + X^T \begin{bmatrix} 17,78 \\ 41,01 \\ -6,35 \\ 5,48 \\ -15,03 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 8,14 & 3,39 & -2,76 & 0 & 0 \\ 3,39 & 5,56 & 0 & 0 & 0 \\ -2,76 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-9)$$

Através da Equação 4.5-6 observa-se que a Eficiência Total foi mais influenciada pela variável $X3$, D_U , por ser responsável por facilitar ou restringir o escoamento sólido/fluido pelo *underflow*. Quanto maior o D_U mais sólido é descarregado no *underflow*, independentemente se pela ação da força centrífuga ou pelo simples arraste de partículas pelo líquido. Em relação à variável $X2$, C_{CMC} , seu efeito negativo na separação é expresso mais intensamente na Equação 4.5-7, que representa a Eficiência Total reduzida, pois o CMC altera o perfil reológico do fluido e por consequência a velocidade tangencial que é responsável pela separação de partículas.

Para a resposta Eficiência Total (η), houve interações entre os fatores $X1-X2$, $X1-X3$ e $X2-X5$. Em sistemas com características próximas ao caráter newtoniano ($X2 = -2$) o percentual de sólidos, variável $X1$, reduziu de forma drástica a eficiência de separação, todavia em sistemas com alta consistência e pseudoplasticidade, a elevação do percentual de sólidos não influencia de forma intensa a eficiência por já estar em patamares bem reduzidos.

As Superfícies de Resposta mais relevantes para a Eficiência Total estão ilustradas na Figura 4.5-3, na qual nota-se que os pontos de máximo da Eficiência Total do hidrociclone MAX foram obtidos para $X1 = -2$, $X2 = -2$, $X3 = +2$, $X4 = -1$, $X5 = +2$.

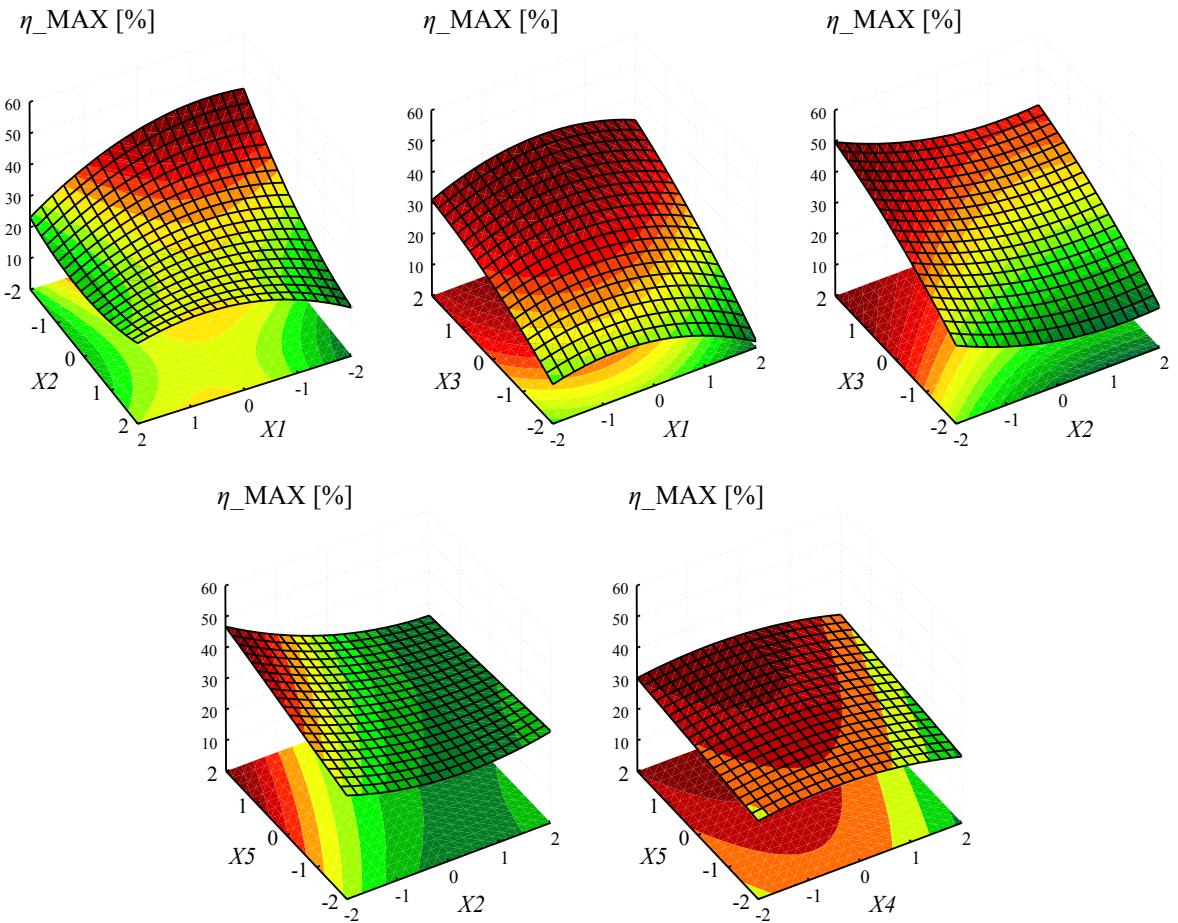


Figura 4.5-3 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclone MAX segundo os pares $XI-X2$, $XI-X3$, $X2-X3$, $X2-X5$, $X4-X5$.

4.5.2. Hidrociclone HOT

Para determinação do desempenho do hidrociclone HOT operando com concentração de sólidos de 1,0 a 10,0%v., com comportamento reológico semelhante à suspensão contendo 0,2 a 1,0 %m. de CMC, e queda de pressão de 25 a 45 psi, foram determinadas as Equações de 4.5-10 a 4.5-17. Também estão inclusos os efeitos de diâmetro de *underflow* (D_U) e o comprimento de *vortex finder* (ℓ), os quais podem ser selecionados dentro da faixa experimental usada para levantamento das curvas, de 3 a 7 mm para o D_U e de 12 a 32 mm para o comprimento ℓ .

As Equações 4.5-10 e 4.5-11 podem ser usadas respectivamente para o cálculo da vazão sendo alimentada no hidrociclone HOT, Q_A_{HOT} , cujo R^2 foi de 0,97, e para cálculo do número de Euler, Eu_{HOT} , com R^2 de 0,93.

$$Q_A_{\text{HOT}}[\text{cm}^3/\text{s}] = 448,57 + X^T \begin{bmatrix} 0 \\ 24,36 \\ 14,58 \\ 0 \\ 47,98 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -12,97 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -9,77 & 2,37 & 0 & 0 \\ 0 & 2,37 & -7,62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -6,68 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4,14 \end{bmatrix} X \quad (4.5-10)$$

$$Eu_{\text{HOT}} = 1207,47 + X^T \begin{bmatrix} 0 \\ -148,68 \\ -87,78 \\ 0 \\ 84,97 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 74,19 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 62,47 & -11,03 & 0 & 0 \\ 0 & -11,03 & 44,45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 37,24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-11)$$

Para o equipamento HOT, todas as variáveis foram significativas para Q_A e Eu . Quanto à interação entre fatores, apenas o par $X2-X3$ foi representativo. As superfícies de resposta para número de Euler do hidrociclone HOT estão apresentadas na Figura 4.5-4.

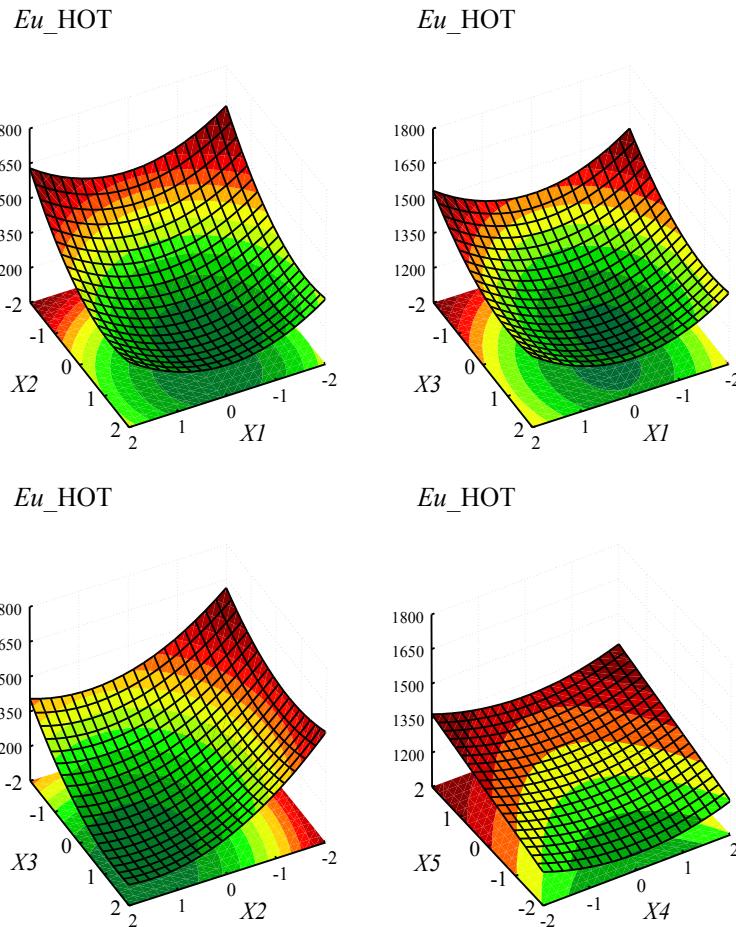


Figura 4.5-4 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HOT segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$ e $X4-X5$.

De acordo com a Equação 4.5-11 e com a Figura 4.5-4, tem-se que a interação quadrática das variáveis $X1$, $X2$, $X3$ e $X4$ revelou pontos de mínimo E_u que correspondem a C_{VA} de 5,5%v., C_{CMC} de 0,6%v., D_u igual a 7 mm e ℓ de 22 mm. Além disso, acréscimos de 5 psi na queda de pressão elevam o número de Euler em cerca de 85 unidades.

Para estimar a razão de líquido do hidrociclone HOT, R_L _HOT, e a concentração de sólidos no *underflow*, C_{VU} _HOT têm-se as Equações 4.5-12 e 4.5-13, cujos coeficientes de correlação R^2 foram de 0,99 e 0,98, respectivamente.

$$R_L\text{-HOT [%]} = 29,04 + X^T \begin{bmatrix} 2,48 \\ 11,98 \\ 18,34 \\ 0 \\ -3,39 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -2,73 & 0 & 0,69 & 0 & 0 \\ 0 & -1,95 & 2,02 & 0 & 0 \\ 0,69 & 2,02 & -2,28 & 0 & -0,38 \\ 0 & 0 & 0 & -1,14 & 0 \\ 0 & 0 & -0,38 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-12)$$

$$C_{VU}\text{-HOT [%]} = 9,76 + X^T \begin{bmatrix} 5,47 \\ -7,56 \\ -3,12 \\ 0 \\ 2,25 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -0,60 & -0,83 & 0 & 0 & 0 \\ -0,83 & 2,03 & 1,37 & 0 & -0,57 \\ 0 & 1,37 & 0 & 0 & -0,38 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,57 & -0,38 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-13)$$

Ao analisar a Equação 4.5-12, tem-se que a variável $X3$, assim como no hidrociclone MAX, também foi a que mais influenciou a resposta razão de líquido (R_L), seguida pela variável $X2$. A Figura 4.5-5 traz as principais Superfícies de Resposta para R_L do HOT.

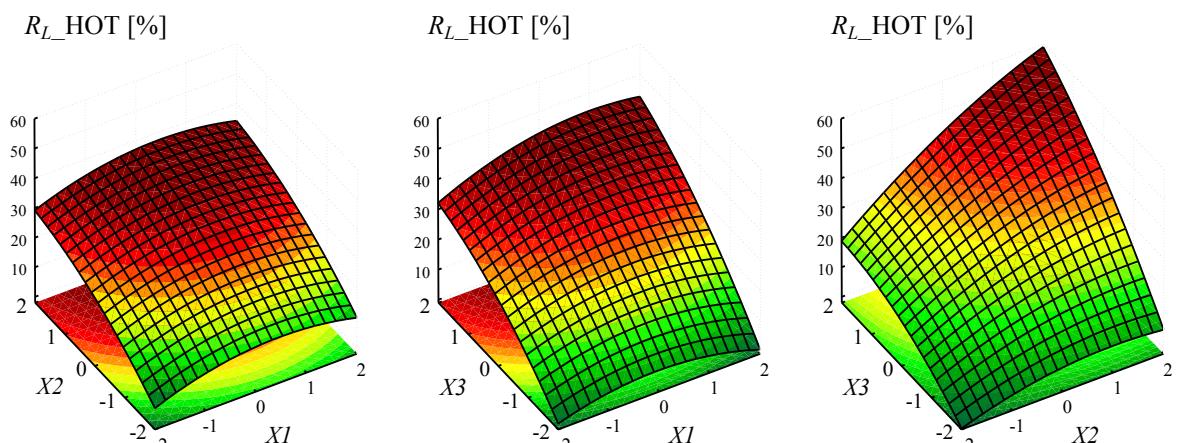


Figura 4.5-5 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclone HOT segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$ e $X2-X3$.

Tem-se que para o ajuste da equação de regressão para a razão de líquido do HOT, foram significativas as interações entre os pares de fatores $X1-X3$, $X2-X3$ e $X3-X5$. Neste sentido, a concentração de sólidos presente na alimentação num sistema viscoso contribui ainda mais para o aumento de R_L , como observado na Figura 4.5-5. Em comparação com as demais variáveis, $X4$ foi a que menos influenciou o desempenho de R_L . Para potencializar a capacidade de concentração do hidrociclone HOT, as melhores condições são encontradas em sua operação com fluido diluído e com baixa viscosidade aparente e com o uso de um pequeno diâmetro de *underflow*.

Em relação à C_{VU} , o comprimento ℓ não exerceu nenhuma influência nesta resposta. Há uma maior sensibilidade com relação à alteração na reologia, através da variável $X2$, como pode-se ver pela Equação 4.5-13. A alteração da reologia, testada experimentalmente através da adição de CMC, modifica sobremaneira a fluidodinâmica do equipamento, apassivando o movimento rotacional do fluido, e conduzindo mais líquido ao *underflow*.

Para estimar a Eficiência Total do hidrociclone HOT ($\eta_{_HOT}$) tem-se a Equação 4.5-14, com R^2 de 0,96. A Equação 4.5-15 é destinada a calcular a Eficiência Total Reduzida ($\eta'_{_HOT}$) estimada com R^2 de 0,96. As Equações 4.5-16 e 4.5-17, podem ser usadas para predição do Diâmetro de Corte do hidrociclone HOT ($d_{50\text{-}}_{HOT}$) e do Diâmetro de Corte Reduzido ($d_{50'}_{_HOT}$) ambas com R^2 de 0,92.

$$\eta_{_HOT} [\%] = 49,32 + X^T \begin{bmatrix} -3,58 \\ -10,95 \\ 19,32 \\ 0 \\ 4,14 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -5,79 & 0,80 & 1,26 & 0 & 0 \\ 0,80 & 1,33 & 2,30 & 0 & -0,70 \\ 1,26 & 2,30 & -6,38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,70 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-14)$$

$$\eta'_{_HOT} [\%] = 29,96 + X^T \begin{bmatrix} -7,10 \\ -26,40 \\ 6,17 \\ 0 \\ 8,99 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -5,56 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6,00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-15)$$

$$d_{50\text{-}}_{HOT} [\mu\text{m}] = 28,19 + X^T \begin{bmatrix} 8,12 \\ 18,75 \\ -25,11 \\ 0 \\ -6,08 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 6,96 & 2,61 & -3,18 & 0 & 0 \\ 2,61 & 4,78 & -3,90 & 1,51 & 0 \\ -3,18 & -3,90 & 8,90 & 0 & 0 \\ 0 & 1,51 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-16)$$

$$d_{50}' \text{ HOT } [\mu\text{m}] = 38,86 + X^T \begin{bmatrix} 12,62 \\ 33,83 \\ -13,86 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 6,04 & 5,46 & 0 & 0 & 0 \\ 5,46 & 8,02 & 0 & 0 & -2,08 \\ 0 & 0 & 9,39 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2,08 & 0 & 0 & -9,63 \end{bmatrix} X \quad (4.5-17)$$

De acordo com as Equações 4.5-14 a 4.5-17, a variável $X3$, por influenciar diretamente a quantidade de material coletado, foi a que mais influenciou a Eficiência Total (η) e, por consequência, o Diâmetro de Corte (d_{50}) do hidrociclone HOT. No entanto, para as respostas que apenas consideram o efeito centrífugo na separação, ou seja, aquelas chamadas de reduzidas, a variável $X2$ foi a que mais influenciou o desempenho de separação, isto porque a força de arraste foi intensificada pela velocidade axial e o efeito centrífugo prejudicado.

As Superfícies de Resposta mais relevantes para Eficiência Total do hidrociclone HOT estão mostradas na Figura 4.5-6.

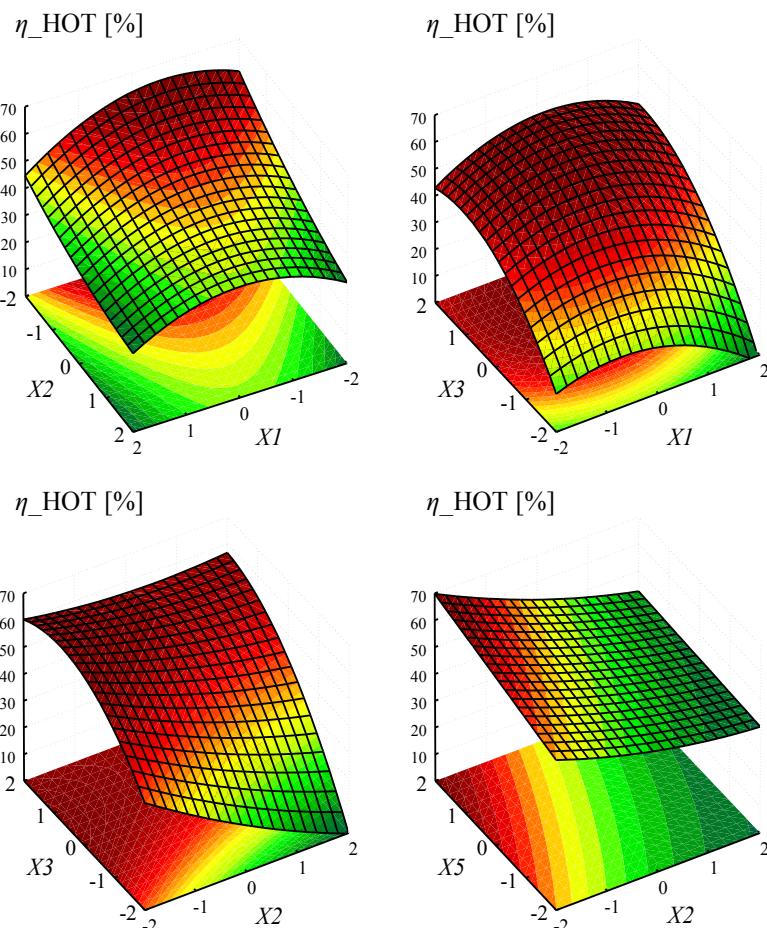


Figura 4.5-6 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclone HOT segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$ e $X2-X5$.

De acordo com a Equação 4.5-14 e a Figura 4.5-6, tem-se que os pares de fatores $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$ e $X2-X5$ foram os que apresentaram interação entre eles. Neste hidrociclone, a variável $X4$, referente ao comprimento de *vortex finder*, não foi significativa. Para maximizar a Eficiência Total do HOT deve-se reduzir a concentração de sólidos e a viscosidade da suspensão alcançada assim como elevar o D_U .

4.5.3. Hidrociclone HGOT1

As Equações 4.5-18 a 4.5-25 preveem o desempenho do hidrociclone HGOT1 frente à alteração da concentração de sólidos na suspensão de 1,0 a 10,0%v., em fluido não newtoniano com comportamento reológico semelhante à suspensão contendo 0,2 a 1,0 %m. de CMC, e queda de pressão de 25 a 45 psi. Podem ser alterados o diâmetro de *underflow* (D_U) de 3 a 7 mm, e o comprimento de *vortex finder* (ℓ) de 12 a 69 mm.

Tem-se que Equação 4.5-18 estima a vazão sendo alimentada no hidrociclone HGOT1, (Q_A _HGOT1) com R^2 de 0,98, e a Equação 4.5-19 pode ser usada para estimar o número de Euler do HGOT1 (Eu _HGOT1) com R^2 de 0,97.

$$Q_A_HGOT1[\text{cm}^3/\text{s}] = 443,39 + X^T \begin{bmatrix} -8,29 \\ 44,92 \\ 74,48 \\ -14,29 \\ 47,94 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0 & -2,19 & 0 & 0 & 0 \\ -2,19 & -10,73 & 7,45 & -3,99 & 3,04 \\ 0 & 7,45 & 4,94 & 5,74 & 0 \\ 0 & -3,99 & 5,74 & -3,89 & 0 \\ 0 & 3,04 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-18)$$

$$Eu_HGOT1 = 1208,95 + X^T \begin{bmatrix} 46,89 \\ -258,10 \\ -423,94 \\ 92,92 \\ 88,79 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 23,96 & 13,33 & 0 & 14,41 & 0 \\ 13,33 & 85,50 & 0 & 18,65 & -17,85 \\ 0 & 0 & 29,77 & -46,19 & 0 \\ 14,41 & 18,65 & -46,19 & 34,91 & 0 \\ 0 & -17,85 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-19)$$

Todos os fatores impactaram as respostas Q_A e Eu do hidrociclone HGOT1, como representado nas Equações 4.5-18 e 4.5-20. Considerando os resultados para o número de Euler, houve interações entre os pares de fatores $X1-X2$, $X1-X4$, $X2-X4$, $X3-X4$ e $X2-X5$. A variável que mais impactou em Eu foi $X3$ (D_U), seguido por $X2$ (C_{CMC}). Diferentemente do hidrociclone MAX e HOT, o *vortex finder* ($X4$) foi a terceira variável que mais influenciou o número de Euler do HGOT1. Estes efeitos podem ser visualizados mais satisfatoriamente na Figura 4.5-7 que representa as Superfícies de Resposta mais relevantes para o número de Euler do HGOT1.

Como pode-se observar na Figura 4.5-7, houve regiões de mínimo Euler para as seguintes condições: $X1 = -2$, $X2 = +2$, $X3 = +2$, $X4 = -2$, $X5 = -2$. A elevação da viscosidade através da adição de CMC, assim como nos demais equipamentos MAX e HOT, reduziu o consumo energético. Por outro lado, quanto mais sólido é alimentado, maior é a energia requerida. O efeito de arraste intensificado com a elevação da viscosidade aparente intensifica o movimento rotacional do fluido conduzindo-o ao *underflow* rapidamente, de modo que mais fluido é alimentado ao sistema. No sistema com alta concentração de CMC ($X2 = +2$), a queda de pressão não exerce tanto efeito no sistema e a adição de sólidos, representada por $X1$, aumenta o consumo. Nos sistemas de menor consistência ($X2 = -2$) a adição de sólidos mantém o Eu em patamares altos, a minimização de D_U eleva ainda mais o Euler assim como a elevação na queda de pressão.

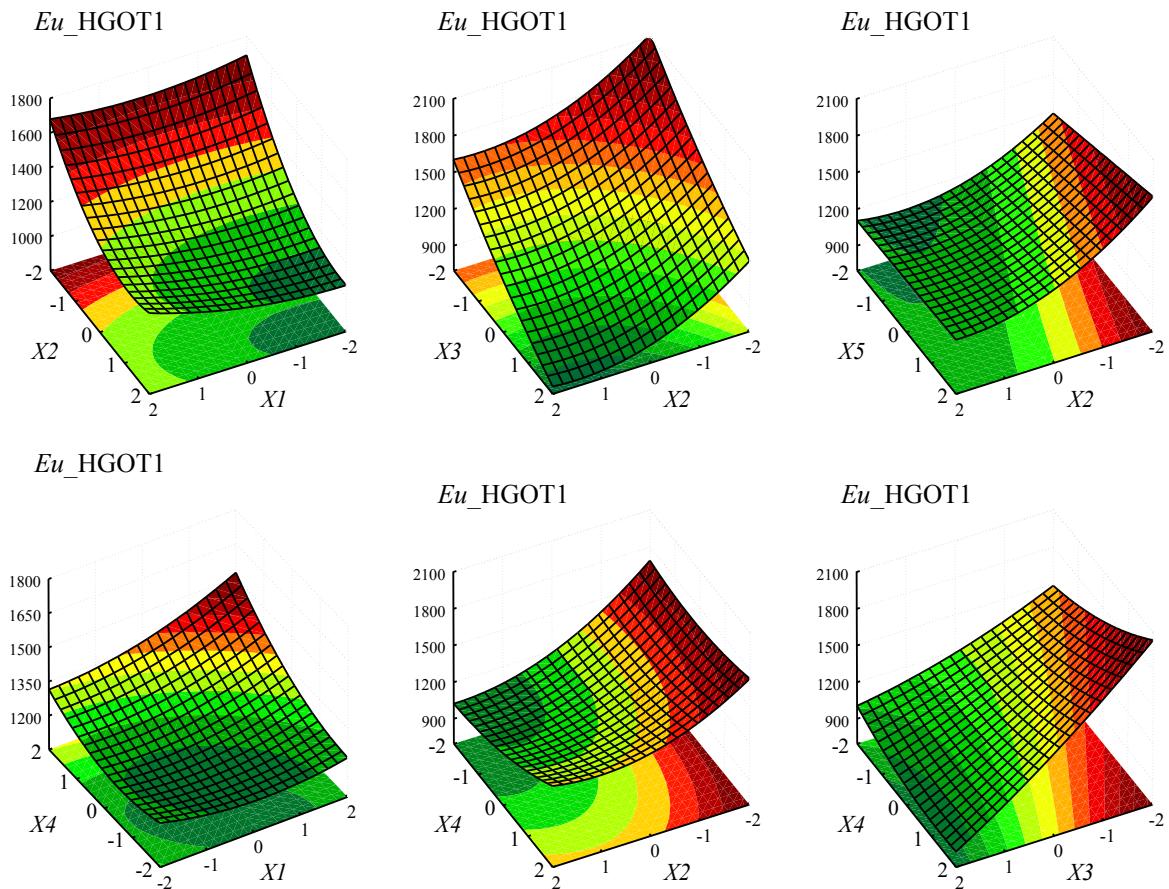


Figura 4.5-7 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HGOT1 segundo os pares $X1-X2$, $X2-X3$, $X2-X5$, $X1-X4$, $X2-X4$ e $X3-X4$.

Ainda de acordo com a Figura 4.5-7, para este equipamento a variável $X4$ exerceu grande influência no consumo energético, de modo que, em geral ao utilizar longos dutos de

vortex finder a perda de carga no equipamento aumentou. Em relação às interações entre os pares $X1-X4$, $X2-X4$ e $X3-X4$, tem-se que em sistemas diluídos ($X1 = -2$) e de baixa viscosidade ($X2 = -2$) o aumento do comprimento ℓ não alterou intensamente a perda de carga. Ou seja, o efeito das variáveis acessórias no desempenho do hidrociclone HGOT1 foi diferente com a alteração da reologia e concentração do fluido. É interessante observar que ao utilizar D_U de 3 mm o aumento em ℓ elevou o consumo, no entanto ao utilizar D_U acima de 5 mm o comportamento foi contrário. A alteração em D_U também altera o regime dentro do hidrociclone e, quanto menor o D_U , mais partículas se acumulam na parte inferior do equipamento formando uma região de alta concentração de sólidos, na qual o comprimento de *vortex finder* tem efeito positivo em Euler.

A razão de líquido do HGOT1 (R_L _HGOT1) e a concentração de sólidos no *underflow* (C_{VU} _HGOT1) podem ser calculadas através das respectivas Equações 4.5-20 e 4.5-21, ambas com R^2 de 0,99.

$$R_L\text{-HGOT1 [%]} = 48,40 + X^T \begin{bmatrix} 0,81 \\ 4,34 \\ 24,78 \\ 4,56 \\ -1,70 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0 & 0,45 & 0 & 0,51 & 0 \\ 0,45 & -0,77 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,26 & 0 & 0 \\ 0,51 & 0 & 0 & 0,75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-20)$$

$$C_{VU}\text{-HGOT1 [%]} = 6,28 + X^T \begin{bmatrix} 4,86 \\ -1,26 \\ -0,47 \\ -0,45 \\ 0,43 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0 & -0,15 & 0 & -0,10 & 0 \\ -0,15 & 0,36 & 0,24 & 0,14 & -0,10 \\ 0 & 0,24 & 0 & 0,08 & 0 \\ -0,10 & 0,14 & 0,08 & 0 & 0 \\ 0 & -0,10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-21)$$

A capacidade de espessamento do equipamento HGOT1 foi influenciada pelas cinco variáveis estudadas, como representado nas Equações 4.5-20 e 4.5-21. Para a resposta R_L o diâmetro de *underflow* foi a variável que mais influenciou, e apenas foram significativas as interações entre os fatores $X1-X2$, $X1-X4$ e ainda com pequenas contribuições. No entanto para a resposta C_{VU} a concentração de sólidos, $X1$, e a de viscosificante, $X2$, foram os fatores mais relevantes, além de serem significativas as interações entre os pares $X1-X2$, $X2-X3$, $X2-X5$, $X3-X5$ e $X1-X4$.

A resposta C_{VU} quantifica diretamente o potencial de espessamento do hidrociclone, no entanto a R_L além de provocar uma avaliação do poder de concentração do equipamento

também se relaciona à eficiência de separação centrífuga. Portanto, estão apresentadas as principais Superfícies de Resposta para a razão de líquido do hidrociclone HGOT1 na Figura 4.5-8.

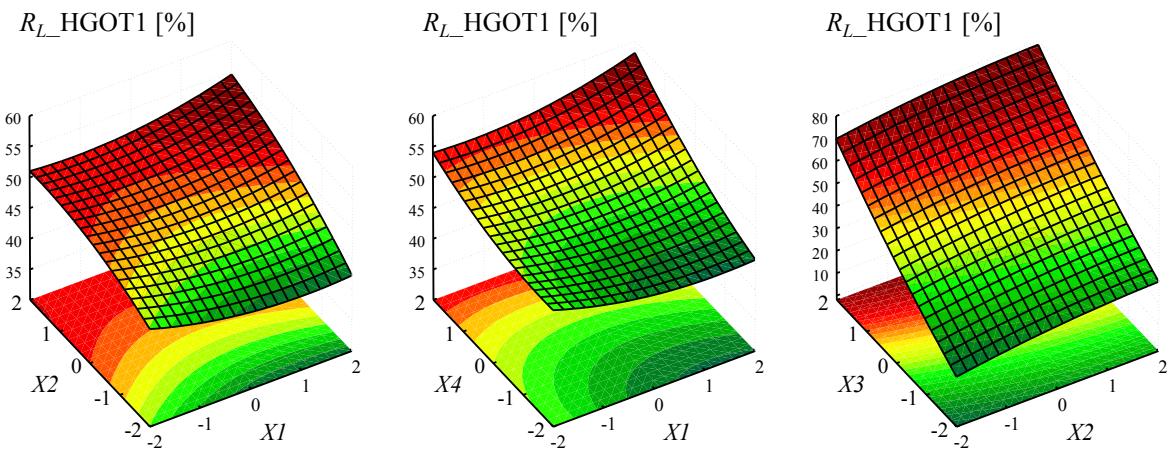


Figura 4.5-8 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclone HGOT1 segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$ e $X2-X3$.

Analizando-se a Figura 4.5-8, pode-se confirmar que a elevação da concentração de CMC e o uso de maiores dutos de *vortex finder* contribuíram para a elevação de R_L , isto por que o efeito centrífugo foi prejudicado em função da alta viscosidade e a restrição da área de separação sólido-fluido conduziu mais líquido ao *underflow*. Estes efeitos foram mais pronunciados em suspensão concentrada ($X2 = +2$) pois a presença de sólidos diminui mais ainda a área destinada à separação de partículas pela formação do leito de partículas na região cônica. A situação preferível para elevar o potencial de espessamento do hidrociclone HGOT1, é trabalhar com suspensão diluída e com baixa viscosidade, no entanto, caso esta situação ideal não seja possível, a razão de líquido pode ser minimizada, e portanto o potencial de espessamento elevado, com a redução no diâmetro de *underflow* e do comprimento de *vortex finder*.

A resposta Eficiência Total do hidrociclone HGOT1 ($\eta_{_HGOT1}$) pode ser estimada através da Equação 4.5-22, com R^2 de 0,98. A equação de predição da Eficiência Total Reduzida ($\eta'_{_HGOT1}$) é a Equação 4.5-23 cujo R^2 é de 0,90. As Equações 4.5-24 e 4.5-25, podem ser usadas para predição do Diâmetro de Corte do hidrociclone HGOT1 (d_{50_HGOT1}) e do Diâmetro de Corte Reduzido ($d_{50'_\text{HGOT1}}$) com R^2 de 0,91 e 0,92, respectivamente.

$$\eta_{\text{HGOT1}} [\%] = 57,98 + X^T \begin{bmatrix} -1,12 \\ -5,46 \\ 23,04 \\ 2,31 \\ 1,82 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -1,96 & 0,55 & 0,86 & 0 & 0 \\ 0,55 & 0 & 1,53 & 1,30 & -0,70 \\ 0,86 & 1,53 & -1,52 & 0 & 0 \\ 0 & 1,30 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,70 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-22)$$

$$\eta'_{\text{HGOT1}} [\%] = 16,77 + X^T \begin{bmatrix} -2,37 \\ -17,22 \\ 2,44 \\ -3,30 \\ 6,80 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -4,50 & 0 & 1,02 & 0 & 0 \\ 0 & 1,83 & 0 & 1,76 & -1,03 \\ 1,02 & 0 & -3,85 & 0 & 0 \\ 0 & 1,76 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1,03 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-23)$$

$$d_{50\text{-}}_{\text{HGOT1}} [\mu\text{m}] = 21,13 + X^T \begin{bmatrix} 5,15 \\ 13,20 \\ -29,30 \\ -4,69 \\ -3,20 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0 & 1,89 & -1,90 & 0 & 0 \\ 1,89 & 0 & -6,21 & 0 & 0 \\ -1,90 & -6,21 & 9,12 & 1,60 & 0 \\ 0 & 0 & 1,60 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-24)$$

$$d_{50'}_{\text{-HGOT1}} [\mu\text{m}] = 51,65 + X^T \begin{bmatrix} 15,86 \\ 32,76 \\ -17,55 \\ 4,59 \\ -7,12 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0 & 7,21 & 0 & 0 & 0 \\ 7,21 & 0 & -2,06 & 0 & 0 \\ 0 & -2,06 & 6,92 & 1,91 & 0 \\ 0 & 0 & 1,91 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-25)$$

Ao avaliar os principais fatores que influenciaram o desempenho de separação do HGOT1 nas Equações de 4.5-22 a 4.5-25, observou-se que as respostas Eficiência Total e Diâmetro de Corte foram mais influenciadas pela variável X_3 , que corresponde ao diâmetro de *underflow*, em função da elevação da razão de líquido com o aumento de D_U . Todavia, ao analisar as respostas Eficiência Total Reduzida e Diâmetro de Corte Reduzido o potencial de separação de partículas e coleta de finos por centrifugação foi drasticamente prejudicado pela concentração de CMC, representada pela variável X_2 .

De acordo com a Equação 4.5-22 a interações entre os pares de fatores X_1-X_2 , X_1-X_3 , X_2-X_3 , X_2-X_4 e X_2-X_5 foram significativas, no entanto, a interação X_2-X_3 foi a maior em módulo. A alta concentração de sólidos reduz a eficiência de separação, todavia, no sistema mais viscoso e de alta pseudoplasticidade ($C_{CMC} = 1,0\%\text{m}$) a presença de sólidos não tem influência na eficiência de separação, isto porque o fator X_2 é muito mais relevante e prejudica

sobremaneira o perfil de velocidade tangencial do fluido. Este efeito pode ser observado através da Figura 4.5-9, que apresenta a Superfície de Resposta para a Eficiência Total do hidrociclone HGOT1 com os principais pares de interação entre fatores. É possível notar que a combinação de fatores que maximiza a Eficiência Total corresponde a $X1 = -2$, $X2 = -2$, $X3 = +2$, $X4 = -2$, $X5 = +2$.

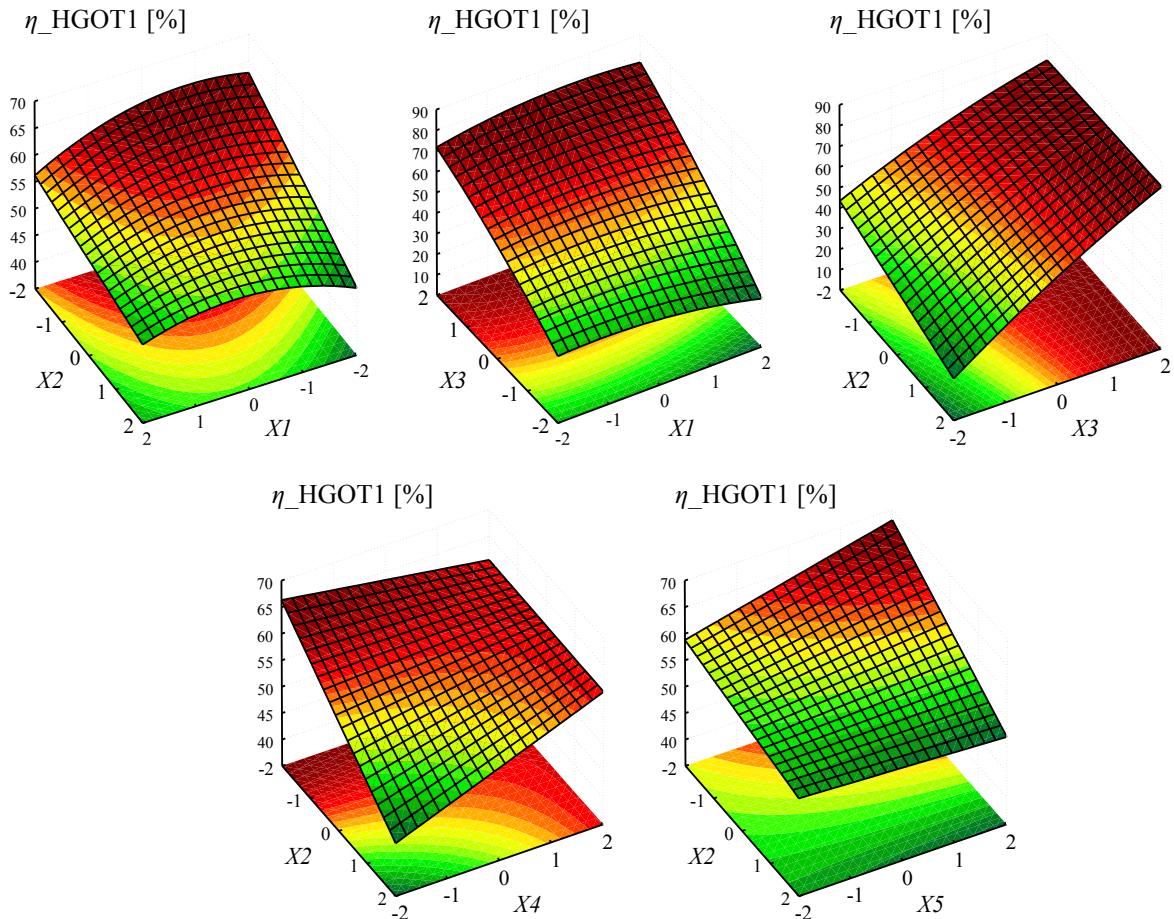


Figura 4.5-9 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclone HGOT1 segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$ e $X2-X5$.

Nota-se que, assim como na capacidade de processamento e de espessamento, o comprimento de *vortex finder* também influenciou a eficiência do HGOT1. Em um sistema menos viscoso, o aumento em $X4$ reduz a Eficiência Total, em sistema mais viscoso ocorre o oposto em maior intensidade, como pode-se ver na Figura 4.5-9. No entanto, a Eficiência Total é favorecida ao utilizar *vortex finder* mais longo pois a Razão de líquido é majorada, ou seja, grande parte dos sólidos coletada no *underflow* foi simplesmente arrastada pelo fluxo descendente. Ao observar a Equação 4.5-23 tem-se que o sinal associado ao coeficiente linear da variável $X4$ é oposto ao mesmo coeficiente referente à Equação 4.5-22. Assim, é possível

concluir que para o hidrociclone HGOT1, dutos de *overflow* longos pioram a eficiência de separação centrifuga. Ou seja, uma análise primária da Eficiência Total sem verificar a razão de líquido seria insuficiente.

4.5.4. Hidrociclone HGOT3

Para prever o desempenho do hidrociclone HGOT3 têm-se as Equações 4.5-26 a 4.5-33, desenvolvidas para determinação das respostas relacionadas à hidrocyclonagem de acordo com as características da suspensão de trabalho; no caso, a concentração de sólidos de 1,0 a 10,0%v. e o caráter reológico do fluido semelhante ao fluido testado contendo 0,2 a 1,0 %m. de CMC. A queda de pressão também pode ser determinada, dentro da faixa de 25 a 45 psi, o diâmetro de *underflow* (D_U) entre 3 e 7 mm, assim como o comprimento de *vortex finder* (ℓ) de 22 a 114 mm.

Para prever a vazão sendo alimentada no hidrociclone HGOT3 (Q_A _HGOT3), a Equação 4.5-26, com R^2 de 0,98, pode ser usada. Ainda para estimar o consumo deste equipamento, tem-se a Equação 4.5-27 para o número de Euler, Eu _HGOT3, com R^2 de 0,95.

$$Q_A\text{-HGOT3}[\text{cm}^3/\text{s}] = 441,17 + X^T \begin{bmatrix} -14,18 \\ 19,27 \\ 5,87 \\ -3,28 \\ 57,20 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -7,25 & -1,62 & 0 & -1,69 & 0 \\ -1,62 & -10,05 & 2,00 & 0 & 0 \\ 0 & 2,00 & 0 & 0 & 0 \\ -1,69 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-26)$$

$$Eu\text{-HGOT3} = 1222,44 + X^T \begin{bmatrix} 87,02 \\ -115,05 \\ -32,68 \\ 22,18 \\ 34,46 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 51,73 & 7,56 & 0 & 10,43 & -5,79 \\ 7,56 & 70,96 & -10,34 & -6,04 & 0 \\ 0 & -10,34 & 12,82 & -8,05 & 0 \\ 10,43 & -6,04 & -8,05 & 9,80 & 0 \\ -5,79 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-27)$$

De acordo com equação de desempenho do hidrociclone HGOT3 que relaciona a vazão de alimentação aos fatores estudados, Equação 4.5-26, tem-se que a queda de pressão proporciona o acréscimo linear da resposta Q_A em aproximadamente 57 cm³/s à medida que a $-\Delta P$ é elevada em 5 psi. De acordo com a Equação 4.5-27, a variável X_2 , que é responsável por modificar a reologia da suspensão, foi a que mais impactou o número de Euler e, portanto, o consumo energético do hidrociclone HGOT3. A elevação da consistência do fluido reduz sobremaneira o consumo energético do HGOT3 devido à redução da intensidade da força

centrífuga. Em segundo lugar, a variável que mais altera o consumo é $X1$, que representa a concentração de sólidos na alimentação, que por sua vez tem efeito positivo no consumo energético. Nota-se, que para a resposta número de Euler, houve interações entre os pares de fatores $X1-X2$, $X2-X3$, $X1-X4$, $X2-X4$ e $X1-X5$.

Mostram-se na Figura 4.5-10 as principais Superfícies de Resposta para número de Euler do hidrociclone HGOT3.

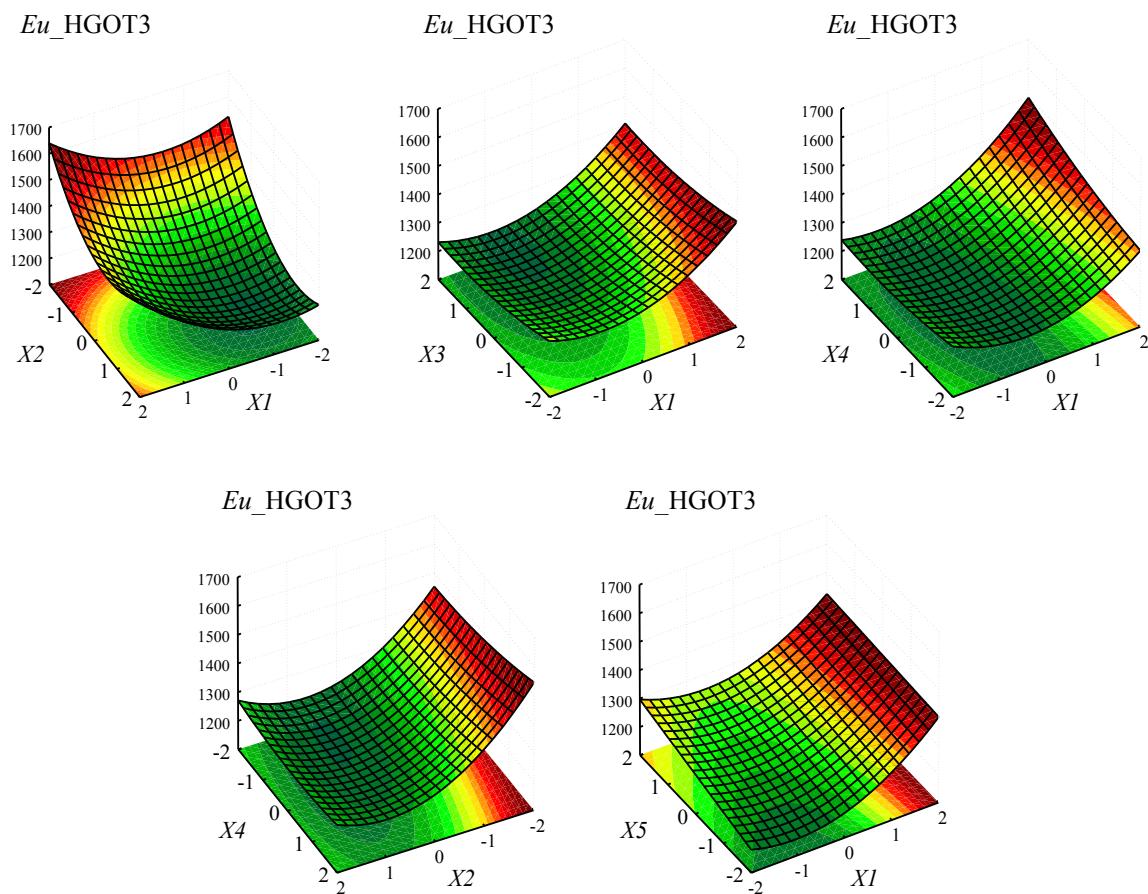


Figura 4.5-10 – Superfícies de Resposta para número de Euler (Eu) do hidrociclone HGOT3 segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$, $X1-X4$, $X2-X4$ e $X1-X5$.

Considerando que o interesse em consumir menos energia é próprio de todas as operações, para o HGOT3 o número de Euler diminui com a minimização dos fatores $X1$, $X3$, $X4$ e $X5$ e com a maximização de $X2$. Além disso, para o hidrociclone HGOT3, assim como para o HGOT1, o número de Euler cresceu com o aumento do comprimento de *vortex finder* em sistemas concentrados e não teve influência significativa no consumo em sistema diluído. Nestes dois hidrociclos o comprimento da parte cilíndrica é bem maior que a parte cilíndrica dos demais equipamentos, MAX e HOT, assim o caminho que o fluido deve percorrer até

chegar à região de separação é maior. Por esta razão os longos comprimentos de ℓ elevam a perda de carga nos equipamentos HGOT1 e HGOT3. Além disso, a redução de X_3 elevou o consumo em sistemas víscidos. Todavia, estes efeitos são muito pequenos comparados com os efeitos das variáveis X_1 e X_2 como pode-se visualizar na Figura 4.5-10.

No que tange ao poder de espessamento do HGOT3, tem-se a Equação 4.5-28 para a razão de líquido (R_L _HGOT3) e a Equação 4.5-29 para a concentração de sólidos no *underflow*, (C_{VU} _HGOT3). Foram obtidos para as respectivas equações R^2 de 0,99 e de 0,89.

$$R_L\text{-HGOT3 [%]} = 16,93 + X^T \begin{bmatrix} 2,69 \\ 11,82 \\ 12,95 \\ 0,40 \\ -3,53 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -0,57 & 0 & 0,28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,24 & 0,45 & -0,25 \\ 0,28 & 1,24 & 1,78 & 0 & -0,30 \\ 0 & 0,45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,25 & -0,30 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-28)$$

$$C_{VU}\text{-HGOT3 [%]} = 8,58 + X^T \begin{bmatrix} 5,12 \\ -9,81 \\ -2,38 \\ 0 \\ 2,43 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -1,12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5,56 & 1,38 & 0 & -0,76 \\ 0 & 1,38 & -1,03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,76 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-29)$$

O hidrociclone HGOT3 foi otimizado por Kyriakidis (2018) para minimização do número de Euler e de maneira inusitada também apresentou características de um bom concentrador. O quanto os fatores X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e X_5 influenciaram nesta característica do HGOT3 pode ser contabilizado através das Equações 4.5-28 e 4.5-29. Tem-se novamente que o diâmetro de *underflow* foi a variável que mais influenciou em R_L , e em sequência, com intensidade muito próxima, a variável X_2 , que representa a mudança na reologia do fluido. Ao analisar a equação de desempenho para C_{VU} , Equação 4.5-29, as variáveis X_2 e X_1 foram as que mais influenciaram esta resposta.

Analizando a resposta razão de líquido, nota-se haver efeitos combinados entre os pares de fatores $X_1\text{-}X_3$, $X_2\text{-}X_3$, $X_2\text{-}X_4$, $X_2\text{-}X_5$ e $X_3\text{-}X_5$, todavia entre estes o que apresentou maior efeito foi a interação $X_2\text{-}X_3$. Nos sistemas concentrados, ao aumentar o diâmetro de *underflow* o aumento na razão de líquido é mais pronunciado. As principais Superfícies de Resposta para razão de líquido do HGOT3 estão ilustradas na Figura 4.5-11.

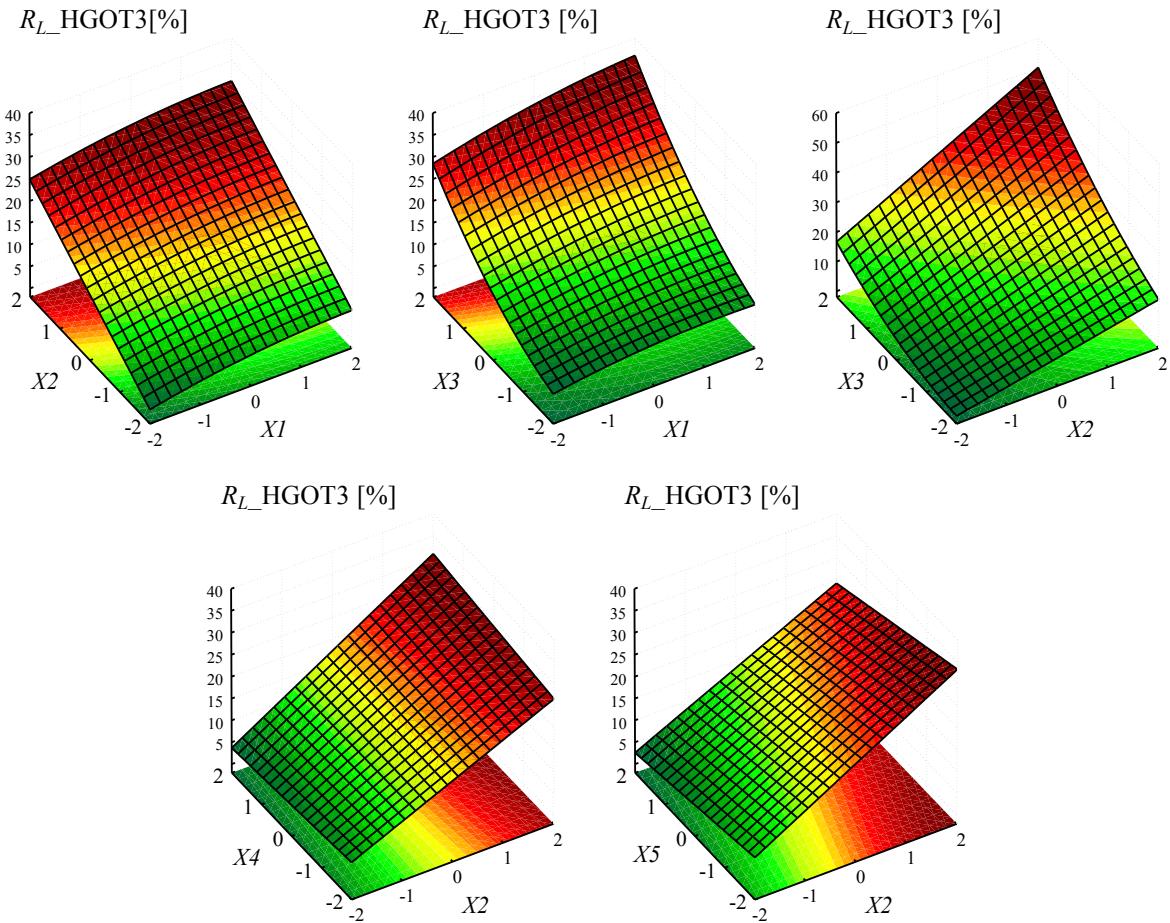


Figura 4.5-11 – Superfícies de Resposta para razão de líquido (R_L) do hidrociclone HGOT3 segundo os pares $X1-X2$, $X1-X3$, $X2-X3$, $X2-X4$, $X2-X5$.

Assim como para a resposta número de Euler, o comprimento de *vortex finder* também influenciou de maneira sutil a quantidade de líquido sendo enviada ao *underflow*. De acordo com a Figura 4.5-11, em sistemas com alta viscosidade ($X2 = +2$), o comprimento de *vortex finder* aumenta mais a razão de líquido, enquanto que nos sistemas menos viscosos ℓ favorece o espessamento da suspensão. Embora estes efeitos tenham sido observados, é notório que a variável $X2$ elevou de forma severa a razão de líquido. No entanto, ao trabalhar com uma suspensão viscosa existe a possibilidade de reduzir o D_U para minimizar a razão de líquido.

Em relação ao potencial de separação do hidrociclone HGOT3, a Equação 4.5-30 pode ser usada para estimar a resposta Eficiência Total do hidrociclone HGOT3 ($\eta_{_HGOT3}$) com R^2 de 0,91, enquanto a Equação 4.5-31 pode ser usada para prever a Eficiência Total Reduzida ($\eta'_{_HGOT3}$) com R^2 de 0,93. Ainda para prever a eficiência de coleta de finos têm-se as Equações 4.5-32 e 4.5-33, as quais determinam, com R^2 de 0,96 e 0,95, respectivamente, o Diâmetro de Corte ($d_{50_{}}_{_HGOT3}$) e o Diâmetro de Corte Reduzido ($d_{50'}_{_HGOT3}$) do hidrociclone HGOT3.

$$\eta_{\text{HGOT3}} [\%] = 27,98 + X^T \begin{bmatrix} 0 \\ -4,06 \\ 13,83 \\ 0 \\ 1,27 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -3,36 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4,80 & 0,95 & 0,75 & -0,93 \\ 0 & 0,95 & -1,83 & 0 & 0 \\ 0 & 0,75 & 0 & -1,64 & 0 \\ 0 & -0,93 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-30)$$

$$\eta'_{\text{HGOT3}} [\%] = 13,14 + X^T \begin{bmatrix} -2,96 \\ -17,15 \\ 2,28 \\ 0 \\ 5,28 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -3,27 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4,41 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3,85 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1,89 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-31)$$

$$d_{50\text{-}}_{\text{HGOT3}} [\mu\text{m}] = 77,50 + X^T \begin{bmatrix} 10,07 \\ 37,08 \\ -22,83 \\ 4,05 \\ -12,62 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -5,95 & 3,30 & -2,35 & 0 & 0 \\ 3,30 & -9,87 & -5,47 & 0 & 0 \\ -2,35 & -5,47 & 2,62 & -1,86 & 1,58 \\ 0 & 0 & -1,86 & -9,88 & 0 \\ 0 & 0 & 1,58 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-32)$$

$$d_{50'}_{\text{-HGOT3}} [\mu\text{m}] = 86,38 + X^T \begin{bmatrix} 13,43 \\ 46,99 \\ -15,33 \\ 4,24 \\ -14,43 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -7,43 & 5,12 & 0 & 0 & 0 \\ 5,12 & -9,79 & -3,05 & 0 & 0 \\ 0 & -3,05 & 5,36 & -2,13 & 0 \\ 0 & 0 & -2,13 & -10,59 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.5-33)$$

Ao observar as Equações 4.5-30 e 4.5-31, tem-se que a variável $X3$, referente ao diâmetro de *underflow*, foi a que mais influenciou a Eficiência Total do HGOT3 enquanto a variável $X2$, referente à concentração de CMC, foi a que mais influenciou a Eficiência Total Reduzida. Para η' não houve interação entre fatores, já para η foram observados efeitos de combinação entre as variáveis $X2-X3$, $X2-X4$ e $X2-X5$. No que diz respeito às Equações 4.5-32 e 4.5-33, a influência da concentração de CMC, variável $X2$, foi superior ao efeito relacionado as demais variáveis.

As principais Superfícies de Resposta para a Eficiência Total do hidrociclone HGOT3 podem ser analisadas através da Figura 4.5-12. Pode-se perceber que para maximizar a eficiência deste equipamento é recomendável minimizar a variável $X2$ e maximizar $X3$. O comprimento de *vortex finder* também influenciou a eficiência, porém de maneira mais discreta. No sistema com alta viscosidade a elevação na queda de pressão não tem efeito significativo na

separação. O perfil de velocidades dos fluidos torna-se constante e mesmo a adição de mais energia potencial ao sistema não é capaz de melhorar a separação de partículas.

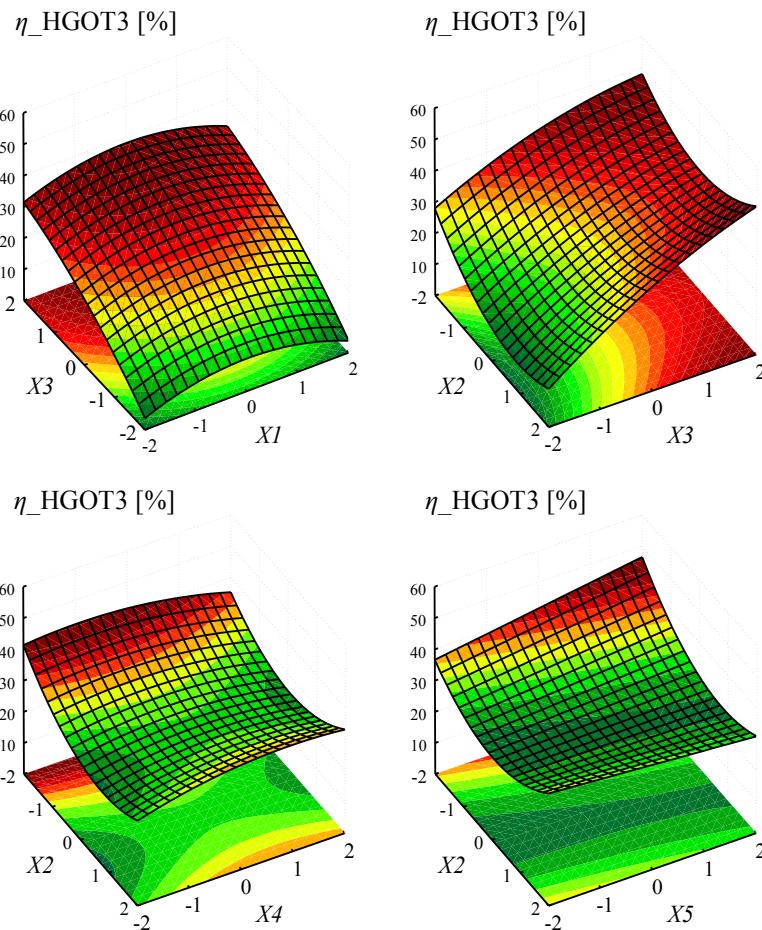


Figura 4.5-12 – Superfícies de Resposta para Eficiência Total (η) do hidrociclone HGOT3 segundo os pares $X1-X3$, $X2-X3$, $X2-X4$ e $X2-X5$.

4.5.5. Comparação entre equipamentos

Os hidrociclos objeto de estudo nesta tese foram otimizados com objetivos diferentes em condições diluídas e newtonianas. Todos os hidrociclos estudados tiveram seu desempenho prejudicado com a modificação da reologia do fluido, de newtoniano para pseudoplástico, devido a redução da aceleração centrífuga do fluido. O aumento da viscosidade aparente do sistema reduziu a eficiência de separação por hidrocyclonagem, diminuiu o número de Euler e elevou a razão de líquido dos equipamentos, ou seja, mais líquido foi descarregado na corrente de *underflow* e menos sólido, diminuindo a coleta de partículas.

Todavia, o hidrociclo HGOT1, otimizado por Kyriakidis (2018) com o objetivo de maximizar a Eficiência Total em suspensões diluídas, manteve seu patamar de alta eficiência

comparado aos demais equipamentos ao operar com fluido pseudoplástico ($C_{CMC} = 0,6\%m.$) e em suspensão de sólidos diluída ($C_{VA} = 1,0\%v.$) com as demais variáveis no nível central (D_U e ℓ). Nestas condições, o hidrociclone HGOT1 apresentou Eficiência Total de 59% a 40 psi, e C_{VU} de 1%, enquanto nos equipamentos MAX, HOT e HGOT3 η foi de 28%, 44% e 23%, e C_{VU} de 4%, 3%, e 3%, respectivamente.

Os hidrociclos MAX e HGOT3 também foram otimizados em concentração de sólidos diluída e com fluido newtoniano, mas ainda assim apresentaram resultados promissores no que diz respeito a elevação da concentração de sólidos do *underflow* em suspensão pseudoplástica contendo 0,2%m. de CMC. Com as demais variáveis no nível central (D_U e ℓ), a suspensão alimentada inicialmente contendo 5,5%v. de sólidos foi majorada para 35% e 37% com o uso dos equipamentos MAX e HGOT3, exibindo Eficiência Total de 43% e 49%, respectivamente. Comparado aos demais equipamentos nestas mesmas condições ($C_{CMC} = 0,2\%m.$ e $C_{VA} = 5,5\%v.$), HGOT1 e HOT alcançaram C_{VU} inferiores, de cerca de 9% e 24%, respectivamente, e η de 70% tanto para HGOT1 quanto para HOT.

Comparado aos demais equipamentos, o hidrociclo HOT apresentou desempenho intermediário no que diz respeito ao espessamento e a eficiência de separação em situações que os demais equipamentos exibiram comportamentos extremos (ou alta Eficiência Total ou alta concentração de sólidos no *underflow*). HOT apresentou Eficiência Total igual à do hidrociclo HGOT1 operando com fluido pseudoplástico em suspensão não diluída ($C_{VA} = 5,5\%$. e $C_{CMC} = 0,6\%m.$) e relativo potencial de espessamento ($C_{VU} = 24\%$). Este comportamento condiz com o objetivo de otimização proposto por Mognon (2015) na concepção do hidrociclo HOT (minimização da razão de líquido e maximização da Eficiência Total).

Além de avaliar e quantificar os efeitos de C_{VA} , C_{CMC} , D_U , ℓ e $-\Delta P$ na hidrociclonagem, e obter equações de desempenho para os hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3, a abordagem deste estudo também tem por interesse determinar uma condição/equipamento que maximize concentração de sólidos no *underflow* e mantenha a eficiência em patamares aceitáveis em condições próximas às de operação em um sistema de limpeza de fluidos de perfuração. Neste sentido, ao analisar as características da suspensão que é alimentada às baterias de hidrociclos nas sondas de perfuração de petróleo e gás, tem-se em média 10,0% de sólidos em volume e fluido com caráter pseudoplástico (PEREIRA, 2010).

Com base nos dados experimentais obtidos e nas equações de desempenho para cada equipamento, uma Otimização Multi-Resposta foi proposta fixando as variáveis X_1 e X_2 nos níveis (+2) e (0), correspondentes a C_{VA} de 10,0%v. e C_{CMC} de 0,6%m. para estudar uma

situação que a Eficiência Total (η) e a concentração de sólidos no *underflow* (C_{VU}) sejam maximizadas simultaneamente. Para isso foi utilizada uma função de deseabilidade com auxílio do software *Statistica®* para encontrar os valores de $X3$, $X4$ e $X5$ que atendessem a restrição definida. Os resultados preditos dos fatores $X3$, $X4$ e $X5$ para maximização de η e C_{VU} estão apresentados na Tabela 4.5-1 assim como os valores preditos das respostas.

Tabela 4.5-1 – Resultados obtidos na otimização da Eficiência Total e concentração do *underflow* ao operar com C_{VA} de 10,0%v e $C_{CMC} = 0,6\text{m}$.

Hidrociclone	$X3$	$X4$	$X5$	η [%]	C_{VU} [%]
MAX	+2	-1	-2	31,9	13,1
HOT	+1,2	+2	+2	45,3	15,3
HGOT1	+2	-2	+2	76,5	11,0
HGOT3	+1,2	0	+2	28,9	12,1

Com base nos resultados preditos na Tabela 4.5-1, o hidrociclone HOT foi o que obteve a melhor resposta para concentração de sólidos do *underflow* (C_{VU}), de cerca de 15%, seguido pelo hidrociclone MAX e pelo HGOT3. No entanto a Eficiência Total predita do HOT de aproximadamente 45% não foi a maior comparada aos outros equipamentos. O hidrociclone HGOT1 foi o que apresentou a maior Eficiência Total de cerca de 76%, no entanto a menor C_{VU} assim como esperado devido a sua geometria característica para maximização de η .

Analizando o estudo de caso proposto, a escolha de um único equipamento com características concentradoras e de alta eficiência para operar em condições próximas as operantes em um sistema de limpeza de fluidos de perfuração seria impraticável. Dessa forma, uma maximizar a concentração de sólidos no *underflow*, os equipamentos HOT e MAX alcançariam o melhor desempenho, no entanto grande parte dos sólidos seria perdida no *overflow*. De igual forma, o uso do hidrociclone HGOT1 para elevar a eficiência de separação não atingiria o objetivo de espessar a corrente alimentada. Assim uma forma de resolver este impasse seria utilizar um dos equipamentos concentradores, HOT ou MAX ou HGOT3, e em seguida o equipamento HGOT1 para tratar o *overflow* do primeiro equipamento.

Tem-se que a geometria dos equipamentos exerce forte influência no desempenho de hidrociclonagem. Todavia as condições operacionais também devem ser levadas em consideração ao otimizar as dimensões geométricas de hidrociclos para o sucesso de determinada operação.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

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

5.1. CONCLUSÕES

O desempenho dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 foi avaliado frente à alteração da concentração de sólidos na alimentação, da adição do modulador reológico carboximetilcelulose, das variáveis acessórias diâmetro de *underflow* e comprimento de *vortex finder* e da queda de pressão na entrada do equipamento. Cada fator foi analisado de forma independente e conjunta através das Superfícies de Resposta.

A elevação da concentração de sólidos em fluido pseudoplástico não é benéfica para a eficiência de hidrocyclonagem. A Eficiência Total dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 reduziu cerca de 22%, 24%, 7% e 18% ao majorar em cerca de 10 vezes a concentração de sólidos sendo alimentada num fluido contendo 0,6% m. de CMC. Em sistemas mais viscosos o acréscimo de sólidos não é tão representativo pois os perfis de velocidade tangencial já estão em patamares constantes.

Confirmou-se o quanto a reologia do fluido tem impacto na hidrocyclonagem ao comparar os resultados obtidos dos equipamentos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 trabalhando com suspensão de sólidos diluída e de caráter pseudoplástico com resultados obtidos em trabalhos anteriores na operação com suspensão aquosa diluída. A situação preferível para manter o potencial de separação dos hidrociclones é processar correntes diluídas e de baixa viscosidade.

Ao avaliar a adição de carboximetilcelulose à suspensão, foi possível quantificar o impacto da alteração da reologia no desempenho de hidrocyclonagem. Ao modificar o índice de comportamento, n , do fluido de 0,99 para 0,48, a eficiência dos hidrociclones MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 reduziu cerca de 28%, 43%, 24% e 41% respectivamente. A fluidodinâmica do equipamento é modificada, a intensidade da força centrifuga é reduzida devido ao arraste, e o movimento rotacional apassivado. Dessa forma menor é o tempo de residência da suspensão

no equipamento e de forma inusitada a capacidade de processamento é favorecida (acrúscimo das velocidades axiais intrinsecamente ligada à razão de líquido) e o número de Euler reduz.

O diâmetro de *underflow* tem forte efeito na razão de líquido dos equipamentos. Foi alcançado máximo percentual de sólidos no *underflow* de 27%, 14%, 7% e 10% para os respectivos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 ao utilizar o diâmetro de *underflow* no menor nível ($D_U = 3$ mm) mantendo os demais fatores no ponto central. O aumento da restrição ao escoamento leva à formação de um leito de partículas na parte cônica inferior do hidrociclo, que reduz a área disponível à separação de partículas e eleva o diâmetro de corte.

Dentre os fatores estudados, o comprimento de *vortex finder* foi o que menos influenciou o desempenho dos hidrociclos. Todavia, dada a condição operacional vigente na planta, o desempenho de separação pode ser aperfeiçoado para determinada geometria com a escolha ideal de sua dimensão.

Foi possível levantar através de regressão não linear múltipla equações capazes de descrever o desempenho dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3. Foram obtidas equações para predição da vazão de alimentação (Q_A), número de Euler (Eu), razão de líquido (R_L), concentração do *underflow* (C_{VU}), Eficiência Total (η), Eficiência Total Reduzida (η'), Diâmetro de Corte (d_{50}) e Diâmetro de Corte Reduzido (d_{50}') com coeficiente de correlação, R^2 , entre 0,89 e 0,99.

Dentre as condições operacionais testadas, o hidrociclo HGOT1 foi o que apresentou maior Eficiência Total, de cerca de 58%, comparado aos demais equipamentos ao trabalhar com suspensão diluída pseudoplástica contendo 0,2%m. de CMC. Os hidrociclos MAX e HOT alcançaram o maior potencial de espessamento com C_{VU} de aproximadamente 35 e 37%v. respectivamente, ao trabalhar com suspensão contendo 5,5%v. de sólidos e 0,6%m. de CMC.

Ao comparar os equipamentos e prever o comportamento dos mesmos em uma condição de trabalho próxima a encontrada em um sistema de limpeza de fluidos de perfuração ($C_{VA} = 10,0\%$ v., $C_{CMC} = 0,6\%$ m.), tem-se que o hidrociclo HOT alcançaria uma concentração de sólidos no *underflow* de cerca de 15%v. e o hidrociclo HGOT1 uma Eficiência Total de aproximadamente 76%.

Assim, conclui-se que geometria do equipamento tem fundamental influência nas respostas obtidas e na intensidade do efeito que determinado fator exerce em seu desempenho. Ainda, a otimização de determinada geometria numa condição diferente da condição em que o equipamento irá operar conduz a resultados distintos. Dessa forma, a otimização das dimensões geométricas em condições operacionais próximas às de trabalho é uma opção para solucionar

os desafios ainda existentes no que tange ao processamento de fluidos não newtonianos, viscosos e com alta concentração de sólidos.

5.2. SUGESTÕES

O presente estudo da influência de condições operacionais no desempenho de hidrociclos otimizados tem as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- A incorporação de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo do efeito da reologia da suspensão nos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 considerando escoamento tridimensional, turbulento, transiente e multifásico.
- Verificar o comportamento da combinação dos hidrociclos MAX, HOT, HGOT1 e HGOT3 trabalhando em série.
- A otimização geométrica de hidrociclos utilizando fluidos com características não newtonianas e em suspensão não diluída.
- Execução de testes de hidrocyclonagem usando fluido de perfuração real contendo cascalho.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHZADEH, L.; HABIBIAN, M.; ETEZAZIAN, R.; NASERI, S. Study of particle's shape factor, inlet velocity and feed concentration on mini-hydrocyclone classification and fishhook effect. *Powder Technology*, v. 283, p. 294–301, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.007>>.

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

ALTIERI, G.; GENOVESE, F.; TAURIELLO, A.; RENZO, G. C. DI. Innovative plant for the separation of high quality virgin olive oil (VOO) at industrial scale. *Journal of Food Engineering*, v. 166, p. 325–334, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.033>>.

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

ARRUDA, E. B.; ALMEIDA, C. A. K.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. *Avaliação do comportamento de hidrociclos filtrantes de Krebs*. In: XXX Encontro nacional sobre escoamento em meios porosos, São Carlos. [S.l.: s.n.], 2002.

ASCENDINO, G. G. *Caracterização de Hidrociclos Cilíndrico-Filtrantes Otimizados*. 2019. 148 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2019.

BHASKAR, K. U.; MURTHY, Y R.; RAJU, M. R.; TIWARI, S.; SRIVASTAVA, J. K., RAMAKRISHNAN, N. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone. *Minerals Engineering*, v. 20, p. 60–71, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2006.04.012>>.

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

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, N. E. *Transport Phenomena*. 2^a Ed. ed. [S.l: s.n.], 2004.

BOYLU, F.; ÇINKU, K.; ESENLI, F.; SABRI, M. The separation efficiency of Na-bentonite by hydrocyclone and characterization of hydrocyclone products. *International Journal of Mineral Processing*, v. 94, n. 3–4, p. 196–202, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.004>>.

- BRADLEY, D. *The Hydrocyclone*. Pergamon Press, London. 1965.
- BRENNAN, M. S.; NARASIMHA, M.; HOLTHAM, P. N. Multiphase modelling of hydrocyclones – prediction of cut-size. *Minerals Engineering*, v. 20, p. 395–406, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi:10.1016/j.mineng.2006.10.010>>
- CAO, Y.; JIN, Y.; LI, J.; ZOU, D.; CHEN, X. Demulsification of the phosphoric acid – tributyl phosphate (W/O) emulsion by hydrocyclone. *Separation and Purification Technology*, v. 158, p. 387–395, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.038>>.
- CHHABRA, R; RICHARDSON, J. *Bubbles, Drops and Particles in Non-Newtonian Fluids*. Second ed., CRC Press Taylor & Francis Group, 771p, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9781420015386>>.
- CHU, K. W.; WANG, B.; YU, A. B.; VINCE, A. Computational study of the multiphase flow in a dense medium cyclone : Effect of particle density. *Chemical Engineering Science*, v. 73, p. 123–139, 2012a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.007>>.
- CHU, K. W.; WANG, B.; YU, A. B.; VINCE, A. Particle scale modelling of the multiphase flow in a dense medium cyclone : Effect of vortex finder outlet pressure. *Minerals Engineering*, v. 31, p. 46–58, 2012b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.11.011>>.
- CILLIERS, J. J.; HARRISON, S. T. L. Separation and Purification Technology Yeast flocculation aids the performance of yeast dewatering using mini- hydrocyclones. *Separation and Purification Technology*, v. 209, n. March 2018, p. 159–163, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.019>>.
- CUI, B.; ZHANG, C.; WEI, D.; LU, S.; FENG, Y. Effects of feed size distribution on separation performance of hydrocyclones with different vortex finder diameters. *Powder Technology*, v. 322, p. 114–123, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.010>>.
- CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R. A.; CROSS, C. R. Understanding the Hydrocyclone Separator Through Computational Fluid Dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 81, n. April, p. 455–466, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1205/026387603765173718>>.
- DAVAILLES, A.; CLIMENT, E.; BOURGEOIS, F. Fundamental understanding of swirling flow pattern in hydrocyclones. *Separation and Purification Technology*, v. 92, p. 152–160, 2012a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.12.011>>.
- 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, 2012b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.012>>.

DELGADILLO, J. A.; RAJAMANI, R. K. Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics. *International Journal of Mineral Processing*, v. 84, p. 252–261, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.014>>.

DUBEY, R. K.; SINGH, G.; MAJUMDER, A. K. Roping: Is it an optimum dewatering performance condition in a hydrocyclone? *Powder Technology*, v. 321, p. 218–231, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.018>>.

FAÇANHA, J. M. F. *Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido-líquido em hidrociclos*. 83 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2012.

FAN, Y.; WANG, JIANGANG; BAI, Z.; WANG, JUNYE; WANG, H. Experimental investigation of various inlet section angles in mini-hydrocyclones using particle imaging velocimetry. *Separation and Purification Technology*, v. 149, p. 156–164, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.047>>.

GARMSIRI, M. R.; UNESI, M. Challenges and opportunities of hydrocyclone-thickener dewatering circuit: A pilot scale study. *Minerals Engineering*, v. 122, n. February, p. 206–210, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.001>>.

GHODRAT, M.; KUANG, S. B.; YU, A. B.; VINCE, A.; BARNETT, G. D.; BARNETT, P. J. Numerical analysis of hydrocyclones with different conical section designs. *Minerals Engineering*, v. 62, p. 74–84, 2014a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.12.003>>.

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. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ie402267b>>.

GHODRAT, M.; KUANG, S. B.; YU, A. B.; VINCE, ANDREW; BARNETT, G. D.; BARNETT, P. J. Numerical analysis of hydrocyclones with different vortex finder configurations. *Minerals Engineering*, v. 63, p. 125–138, 2014b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.02.003>>.

GHODRAT, M.; QI, Z.; KUANG, S. B.; JI, L.; YU, A. B. Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flows and performance of hydrocyclone. v. 90, p. 55–69, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.03.017>>.

GOLMAEI, M.; KINNARINEN, T.; JERNSTRÖM, E.; HÄKKINEN, A. Efficient separation of hazardous trace metals and improvement of the filtration properties of green liquor dregs by a hydrocyclone. *Journal of Cleaner Production*, v. 183, p. 162–171, 2018. Disponível

em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.123>>.

GOMES, R. H. P. *Separação de emulsões óleo-água em hidrociclones*. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2002.

GONÇALVES, S. M. *Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um Hidrociclone Concentrador*. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2016.

GONÇALVES, S. M.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. Effects of Solids Concentration and Underflow Diameter on the Performance of a Newly Designed Hydrocyclone. *Chemical Engineering and Technology*, v. 40, n. 10, p. 1750–1757, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201600496>>.

HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*. Second ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 422p, 2008.

HUANG, C.; SUN, R.; LU, H.; YANG, Q.; HU, J.; WANG, H.; LIU, H. A pilot trial for fast deep desulfurization on MOF-199 by simultaneous adsorption-separation via hydrocyclones. *Separation and Purification Technology*, v. 182, p. 110–117, 2017a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.046>>.

HUANG, C.; WANG, JIAN-GANG; WANG, JUN-YE; CHEN, C.; WANG, H. Pressure drop and flow distribution in a mini-hydrocyclone group: UU-type parallel arrangement. *Separation and Purification Technology*, v. 103, p. 139–150, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.030>>.

HUANG, Y.; LI, J. PING; ZHANG, Y. HONG; WANG, H. LIN. High-speed particle rotation for coating oil removal by hydrocyclone. *Separation and Purification Technology*, v. 177, p. 263–271, 2017b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.001>>.

HWANG, K.; CHOU, S. Designing vortex finder structure for improving the particle separation efficiency of a hydrocyclone. *Separation and Purification Technology*, v. 172, p. 76–84, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.005>>.

HWANG, K.; HWANG, Y.; YOSHIDA, H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Science*, v. 85, p. 62–68, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2011.12.046>>.

HWANG, K.; HWANG, Y.; YOSHIDA, H.; SHIGEMORI, K. Improvement of particle separation efficiency by installing conical top-plate in hydrocyclone. *Powder Technology*, v. 232, p. 41–48, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.07.059>>.

JANK, A.; MÜLLER, W.; WALDHUBER, S.; GERKE, F.; EBNER, C.; BOCKREIS, A. Hydrocyclones for the separation of impurities in pretreated biowaste. *Waste Management*,

- v. 64, p. 12–19, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.001>>.
- JI, L.; KUANG, S.; QI, Z.; WANG, Y.; CHEN, J.; YU, A. Computational analysis and optimization of hydrocyclone size to mitigate adverse effect of particle density. v. 174, p. 251–263, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.034>>.
- KASHIWAYA, K.; NOUMACHI, T.; HIROYOSHI, N.; ITO, M.; TSUNEKAWA, M. Effect of particle shape on hydrocyclone classification. *Powder Technology*, v. 226, p. 147–156, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.036>>.
- KAWATRA, S K; BAKSHI, A.K.; RUSESKY, M.T. The effect of slurry viscosity on hydrocyclone classification. *International Journal of Mineral Processing*, v. 48, p. 39–50, 1996a. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(96\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(96)00012-9)>.
- KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K.; RUSESKY, M. T. Effect of Viscosity on The Cut (d50) Size of Hydrocyclone Classifiers. *Minerals Engineering*, v. 9, n. 8, p. 881–891, 1996b. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00079-9](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00079-9)>.
- KAWATRA, S. K.; EISELE, T. C. Rheological Effects in Grinding Circuits. *International Journal of Mineral Processing*, v. 22, p. 251–259, 1988. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0301-7516\(88\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0301-7516(88)90067-1)>.
- 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.003>>.
- KUANG, S.; QI, Z.; YU, A. B.; VINCE, A.; BARNETT, G. D.; BARNETT, P. J. CFD modeling and analysis of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones. *Minerals Engineering*, v. 62, p. 43–54, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.012>>.
- KYRIAKIDIS, Y. N. *Análise do Efeito de Variáveis Geométricas sobre o Desempenho de Hidrociclos Otimizados*. 2014. 148f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2014.
- KYRIAKIDIS, Y. N. *Otimização Geométrica de Hidrociclos a partir de um histórico em hidrociclonagem na FEQUI/UFU*. 2018. 125 f. Tese (Doutorado), UFU, Uberlândia, MG, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.808>>.
- KYRIAKIDIS, Y. N.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. Effect of variables related to the separation performance of a hydrocyclone with unprecedented geometric relationships. *Powder Technology*, v. 338, p. 645–653, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.064>>.

- 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.07.002>>.
- LI, C.; HUANG, Q. Rheology-Based Computational Fluid Dynamics Modeling for De-oiling Hydrocyclone Efficiency. *Chemical Engineering and Technology*, v. 39, n. 5, p. 899–908, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201500623>>.
- LILGE, E.O. Hydrocyclone Fundamentals. *Bull. Inst. Min. Metall.*, London, v. 71: p. 285-337, 1961.
- LIU, Y.; CHENG, Q.; ZHANG, B.; TIAN, F. Three-phase hydrocyclone separator - A review. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 100, n. 8, p. 554–560, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2015.04.026>>.
- LIU, Y.; WANG, H.; XU, Y.; TU, Q.; CHEN, X. Achieving enhanced denitrification via hydrocyclone treatment on mixed liquor recirculation in the anoxic/aerobic process. *Chemosphere*, v. 189, p. 206–212, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.056>>.
- LV, W.; CHEN, J.; CHANG, Y.; LIU, H.; WANG, H. UU-type parallel mini-hydrocyclone group separation of fine particles from methanol-to-olefin industrial wastewater. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, v. 131, n. March, p. 34–42, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.015>>.
- 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.01.008>>.
- MARTÍNEZ, L. F.; LAVÍN, A. G.; MAHAMUD, M. M.; BUENO, J. L. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 47, p. 192–199, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.03.003>>.
- MASSARANI, G. (COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro). *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 2^a edição ed. [S.l: s.n.], 2001.
- MEYER, M.; BOHNET, M. Influence of Entrance Droplet Size Distribution and Feed Concentration on Separation of Immiscible Liquids Using Hydrocyclones. *Chemical Engineering and Technology*, v. 26, p. 660–665, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.200390100>>.

MOGNON, J. L. *Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo*. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 2015.

MOGNON, J. L.; SILVA, J. M. DA; BICALHO, I. C.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R. Modular mini-hydrocyclone desilter type of 30 mm: An experimental and optimization study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 129, p. 145–152, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.02.037>>.

MOREIRA, B. A. *Estudo da Sedimentação em Suspensões de fluidos com características Reológicas Pseudoplásticas*. 2014. 173 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2014.

NARASIMHA, M.; BRENNAN, M. S.; HOLTHAM, P. N. CFD modeling of hydrocyclones : Prediction of particle size segregation. *Minerals Engineering*, v. 39, p. 173–183, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.05.010>>.

NARASIMHA, M.; MAINZA, A. N.; HOLTHAM, P. N.; POWELL, M. S.; BRENNAN, M. S. A semi-mechanistic model of hydrocyclones — Developed from industrial data and inputs from CFD. *International Journal of Mineral Processing*, v. 133, p. 1–12, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2014.08.006>>.

NARASIMHA, M.; SRIPRIYA, R.; BANERJEE, P. K. CFD modelling of hydrocyclone-prediction of cut size. *International Journal of Mineral Processing*, v. 75, p. 53–68, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.04.008>>.

NASCIMENTO, M. R. M.; BICALHO, I. C.; MOGNON, J. L.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R. Performance of a New Geometry of Deoiling Hydrocyclones: Experiments and Numerical Simulations. *Chemical Engineering and Technology*, v. 36, n. 1, p. 98–108, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201200258>>.

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

NEESSE, T.; SCHNEIDER, M.; DUECK, J.; GOLYK, V.; BUNTENBACH, S.; TIEFEL, H. Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge. *Minerals Engineering*, v. 17, n. 5, p. 733–737, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.014>>.

NENU, R. K. T.; YOSHIDA, H. Comparison of separation performance between single and two inlets hydrocyclones. *Advanced Powder Technology*, v. 20, n. 2, p. 195–202, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2008.08.004>>.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.047>>.

NOROOZI, S.; HASHEMABADI, S. H. CFD analysis of inlet chamber body profile effects on de-oiling hydrocyclone efficiency. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 89, n. 7, p. 968–977, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.017>>.

OLSON, T. J.; OMMEN, R. VAN. Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model. *Minerals Engineering*, v. 17, p. 713–720, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.12.008>>.

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. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0921-8831\(08\)60590-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8831(08)60590-7)>.

PALANIANDY, S.; YAHYAEI, M.; POWELL, M. Assessment of hydrocyclone operation in gravity induced stirred mill circuits. *Minerals Engineering*, v. 108, p. 83–92, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.002>>.

PANISSET, C. M. A. *Novas alternativas para o Sistema de Separação Sólido-Líquido na Perfuração de Poços de Petróleo: teste de uma unidade de VCS; busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclonagem; e tratamento da borra de centrifugação por microondas*. 2014. 278 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2014.

PATRA, G.; CHAKRABORTY, S.; MEIKAP, B. C. Role of vortex finder depth on pressure drop and performance efficiency in a ribbed hydrocyclone. *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 25, p. 103–109, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.001>>.

PATRA, G.; VELPURI, B.; CHAKRABORTY, S.; MEIKAP, B. C. Performance evaluation of a hydrocyclone with a spiral rib for separation of particles. *Advanced Powder Technology*, v. 28, n. 12, p. 3222–3232, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.10.002>>.

PEREIRA, F. A. R. *Escoamento laminar de líquidos Não-Newtonianos em seções anulares: Estudos de CFD e abordagem experimental*. Tese (Doutorado), UFU, Uberlândia-MG, 2006.

PEREIRA, M. S. *Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás*. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2010.

PÉREZ, D.; CORNEJO, P.; RODRÍGUEZ, C.; CONCHA, F. Transition from spray to roping in hydrocyclones. *Minerals Engineering*, v. 123, n. April, p. 71–84, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.008>>.

SALVADOR, F. F. *Estudo Experimental do Comportamento de um Hidrociclone com Cone e Cilindro Filtrantes*. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 2013.

SALVADOR, F. F. *Otimização Geométrica de Hidrociclos com Cilindros e cones Permeáveis*. 2017. 121 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2017.

SALVADOR, F. F.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. Effect of a Cylindrical Permeable Wall on the Performance of Hydrocyclones. n. 6, p. 1015–1022, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201500246>>.

SCHEID, C. M.; CALÇADA, L. A.; GONÇALVES, R. S. A.; MASSARANI, G. An Investigation of the Behavior of a Classifying Hydrocyclone with Pseudoplastic Fluids. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 30, n. 04, p. 781–791, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-66322013000400010>>.

SILVA, D. O. *Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclos Mediante Modificações Geométricas*. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2012.

SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. Optimization of Design and Performance of Solid-Liquid Separators: A Thickener Hydrocyclone. *Chemical Engineering and Technology*, v. 38, n. 2, p. 319–326, 2015a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201300464>>.

SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; LOBATO, F. S.; BARROZO, M. A. S. Optimization of the design and performance of hydrocyclones by Differential Evolution technique. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, v. 61, p. 1–7, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2012.07.002>>.

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

SILVA, N. K. G.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. Effects of underflow diameter and vortex finder length on the performance of a newly designed filtering hydrocyclone. *Powder Technology*, v. 286, p. 305–310, 2015b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.036>>.

SOUZA, F. J. *Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante*. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 1999.

SOUZA, F. J.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone.

Powder Technology, v. 107, p. 259–267, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00248-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00248-X)>.

SURESH, P. D.; KUMAR, V.; SRIPRIYA, R.; CHAKRABORTY, S.; MEIKAP, B. C. Performance characteristics of pilot plant dense media hydrocyclone for beneficiation of coal and 3-D CFD simulation. *Chemical Engineering Science*, v. 65, n. 16, p. 4661–4671, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2010.05.006>>.

SVAROVSKY, L. *Hydrocyclone*. Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK. 198p, 1984.

SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. Fourth ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.

SWAIN, S.; MOHANTY, S. A 3-dimensional Eulerian – Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone. *Applied Mathematical Modeling*, v. 37, p. 2921–2932, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.06.007>>.

TANG, B.; XU, Y.; SONG, X.; SUN, Z.; YU, J. Effect of inlet configuration on hydrocyclone performance. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 27, n. 7, p. 1645–1655, 2017. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60187-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60187-0)>.

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. Disponível em: <<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. Disponível em: <[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. Separation and Purification Technology An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, v. 206, n. May, p. 268–285, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.015>>.

UPADRASHTA, K. R.; KETCHAM, V. J.; MILLER, J. D. Tangential Velocity Profile for Pseudoplastic Power-Law Fluids in the Hydrocyclone - A Theoretical Derivation. *International Journal of Mineral Processing*, v. 20, p. 309–318, 1987. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0301-7516\(87\)90073-1](https://doi.org/10.1016/0301-7516(87)90073-1)>.

VAKAMALLA, T. R.; KORUPROLU, V. B. R.; ARUGONDA, R.; MANGADODDY, N. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using

multiphase CFD model. *Separation and Purification Technology*, v. 175, p. 481–497, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.026>>.

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

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

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

VIEIRA, L. G. M.; BARBOSA, E. A.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Performance Analysis and Design of Filtering Hydrocyclones. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 01, p. 143–152, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-66322005000100015>>.

VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S. Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator. *Minerals Engineering*, v. 57, p. 50–56, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.11.014>>.

VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 49, p. 460–467, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.03.011>>.

VIEIRA, L. G. M.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S. Effect of Inlet Diameter on the Performance of a Filtering Hydrocyclone Separator. *Chemical Engineering and Technology*, v. 39, n. 8, p. 1406–1412, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201500724>>.

VIEIRA, L. G. M.; SILVÉRIO, B. C.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Performance of hydrocyclones with different geometries. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 89, n. 4, p. 655–662, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/cjce.20461>>.

WANG, B.; CHU, K. W.; YU, A. B.; VINCE, A.; BARNETT, G. D.; BARNETT, P. J. Computational study of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones : Effect of body dimensions. *Minerals Engineering*, v. 24, p. 19–34, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.003>>.

WANG, B.; YU, A. B. Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*, v. 19, n. 10, p. 1022–1033, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.016>>.

WANG, B.; YU, A. B. Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones

with different configuration of vortex finder. *Chemical Engineering Journal*, v. 135, p. 33–42, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.009>>.

WANG, C.; JI, C.; ZOU, J. Simulation and Experiment on Transitional Behaviours of Multiphase Flow in a Hydrocyclone. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 93, n. August, p. 1802–1811, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/cjce.22274>>.

WANG, C.; WU, R. Experimental and simulation of a novel hydrocyclone-tubular membrane as overflow pipe. *Separation and Purification Technology*, v. 198, p. 60–67, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.034>>.

WANG, J.; BAI, Z.; YANG, Q.; FAN, Y.; WANG, H. Investigation of the simultaneous volumetric 3-component flow field inside a hydrocyclone. *Separation and Purification Technology*, v. 163, p. 120–127, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.02.022>>.

WANG, L. Z.; WANG, J. M. Experimental study of the drag reduction and separation efficiency for a new hydrocyclone with a Reducing Pressure Drop Stick. *Separation and Purification Technology*, v. 98, p. 7–15, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.008>>.

WU, S.; HWANG, K.; CHENG, T.; HUNG, T.; TUNG, K. Effectiveness of a hydrocyclone in separating particles suspended in power law fluids. *Powder Technology*, v. 320, p. 546–554, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.088>>.

XU, X.; YANG, Q.; WANG, C.; GE, X.; WANG, H. Dissolved gas separation using the pressure drop and centrifugal characteristics of an inner cone hydrocyclone. *Separation and Purification Technology*, v. 161, p. 121–128, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.006>>.

YANG, L.; TIAN, J.; YANG, Z.; LI, Y.; FU, C.; ZHU, Y. Numerical analysis of non-Newtonian rheology effect on hydrocyclone flow field. *Petroleum*, v. 1, p. 68–74, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.05.001>>.

YANG, Q.; WANG, H.; LIU, Y.; LI, Z. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations. *Separation and Purification Technology*, v. 74, n. 3, p. 271–279, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2010.06.014>>.

YU, J.; FU, J.; CHENG, H.; CUI, Z. Recycling of rare earth particle by mini-hydrocyclones. *Waste Management*, v. 61, p. 362–371, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.014>>.

ZHANG, C.; WEI, D.; CUI, B.; LI, T.; LUO, N. Effects of curvature radius on separation behaviors of the hydrocyclone with a tangent-circle inlet. *Powder Technology*, v.

305, p. 156–165, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.002>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ie100210c>>.

ZHEN-BO, W.; YI, M.; YOU-HAI, J. Simulation and experiment of flow field in axial-flow hydrocyclone. v. 89, n. June, p. 603–610, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.09.004>>.

ZHOU, Q.; WANG, C.; WANG, H.; WANG, J. Eulerian-Lagrangian study of dense liquid – solid flow in an industrial-scale cylindrical hydrocyclone. *International Journal of Mineral Processing*, v. 151, p. 40–50, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.04.005>>.

ZHU, G.; LIOW, J. Experimental study of particle separation and the fishhook effect in a mini-hydrocyclone. *Chemical Engineering Science*, v. 111, p. 94–105, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.02.017>>.

ZHU, G.; LIOW, J.; NEELY, A. Computational study of the flow characteristics and separation efficiency in a mini-hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 90, n. 12, p. 2135–2147, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.020>>.

APÊNDICE A

A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE MAX

Tabela A – Resultados experimentais do Hidrociclone MAX

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
1	-1	-1	-1	-1	+1	40	3,3	2,4	22,8	435,1	3,8	1461	33,2	30,6	33,9	34,6	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	-1	0	35	3,3	2,5	18,6	413,6	4,4	1415	29,9	26,6	36,9	37,7	27	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	-1	-1	30	3,3	2,6	14,3	391,7	5,2	1352	25,3	21,3	43,0	44,3	26	0,16	0,70	16,4
2	-1	-1	-1	+1	+1	40	3,4	2,4	28,0	437,6	2,7	1445	29,9	28,0	37,8	38,3	28	0,14	0,71	15,9
	-1	-1	-1	+1	0	35	3,4	2,6	24,2	416,6	3,0	1395	26,9	24,6	39,9	40,5	28	0,14	0,71	15,9
	-1	-1	-1	+1	-1	30	3,4	2,6	19,9	393,7	3,4	1339	23,9	21,2	43,7	44,5	28	0,14	0,71	15,9
3	-1	-1	+1	-1	+1	40	3,4	2,4	9,7	447,1	13,1	1385	40,1	31,1	30,0	33,1	29	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	-1	0	35	3,4	2,5	8,6	423,0	13,9	1353	37,5	27,4	32,0	35,6	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	-1	-1	30	3,4	2,5	7,5	393,8	15,1	1338	35,2	23,6	34,4	38,9	28	0,16	0,70	16,4
4	-1	-1	+1	+1	+1	40	3,4	2,4	10,5	438,9	11,6	1436	38,6	30,5	32,6	35,3	28	0,14	0,71	15,9
	-1	-1	+1	+1	0	35	3,4	2,6	8,9	416,2	12,8	1397	36,0	26,6	34,7	38,1	27	0,14	0,71	15,9
	-1	-1	+1	+1	-1	30	3,3	2,6	7,6	400,0	13,5	1296	31,9	21,2	41,4	45,9	26	0,14	0,71	15,9
5	-1	+1	-1	-1	+1	40	3,4	3,1	9,0	463,6	7,0	1288	19,4	13,4	55,6	58,0	31	0,79	0,60	37,7
	-1	+1	-1	-1	0	35	3,4	3,1	6,1	441,8	9,1	1241	16,8	8,4	74,9	78,3	30	0,79	0,60	37,7
	-1	+1	-1	-1	-1	30	3,8	3,6	4,4	414,2	13,6	1210	15,9	2,7	80,5	85,6	30	0,79	0,60	37,7
6	-1	+1	-1	+1	+1	40	3,6	3,3	8,9	467,5	5,9	1267	15,3	10,0	72,7	75,8	31	0,71	0,62	37,0
	-1	+1	-1	+1	0	35	3,6	3,3	6,7	439,7	7,5	1253	14,4	7,5	81,7	85,2	31	0,71	0,62	37,0
	-1	+1	-1	+1	-1	30	3,6	3,4	5,1	420,5	9,9	1174	14,2	4,8	83,04	87,79	30	0,71	0,62	37,0
7	-1	+1	+1	-1	+1	40	3,4	3,0	5,3	477,3	19,5	1215	30,7	14,0	53,6	61,2	30	0,85	0,60	38,4
	-1	+1	+1	-1	0	35	3,4	3,1	4,6	449,9	21,4	1197	29,4	10,2	62,8	74,4	30	0,85	0,60	38,4
	-1	+1	+1	-1	-1	30	3,2	3,1	3,7	427,5	24,3	1135	28,6	5,7	66,9	79,2	28	0,85	0,60	38,4

Continua

Continuação Tabela A.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
8	-1	+1	+1	+1	+1	40	3,7	3,2	5,5	474,9	17,6	1229	27,1	11,6	52,6	60,1	33	0,75	0,61	37,6
	-1	+1	+1	+1	0	35	3,6	3,3	4,9	452,5	19,2	1184	26,2	8,6	61,78	72,68	32	0,75	0,61	37,6
	-1	+1	+1	+1	-1	30	3,6	3,5	4,2	432,9	21,2	1108	24,8	4,6	74,4	85,8	31	0,75	0,61	37,6
9	+1	-1	-1	-1	+1	40	8,1	6,6	25,5	439,0	5,5	1435	21,6	17,0	47,5	48,9	27	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	-1	-1	0	35	8,0	6,9	22,7	418,1	6,0	1385	20,5	15,4	49,9	51,5	27	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	-1	-1	-1	30	7,9	7,0	19,2	396,2	6,9	1321	19,2	13,2	54,7	56,9	27	0,20	0,70	20,3
10	+1	-1	-1	+1	+1	40	7,9	6,6	26,2	431,6	4,7	1484	19,4	15,5	50,7	52,0	27	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	-1	+1	0	35	7,9	6,9	23,4	409,5	5,1	1443	18,2	13,8	54,1	55,7	26	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	-1	+1	-1	30	7,9	7,1	18,2	388,8	6,3	1372	16,3	10,6	62,7	65,0	25	0,20	0,70	20,3
11	+1	-1	+1	-1	+1	40	8,0	6,5	15,8	447,5	16,2	1381	34,8	22,2	37,2	42,0	27	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	+1	-1	0	35	8,0	6,7	14,5	423,7	17,0	1348	33,0	19,2	40,1	45,8	27	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	+1	-1	-1	30	7,9	6,8	12,3	396,4	18,8	1320	30,6	14,5	45,3	53,3	26	0,20	0,70	20,3
12	+1	-1	+1	+1	+1	40	8,0	6,3	17,1	441,6	14,3	1419	34,0	22,9	37,5	41,7	29	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	+1	+1	0	35	8,0	6,6	15,5	421,6	15,2	1362	32,0	19,8	41,1	46,2	29	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	+1	+1	-1	30	8,0	6,9	13,4	393,8	16,6	1338	29,6	15,6	45,7	52,3	28	0,20	0,70	20,3
13	+1	+1	-1	-1	+1	40	7,9	7,7	10,2	451,6	12,7	1357	16,6	4,6	84,5	90,2	29	0,95	0,59	42,1
	+1	+1	-1	-1	0	35	7,9	7,8	9,2	427,8	14,1	1323	16,5	2,8	96,5	103,1	29	0,95	0,59	42,1
	+1	+1	-1	-1	-1	30	7,9	7,8	8,5	404,7	16,6	1232	17,6	1,4	100,8	108,2	28	0,95	0,59	42,1
14	+1	+1	-1	+1	+1	40	7,9	7,6	10,0	455,7	11,3	1332	14,8	3,9	90,3	97,3	28	0,81	0,62	43,0
	+1	+1	-1	+1	0	35	7,9	7,7	9,1	433,4	13,3	1288	15,5	2,6	104,0	113,7	27	0,81	0,62	43,0
	+1	+1	-1	+1	-1	30	7,8	7,8	8,3	415,1	15,3	1206	16,2	1,1	116,1	127,1	25	0,81	0,62	43,0
15	+1	+1	+1	-1	+1	40	8,0	7,7	8,9	465,3	25,8	1279	29,2	4,6	70,5	81,5	29	0,99	0,59	42,1
	+1	+1	+1	-1	0	35	7,9	7,8	8,5	444,3	28,0	1227	30,2	3,2	74,4	88,3	29	0,99	0,59	42,1
	+1	+1	+1	-1	-1	30	7,9	7,7	8,0	421,2	30,7	1170	31,2	0,8	85,2	104,2	28	0,99	0,59	42,1
16	+1	+1	+1	+1	+1	40	7,9	7,6	9,0	475,7	24,0	1223	27,6	4,7	75,2	92,3	29	0,88	0,60	42,3
	+1	+1	+1	+1	0	35	7,9	7,7	8,4	449,2	26,6	1200	28,3	2,3	83,0	97,5	28	0,88	0,60	42,3
	+1	+1	+1	+1	-1	30	7,8	7,7	8,1	426,1	29,3	1143	30,4	1,6	89,3	107,7	28	0,88	0,60	42,3

Continua

Continuação Tabela A.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
17	-2	0	0	0	+1	40	1,4	1,1	3,8	462,2	9,9	1295	28,3	20,4	45,0	47,5	28	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	0	35	1,4	1,2	3,2	435,3	11,2	1277	26,5	17,2	49,1	52,2	27	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	-1	30	1,4	1,2	2,7	409,5	13,7	1237	24,5	13,7	53,7	57,3	27	0,28	0,67	22,5
18	+2	0	0	0	+1	40	10,3	9,2	14,0	452,3	17,1	1352	24,4	8,8	65,3	79,4	28	0,17	0,77	29,0
	+2	0	0	0	0	35	10,2	9,6	12,5	430,0	19,2	1309	24,1	6,1	72,7	85,1	27	0,17	0,77	29,0
	+2	0	0	0	-1	30	10,2	9,8	11,0	408,0	20,9	1246	22,7	2,2	74,9	86,9	26	0,17	0,77	29,0
19	0	-2	0	0	+1	40	5,3	2,4	34,6	427,0	4,6	1518	43,5	40,7	24,1	25,3	28	0,01	0,99	10,2
	0	-2	0	0	0	35	5,3	2,5	32,9	400,0	4,9	1513	42,4	39,5	25,3	26,4	28	0,01	0,99	10,2
	0	-2	0	0	-1	30	5,3	2,6	30,1	373,2	5,3	1490	40,5	37,2	26,2	27,4	28	0,01	0,99	10,2
20	0	+2	0	0	+1	40	5,3	5,2	5,4	476,8	29,4	1218	30,0	0,7	72,5	89,3	31	3,18	0,48	58,5
	0	+2	0	0	0	35	5,3	5,4	5,4	454,1	31,2	1174	31,7	0,8	76,9	98,7	30	3,18	0,48	58,5
	0	+2	0	0	-1	30	5,3	5,2	5,3	436,3	33,3	1092	33,4	0,2	86,2	110,6	29	3,18	0,48	58,5
21	0	0	-2	0	+1	40	5,8	4,8	27,5	458,5	2,8	1317	17,4	15,0	51,9	52,7	30	0,21	0,73	27,7
	0	0	-2	0	0	35	5,8	5,2	21,4	431,4	3,7	1302	16,5	13,3	56,3	57,5	30	0,21	0,73	27,7
	0	0	-2	0	-1	30	5,8	5,1	15,6	403,2	4,9	1277	15,0	10,5	62,9	64,6	30	0,21	0,73	27,7
22	0	0	+2	0	+1	40	5,7	4,5	8,9	480,9	27,4	1196	43,7	22,5	33,4	43,7	29	0,21	0,73	27,7
	0	0	+2	0	0	35	5,8	4,7	8,4	451,2	29,4	1189	43,5	20,1	32,6	46,9	29	0,21	0,73	27,7
	0	0	+2	0	-1	30	5,7	5,1	7,1	426,5	33,3	1141	41,9	13,0	36,0	53,4	29	0,21	0,73	27,7
23	0	0	0	-2	+1	40	5,6	4,3	14,4	470,9	11,6	1249	32,7	23,9	38,2	41,7	30	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	-2	0	35	5,7	4,5	12,0	444,7	13,1	1225	29,6	19,1	43,9	48,6	30	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	-2	-1	30	5,6	4,7	9,6	416,6	15,9	1196	28,4	14,8	48,4	54,3	29	0,19	0,74	27,1
24	0	0	0	+2	+1	40	5,6	4,6	12,9	475,0	11,4	1227	28,5	19,3	51,9	55,9	30	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	+2	0	35	5,6	4,8	11,2	448,3	13,1	1205	27,7	16,8	55,3	59,9	29	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	+2	-1	30	5,6	5,0	9,3	425,8	14,9	1145	25,5	12,5	57,6	65,6	29	0,19	0,74	27,1

Continua

Continuação Tabela A.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
25	0	0	0	0	+1	40	5,9	5,0	10,1	464,9	16,2	1281	29,1	15,4	36,8	40,4	30	0,41	0,65	27,4
	0	0	0	0	0	35	5,8	5,3	8,4	443,1	19,0	1234	28,3	11,5	43,5	51,3	30	0,41	0,65	27,4
	0	0	0	0	-1	30	5,8	5,5	7,4	424,6	20,5	1151	26,6	7,7	65,7	75,5	29	0,41	0,65	27,4
	0	0	0	0	-2	25	5,8	5,6	6,6	400,4	23,0	1079	26,5	4,6	70,0	80,2	29	0,41	0,65	27,4
26	0	0	0	0	+2	45	5,8	4,6	14,5	485,0	11,7	1325	32,1	23,1	39,4	42,7	31	0,23	0,72	27,6
	0	0	0	0	+1	40	5,8	4,7	12,3	464,8	13,4	1281	30,7	20,0	42,2	46,4	30	0,23	0,72	27,6
	0	0	0	0	0	35	5,8	5,0	10,5	441,0	16,3	1245	30,9	17,5	47,9	53,2	29	0,23	0,72	27,6
	0	0	0	0	-1	30	5,8	5,0	8,9	415,8	19,2	1201	30,5	14,0	56,2	61,6	29	0,23	0,72	27,6
27	0	0	0	0	+1	40	5,5	4,3	13,3	475,4	11,9	1225	31,4	22,1	41,0	45,0	29	0,16	0,76	26,3
	0	0	0	0	0	35	5,4	4,5	11,0	453,9	13,5	1175	28,9	17,8	46,4	51,7	28	0,16	0,76	26,3
	0	0	0	0	-1	30	5,5	4,6	9,8	422,3	15,0	1164	28,1	15,4	50,0	56,6	28	0,16	0,76	26,3

APÊNDICE B

B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE HOT

Tabela B – Resultados experimentais do Hidrociclone HOT

<i>Exp.</i>	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>X4</i>	<i>X5</i>	$-\Delta P$ [psi]	<i>C_{VA}</i> [%]	<i>C_{VO}</i> [%]	<i>C_{VU}</i> [%]	<i>Q_A</i> [cm ³ /s]	<i>R_L</i> [%]	<i>E_u</i> [-]	η [%]	η' [%]	<i>d₅₀</i> [μm]	<i>d'₅₀</i> [μm]	<i>T</i> [°C]	<i>K</i> [Pa.s ⁿ]	<i>n</i> [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
1	-1	-1	-1	-1	+1	40	3,4	1,8	15,9	433,0	8,8	1476	47,7	42,6	36,3	38,7	29	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	-1	0	35	3,4	2,1	14,0	412,1	9,6	1426	43,7	37,7	38,0	40,6	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	-1	-1	30	3,5	2,3	12,0	389,4	10,6	1368	39,9	32,8	42,9	45,6	28	0,16	0,70	16,4
2	-1	-1	-1	+1	+1	40	3,4	2,0	15,5	434,2	9,3	1468	48,4	43,1	34,8	37,3	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	+1	0	35	3,5	2,2	13,5	409,0	10,3	1447	44,0	37,6	37,6	40,3	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	+1	-1	30	3,5	2,4	11,6	388,8	11,3	1373	40,1	32,5	42,7	45,6	28	0,16	0,70	16,4
3	-1	-1	+1	-1	+1	40	3,4	1,8	8,8	438,7	21,6	1438	58,2	46,7	19,2	24,2	29	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	-1	0	35	3,4	2,1	7,9	416,6	23,6	1395	57,4	44,2	19,5	25,6	29	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	-1	-1	30	3,4	2,1	7,0	398,4	25,7	1307	54,1	38,2	21,5	29,3	28	0,16	0,70	16,4
4	-1	-1	+1	+1	+1	40	3,5	1,8	9,0	441,9	22,3	1417	60,6	49,3	19,7	25,0	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	+1	0	35	3,5	2,1	7,7	419,7	24,8	1374	56,4	42,0	21,1	28,1	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	+1	-1	30	3,5	2,3	6,7	393,0	27,3	1343	54,6	37,6	21,7	30,1	28	0,16	0,70	16,4
5	-1	+1	-1	-1	+1	40	3,7	3,1	6,9	450,6	16,4	1364	31,7	18,3	49,9	56,6	31	0,89	0,59	37,0
	-1	+1	-1	-1	0	35	3,7	3,3	5,8	429,9	17,7	1311	28,7	13,3	57,0	65,2	30	0,89	0,59	37,0
	-1	+1	-1	-1	-1	30	3,7	3,4	4,9	398,2	19,3	1309	25,8	8,1	64,8	74,1	28	0,89	0,59	37,0
6	-1	+1	-1	+1	+1	40	3,7	3,2	6,4	451,3	17,7	1361	31,3	16,5	44,5	50,9	33	0,75	0,61	37,0
	-1	+1	-1	+1	0	35	3,6	3,3	5,3	429,3	18,8	1314	27,9	11,3	53,4	61,5	30	0,75	0,61	37,0
	-1	+1	-1	+1	-1	30	3,8	3,4	5,0	401,0	19,3	1291	26,1	8,4	58,6	67,6	30	0,75	0,61	37,0
7	-1	+1	+1	-1	+1	40	3,7	2,9	5,1	463,7	36,7	1288	52,5	25,0	28,6	47,7	32	0,92	0,59	36,3
	-1	+1	+1	-1	0	35	3,7	3,1	4,8	446,9	38,4	1213	50,8	20,0	31,3	54,4	30	0,92	0,59	36,3
	-1	+1	+1	-1	-1	30	3,6	3,2	4,2	418,8	42,6	1183	48,5	10,2	38,0	62,4	27	0,92	0,59	36,3

Continua

Continuação Tabela B.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
8	-1	+1	+1	+1	+1	40	3,6	2,9	4,8	472,5	38,0	1239	50,7	20,5	27,6	46,0	29	0,76	0,61	37,2
	-1	+1	+1	+1	0	35	3,6	3,0	4,4	448,6	40,3	1203	50,2	16,5	31,0	52,0	28	0,76	0,61	37,2
	-1	+1	+1	+1	-1	30	3,5	3,1	4,0	422,9	43,6	1160	49,2	10,0	31,8	56,5	27	0,76	0,61	37,2
9	+1	-1	-1	-1	+1	40	7,9	5,6	24,2	433,4	10,5	1474	39,2	32,1	40,8	43,6	29	0,18	0,71	19,7
	+1	-1	-1	-1	0	35	7,9	5,7	21,9	407,4	11,3	1459	36,9	28,8	43,8	46,9	29	0,18	0,71	19,7
	+1	-1	-1	-1	-1	30	8,1	6,1	19,1	383,2	12,5	1413	33,7	24,2	47,9	51,2	28	0,18	0,71	19,7
10	+1	-1	-1	+1	+1	40	8,0	5,8	22,6	427,6	11,2	1513	37,6	29,7	41,9	44,9	28	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	-1	+1	0	35	8,1	6,4	20,4	410,7	11,9	1435	34,8	26,0	44,2	47,4	28	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	-1	+1	-1	30	8,1	6,4	17,8	384,5	12,7	1404	31,0	20,9	48,4	51,7	28	0,20	0,70	20,3
11	+1	-1	+1	-1	+1	40	8,0	4,9	15,7	444,8	25,9	1398	55,8	40,3	22,3	28,0	27	0,18	0,71	19,7
	+1	-1	+1	-1	0	35	8,0	5,3	14,1	420,0	28,0	1371	52,6	34,2	24,1	31,1	26	0,18	0,71	19,7
	+1	-1	+1	-1	-1	30	7,9	5,8	12,6	394,7	30,8	1331	52,0	30,6	24,9	33,2	25	0,18	0,71	19,7
12	+1	-1	+1	+1	+1	40	8,2	5,1	15,6	443,1	26,6	1410	55,4	39,2	22,3	28,1	29	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	+1	+1	0	35	8,2	5,4	14,4	423,0	27,7	1353	52,5	34,3	24,5	31,4	29	0,20	0,70	20,3
	+1	-1	+1	+1	-1	30	8,2	5,7	13,2	402,6	29,4	1280	50,2	29,4	26,3	34,7	28	0,20	0,70	20,3
13	+1	+1	-1	-1	+1	40	7,7	7,0	8,9	454,3	19,2	1340	22,7	4,3	80,2	87,8	25	0,90	0,60	41,6
	+1	+1	-1	-1	0	35	7,5	7,3	8,4	429,7	19,4	1309	21,9	3,2	86,0	94,2	24	0,90	0,60	41,6
	+1	+1	-1	-1	-1	30	7,4	7,3	8,0	405,9	20,2	1258	21,7	1,8	90,2	99,1	25	0,90	0,60	41,6
14	+1	+1	-1	+1	+1	40	7,7	7,1	10,5	453,3	18,3	1347	25,8	9,2	66,6	82,9	29	0,84	0,61	41,8
	+1	+1	-1	+1	0	35	7,6	7,3	9,2	429,4	18,9	1313	23,2	5,2	79,2	90,6	28	0,84	0,61	41,8
	+1	+1	-1	+1	-1	30	7,6	7,5	8,5	401,2	20,0	1289	22,4	3,1	86,6	96,4	26	0,84	0,61	41,8
15	+1	+1	+1	-1	+1	40	7,5	6,7	8,7	475,5	42,8	1223	50,1	12,7	33,7	70,6	27	0,92	0,59	41,2
	+1	+1	+1	-1	0	35	7,5	6,8	8,4	448,0	44,1	1206	49,9	10,4	34,0	83,7	26	0,92	0,59	41,2
	+1	+1	+1	-1	-1	30	7,5	7,0	8,1	420,7	45,9	1172	49,5	6,7	41,4	94,3	26	0,92	0,59	41,2
16	+1	+1	+1	+1	+1	40	7,6	6,7	8,8	472,3	43,6	1241	51,2	13,4	31,5	64,1	29	0,87	0,60	40,7
	+1	+1	+1	+1	0	35	7,6	6,9	8,5	452,2	44,3	1184	50,2	10,6	32,0	71,9	28	0,87	0,60	40,7
	+1	+1	+1	+1	-1	30	7,6	6,9	8,2	429,3	45,7	1125	49,5	7,1	36,5	83,2	27	0,87	0,60	40,7

Continua

Continuação Tabela B.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
17	-2	0	0	0	+1	40	1,3	0,9	2,7	448,2	20,8	1377	43,9	29,1	29,7	34,4	28	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	0	35	1,3	1,0	2,4	427,9	22,8	1322	42,1	25,1	32,1	38,1	28	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	-1	30	1,3	1,0	2,1	403,3	24,6	1276	39,7	20,0	34,2	42,1	28	0,28	0,67	22,5
18	+2	0	0	0	+1	40	10,3	8,1	15,8	446,9	24,2	1385	39,5	20,2	38,6	45,7	28	0,17	0,77	29,0
	+2	0	0	0	0	35	10,3	8,5	14,2	428,3	26,5	1319	38,0	15,6	42,0	50,5	27	0,17	0,77	29,0
	+2	0	0	0	-1	30	10,3	8,9	13,2	403,1	28,6	1276	38,0	13,1	42,8	52,8	26	0,17	0,77	29,0
19	0	-2	0	0	+1	40	5,4	1,6	24,1	430,8	12,6	1491	70,4	66,2	13,0	15,1	28	0,01	0,99	10,2
	0	-2	0	0	0	35	5,4	1,7	21,8	406,5	14,1	1465	69,1	64,1	12,8	15,1	27	0,01	0,99	10,2
	0	-2	0	0	-1	30	5,4	1,8	19,2	380,5	15,8	1432	66,1	59,7	14,1	16,8	26	0,01	0,99	10,2
20	0	+2	0	0	+1	40	5,3	5,2	5,7	485,6	37,6	1175	40,4	4,5	48,8	74,2	31	2,95	0,49	58,4
	0	+2	0	0	0	35	5,3	5,2	5,6	462,0	38,2	1135	40,0	2,8	51,2	78,0	30	2,95	0,49	58,4
	0	+2	0	0	-1	30	5,3	5,3	5,4	430,7	38,6	1118	40,8	1,7	53,4	88,1	28	2,95	0,49	58,4
21	0	0	-2	0	+1	40	5,7	4,8	14,2	448,7	8,6	1375	23,4	16,2	54,3	56,9	30	0,40	0,65	26,7
	0	0	-2	0	0	35	5,7	5,0	12,1	424,6	9,1	1344	20,8	12,9	63,1	65,9	30	0,40	0,65	26,7
	0	0	-2	0	-1	30	5,7	5,4	9,9	396,6	9,8	1319	17,8	8,9	67,0	72,4	29	0,40	0,65	26,7
22	0	0	+2	0	+1	40	5,7	4,0	8,1	469,9	40,4	1254	58,7	30,6	19,1	31,9	29	0,42	0,64	26,4
	0	0	+2	0	0	35	5,6	4,2	7,7	454,2	41,1	1174	57,8	28,3	19,0	36,2	29	0,42	0,64	26,4
	0	0	+2	0	-1	30	5,8	4,4	7,2	427,8	43,9	1134	55,6	21,0	20,3	40,4	29	0,42	0,64	26,4
23	0	0	0	-2	+1	40	5,6	3,5	11,3	464,1	25,4	1286	54,1	38,4	22,7	30,3	31	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	-2	0	35	5,6	3,9	10,2	435,1	27,7	1280	52,7	34,6	24,2	33,5	30	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	-2	-1	30	5,6	4,1	9,3	407,7	29,8	1249	51,2	30,4	25,6	35,3	30	0,19	0,74	27,1
24	0	0	0	+2	+1	40	5,6	3,8	10,8	464,9	25,9	1280	52,9	36,5	23,65	31,63	28	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	+2	0	35	5,6	4,0	9,7	444,0	27,7	1227	50,3	31,2	25,64	34,61	27	0,19	0,74	27,1
	0	0	0	+2	-1	30	5,6	4,2	8,6	417,5	30,1	1190	48,2	25,9	27,75	38,46	27	0,19	0,74	27,1

Continua

Continuação Tabela B.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
25	0	0	0	0	+1	40	5,7	4,1	9,1	469,7	30,0	1254	49,1	27,3	26,9	38,9	29	0,40	0,65	26,5
	0	0	0	0	0	35	5,7	4,3	8,4	449,6	31,7	1198	48,3	24,3	27,4	41,4	29	0,40	0,65	26,5
	0	0	0	0	-1	30	5,7	4,7	7,8	420,8	33,0	1172	46,3	20,0	29,5	45,0	29	0,40	0,65	26,5
	0	0	0	0	-2	25	5,7	4,8	7,3	391,0	33,8	1131	43,8	15,2	32,3	47,4	29	0,40	0,65	26,5
26	0	0	0	0	+2	45	5,7	3,5	12,2	486,5	24,1	1317	54,9	40,6	22,6	29,4	31	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	+1	40	5,7	3,7	11,1	472,6	25,3	1240	51,6	35,3	24,9	31,4	31	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	0	35	5,8	4,0	10,2	443,8	27,6	1230	50,7	32,1	26,3	34,0	30	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	-1	30	5,7	4,2	8,9	426,4	29,7	1142	47,9	25,8	29,0	38,4	30	0,21	0,73	27,7
27	0	0	0	0	+1	40	5,5	3,6	10,6	473,9	25,5	1232	52,0	35,6	24,4	34,2	29	0,16	0,76	26,3
	0	0	0	0	0	35	5,5	3,9	9,3	448,9	28,3	1201	50,4	30,9	26,0	35,9	28	0,16	0,76	26,3
	0	0	0	0	-1	30	5,4	4,0	8,4	422,1	30,6	1164	48,9	26,4	27,1	38,8	27	0,16	0,76	26,3

APÊNDICE C

C - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE HGOT1

Tabela C – Resultados experimentais do Hidrociclone HGOT1

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
1	-1	-1	-1	-1	+1	40	3,4	2,5	5,2	396,1	33,4	1764	51,9	27,8	28,7	44,4	29	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	-1	-1	0	35	3,4	2,7	5,1	388,6	32,0	1604	49,1	25,1	32,8	46,0	29	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	-1	-1	-1	30	3,4	2,7	4,7	371,2	32,6	1506	46,2	20,2	35,6	50,4	28	0,15	0,71	16,0
2	-1	-1	-1	+1	+1	40	3,4	2,7	4,8	394,0	35,7	1783	50,8	23,4	24,8	36,6	29	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	-1	+1	0	35	3,4	2,8	4,5	373,2	37,2	1739	50,2	20,6	24,9	38,2	28	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	-1	+1	-1	30	3,4	2,9	4,3	354,4	38,7	1652	49,3	17,2	25,2	41,2	28	0,15	0,71	16,0
3	-1	-1	+1	-1	+1	40	3,4	2,6	3,9	466,3	60,6	1273	71,2	26,9	10,9	27,7	29	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	+1	-1	0	35	3,5	2,3	4,0	441,5	60,3	1242	68,5	20,6	11,3	29,5	29	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	+1	-1	-1	30	3,5	2,6	4,0	415,7	58,5	1201	66,6	19,5	11,3	30,5	29	0,15	0,71	16,0
4	-1	-1	+1	+1	+1	40	3,3	2,7	3,8	468,1	60,8	1262	69,5	22,3	9,9	30,4	27	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	+1	+1	0	35	3,4	2,8	3,7	453,5	60,9	1176	67,3	16,4	10,1	32,3	26	0,15	0,71	16,0
	-1	-1	+1	+1	-1	30	3,4	2,8	3,6	420,3	62,8	1174	66,3	9,4	10,4	34,3	26	0,15	0,71	16,0
5	-1	+1	-1	-1	+1	40	3,6	3,4	4,0	463,4	34,6	1289	38,2	5,5	55,3	71,6	30	0,58	0,64	35,7
	-1	+1	-1	-1	0	35	3,6	3,4	3,8	433,9	35,3	1286	37,9	4,1	56,3	73,6	28	0,58	0,64	35,7
	-1	+1	-1	-1	-1	30	3,5	3,4	3,6	413,7	35,6	1212	37,6	3,2	59,3	78,4	27	0,58	0,64	35,7
6	-1	+1	-1	+1	+1	40	3,4	3,2	3,7	438,9	39,1	1437	42,9	6,3	39,3	67,7	30	0,76	0,61	39,3
	-1	+1	-1	+1	0	35	3,3	3,2	3,5	410,2	40,4	1438	42,4	3,4	46,8	68,8	28	0,76	0,61	39,3
	-1	+1	-1	+1	-1	30	3,1	3,0	3,1	379,7	41,1	1439	41,6	0,8	50,6	76,6	27	0,76	0,61	39,3
7	-1	+1	+1	-1	+1	40	3,4	3,2	3,8	541,3	59,6	945	65,5	14,7	15,3	35,1	31	0,65	0,62	35,0
	-1	+1	+1	-1	0	35	3,5	3,2	3,7	518,0	61,9	903	64,6	7,0	15,4	38,7	30	0,65	0,62	35,0
	-1	+1	+1	-1	-1	30	3,5	3,2	3,6	484,4	62,1	885	64,1	5,1	15,0	39,0	29	0,65	0,62	35,0

Continua

Continuação Tabela C.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
8	-1	+1	+1	+1	+1	40	3,5	3,2	3,6	531,0	67,0	983	70,3	10,2	10,9	51,6	33	0,79	0,61	38,2
	-1	+1	+1	+1	0	35	3,4	3,3	3,5	509,9	66,7	932	68,9	6,7	11,4	55,3	31	0,79	0,61	38,2
	-1	+1	+1	+1	-1	30	3,4	3,2	3,5	481,1	66,3	897	67,5	3,6	13,7	62,3	30	0,79	0,61	38,2
9	+1	-1	-1	-1	+1	40	7,8	6,3	11,4	411,4	30,3	1635	46,0	22,5	29,2	39,5	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	-1	0	35	7,8	6,6	10,7	391,8	31,1	1577	44,1	18,9	30,6	42,8	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	-1	-1	30	7,8	6,8	10,1	372,4	32,1	1496	42,7	15,6	33,3	47,6	28	0,17	0,72	18,9
10	+1	-1	-1	+1	+1	40	7,7	6,8	9,6	391,9	37,7	1801	48,0	16,5	26,9	44,3	26	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	+1	0	35	7,7	6,9	9,0	371,0	38,0	1757	45,2	11,7	29,3	54,5	25	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	+1	-1	30	7,7	7,1	8,5	346,4	39,0	1728	43,3	7,1	37,1	66,6	25	0,17	0,72	18,9
11	+1	-1	+1	-1	+1	40	7,9	5,7	9,6	459,4	57,9	1311	71,3	31,7	10,6	26,6	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	-1	0	35	7,8	6,1	9,3	437,4	56,9	1265	68,6	27,2	10,9	28,6	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	-1	-1	30	7,9	6,2	9,1	412,0	58,6	1223	67,8	22,2	11,0	30,0	28	0,17	0,72	18,9
12	+1	-1	+1	+1	+1	40	8,0	6,8	8,9	461,0	61,9	1302	69,3	19,4	10,4	32,1	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	+1	0	35	8,0	6,8	8,6	437,6	63,2	1264	68,7	15,0	10,1	33,4	27	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	+1	-1	30	7,8	6,9	8,2	422,9	64,2	1160	67,7	9,8	10,9	34,9	27	0,17	0,72	18,9
13	+1	+1	-1	-1	+1	40	8,0	7,4	8,3	458,5	35,4	1316	36,9	2,2	69,1	100,2	28	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	-1	-1	0	35	8,0	7,8	8,2	429,7	35,5	1311	36,4	1,4	72,9	102,2	28	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	-1	-1	-1	30	8,1	7,8	8,1	398,8	36,2	1305	36,3	0,2	76,1	105,7	28	0,70	0,64	45,8
14	+1	+1	-1	+1	+1	40	7,9	7,7	8,1	415,8	40,3	1601	41,8	2,5	58,6	95,2	29	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	-1	+1	0	35	7,9	7,7	8,0	389,8	41,8	1593	42,6	1,4	60,7	104,7	28	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	-1	+1	-1	30	7,8	7,8	8,0	361,2	42,6	1590	43,3	1,1	61,2	106,8	26	0,70	0,64	45,8
15	+1	+1	+1	-1	+1	40	8,0	7,7	8,3	529,8	62,2	986	64,3	5,7	16,5	78,4	28	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	+1	-1	0	35	8,1	7,8	8,3	507,6	62,3	939	64,1	4,8	16,1	81,5	27	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	+1	-1	-1	30	8,1	7,8	8,2	490,7	63,5	862	64,7	3,2	17,0	80,0	27	0,70	0,64	45,8
16	+1	+1	+1	+1	+1	40	7,9	7,7	8,1	522,4	67,6	1014	70,1	7,8	13,9	80,1	27	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	+1	+1	0	35	7,9	7,7	8,1	498,2	69,6	975	71,4	5,8	12,1	87,9	26	0,70	0,64	45,8
	+1	+1	+1	+1	-1	30	7,7	7,6	7,8	470,6	71,1	936	71,8	2,5	20,5	81,2	25	0,70	0,64	45,8

Continua

Continuação Tabela C.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
17	-2	0	0	0	+1	40	1,2	1,1	1,5	483,2	48,4	1185	58,8	20,1	7,6	33,1	27	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	0	35	1,2	1,2	1,3	454,2	50,4	1173	56,9	13,1	9,1	38,0	26	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	-1	30	1,2	1,2	1,2	428,9	52,0	1127	54,2	4,6	13,0	46,0	25	0,28	0,67	22,5
18	+2	0	0	0	+1	40	10,4	9,4	11,6	456,8	47,4	1326	53,6	11,8	20,4	57,4	29	0,19	0,76	30,5
	+2	0	0	0	0	35	10,4	9,6	11,3	433,8	48,8	1286	53,4	9,0	21,2	58,9	28	0,19	0,76	30,5
	+2	0	0	0	-1	30	10,4	9,6	11,0	406,7	50,5	1254	53,6	6,2	20,7	74,1	27	0,19	0,76	30,5
19	0	-2	0	0	+1	40	5,7	2,8	9,4	411,3	40,5	1635	69,9	49,4	10,9	19,6	27	0,01	0,98	10,1
	0	-2	0	0	0	35	5,7	3,1	9,1	395,0	41,0	1551	68,2	46,0	11,9	21,6	26	0,01	0,98	10,1
	0	-2	0	0	-1	30	5,7	3,2	8,5	374,7	42,2	1477	65,5	40,3	14,0	23,8	25	0,01	0,98	10,1
20	0	+2	0	0	+1	40	5,3	5,3	5,4	491,3	51,5	1147	52,6	2,4	25,6	64,8	32	2,95	0,49	58,4
	0	+2	0	0	0	35	5,3	5,3	5,4	462,0	51,5	1135	52,3	1,6	25,7	68,5	31	2,95	0,49	58,4
	0	+2	0	0	-1	30	5,3	5,1	5,4	425,8	52,1	1145	52,6	1,0	24,1	71,1	30	2,95	0,49	58,4
21	0	0	-2	0	+1	40	5,6	4,8	7,1	408,3	28,1	1661	36,3	11,4	54,7	71,3	30	0,18	0,76	28,1
	0	0	-2	0	0	35	5,5	5,0	6,7	388,8	29,0	1602	35,7	9,4	57,4	74,2	29	0,18	0,76	28,1
	0	0	-2	0	-1	30	5,5	5,1	6,6	362,9	29,0	1576	34,9	8,3	62,8	80,9	29	0,18	0,76	28,1
22	0	0	+2	0	+1	40	5,5	4,8	5,9	564,0	72,2	870	78,2	21,6	6,3	44,3	30	0,18	0,76	28,1
	0	0	+2	0	0	35	5,5	4,9	5,8	530,6	72,4	860	75,9	12,9	9,0	47,5	30	0,18	0,76	28,1
	0	0	+2	0	-1	30	5,5	4,8	5,7	493,6	72,4	852	74,9	9,1	11,6	49,9	29	0,18	0,76	28,1
23	0	0	0	-2	+1	40	5,5	4,0	7,1	477,0	45,2	1216	59,5	26,1	17,8	36,2	27	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	-2	0	35	5,4	4,2	6,8	458,9	45,3	1149	57,8	22,9	18,2	43,1	26	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	-2	-1	30	5,5	4,4	6,5	431,2	48,2	1115	57,1	17,3	18,6	53,4	25	0,15	0,78	27,1
24	0	0	0	+2	+1	40	5,3	4,1	6,4	445,6	51,5	1395	62,3	23,9	5,5	52,6	30	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	+2	0	35	5,3	4,3	6,1	427,2	52,7	1327	60,9	17,3	8,9	58,7	29	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	+2	-1	30	5,4	4,2	6,0	402,4	54,0	1282	59,9	12,9	11,1	59,6	29	0,15	0,78	27,1

Continua

Continuação Tabela C.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
25	0	0	0	0	+1	40	5,5	4,4	6,7	468,8	46,7	1261	57,3	19,9	20,6	48,1	32	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	0	0	35	5,5	4,5	6,4	445,9	48,3	1219	57,2	17,1	20,3	47,3	31	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	0	-1	30	5,5	4,6	6,3	423,6	49,7	1157	57,2	14,9	21,6	52,0	30	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	0	-2	25	5,5	4,7	6,0	392,9	51,1	1121	56,0	10,1	22,3	56,0	29	0,15	0,78	27,1
26	0	0	0	0	+2	45	5,6	4,3	6,9	485,8	46,3	1320	57,7	21,2	17,8	46,4	31	0,18	0,76	28,1
	0	0	0	0	+1	40	5,6	4,4	6,7	467,4	47,7	1267	57,4	18,5	19,3	45,8	30	0,18	0,76	28,1
	0	0	0	0	0	35	5,5	4,6	6,5	454,1	47,9	1174	56,6	16,8	18,5	50,2	29	0,18	0,76	28,1
	0	0	0	0	-1	30	5,6	4,7	6,3	422,6	49,5	1162	55,8	12,5	22,1	52,4	29	0,18	0,76	28,1
27	0	0	0	0	+1	40	5,5	4,2	6,7	467,3	47,8	1268	58,3	20,1	20,6	44,7	30	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	0	0	35	5,5	4,5	6,4	452,5	48,1	1183	57,2	17,6	20,5	46,9	30	0,15	0,78	27,1
	0	0	0	0	-1	30	5,5	4,8	6,2	421,8	49,3	1167	56,6	14,3	21,7	52,6	29	0,15	0,78	27,1

APÊNDICE D

D - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE HGOT3

Tabela D – Resultados experimentais do Hidrociclone HGOT3

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
1	-1	-1	-1	-1	+1	40	3,5	2,7	15,1	459,2	6	1312	27,5	23,2	39,3	40,5	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	-1	0	35	3,5	2,7	12,9	430,1	6	1308	25,2	20,3	43,0	44,5	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	-1	-1	30	3,5	2,9	9,6	398,7	7	1305	21,0	15,0	51,3	53,4	27	0,16	0,70	16,4
2	-1	-1	-1	+1	+1	40	3,4	2,8	17,0	445,8	4	1392	24,6	21,2	42,7	43,7	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	+1	0	35	3,4	2,8	14,5	421,4	4	1363	19,7	16,3	48,8	49,9	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	-1	+1	-1	30	3,5	2,9	11,5	395,9	5	1324	18,5	14,1	53,3	54,9	27	0,16	0,70	16,4
3	-1	-1	+1	-1	+1	40	3,5	2,7	8,5	453,1	14	1348	35,7	25,3	33,7	37,3	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	-1	0	35	3,5	2,8	7,6	426,4	15	1331	34,0	22,2	36,8	41,2	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	-1	-1	30	3,5	2,8	6,7	402,1	16	1284	32,1	18,9	40,4	45,8	28	0,16	0,70	16,4
4	-1	-1	+1	+1	+1	40	3,5	2,7	7,7	459,6	14	1310	33,0	21,9	41,3	45,8	28	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	+1	0	35	3,5	2,7	6,9	432,7	16	1293	31,8	19,3	43,9	49,2	27	0,16	0,70	16,4
	-1	-1	+1	+1	-1	30	3,5	2,8	6,0	402,1	18	1283	30,9	16,3	45,6	52,6	27	0,16	0,70	16,4
5	-1	+1	-1	-1	+1	40	3,6	3,4	5,3	475,4	12	1226	18,4	7,0	71,4	76,9	32	0,58	0,63	35,1
	-1	+1	-1	-1	0	35	3,7	3,5	4,5	445,3	14	1222	17,6	4,2	84,3	90,3	30	0,58	0,63	35,1
	-1	+1	-1	-1	-1	30	3,6	3,5	4,0	420,6	16	1174	17,2	2,0	94,9	101,4	29	0,58	0,63	35,1
6	-1	+1	-1	+1	+1	40	3,6	3,4	4,9	476,5	12	1219	17,3	5,6	97,0	102,9	30	0,74	0,61	37,6
	-1	+1	-1	+1	0	35	3,6	3,4	4,3	447,9	14	1207	17,3	3,6	99,6	106,3	29	0,74	0,61	37,6
	-1	+1	-1	+1	-1	30	3,5	3,4	3,7	422,8	16	1160	17,1	1,1	100,6	107,6	27	0,74	0,61	37,6
7	-1	+1	+1	-1	+1	40	3,7	3,3	4,4	483,1	26	1187	32,5	8,5	64,0	75,6	31	0,73	0,61	36,7
	-1	+1	+1	-1	0	35	3,6	3,3	4,0	461,3	27	1138	31,2	5,1	67,0	79,8	30	0,73	0,61	36,7
	-1	+1	+1	-1	-1	30	3,4	3,4	3,7	428,9	31	1128	31,8	1,9	68,2	83,2	29	0,73	0,61	36,7

Continua

Continuação Tabela D.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
8	-1	+1	+1	+1	+1	40	3,5	3,4	4,2	478,9	28	1207	33,4	7,9	48,8	62,5	30	0,83	0,60	38,2
	-1	+1	+1	+1	0	35	3,5	3,5	3,9	455,0	30	1170	34,0	5,9	64,2	79,2	29	0,83	0,60	38,2
	-1	+1	+1	+1	-1	30	3,4	3,4	3,6	427,0	32	1138	34,0	2,8	70,2	89,2	28	0,83	0,60	38,2
9	+1	-1	-1	-1	+1	40	7,9	6,8	22,7	448,1	6	1378	21,2	16,0	49,0	50,6	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	-1	0	35	7,9	6,7	19,6	423,8	7	1348	19,9	13,9	53,4	55,6	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	-1	-1	30	8,0	7,0	15,6	394,8	8	1331	17,6	10,4	64,0	66,7	28	0,17	0,72	18,9
10	+1	-1	-1	+1	+1	40	7,7	6,7	22,9	431,3	6	1488	20,2	15,4	51,7	53,4	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	+1	0	35	7,7	6,8	19,3	409,3	7	1444	19,3	13,5	57,0	59,3	27	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	-1	+1	-1	30	7,8	6,9	14,5	385,8	8	1394	17,1	9,4	68,5	70,9	26	0,17	0,72	18,9
11	+1	-1	+1	-1	+1	40	7,8	6,4	15,1	447,9	17	1380	35,2	22,1	38,6	43,5	29	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	-1	0	35	7,8	6,3	13,3	419,9	18	1373	33,3	18,3	41,0	47,7	28	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	-1	-1	30	7,7	6,6	11,6	390,6	21	1360	32,4	14,8	44,1	53,5	27	0,17	0,72	18,9
12	+1	-1	+1	+1	+1	40	7,9	6,3	15,5	435,9	15	1457	33,1	20,9	40,5	45,0	29	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	+1	0	35	7,9	6,5	13,9	412,7	17	1422	32,5	18,4	42,0	48,5	29	0,17	0,72	18,9
	+1	-1	+1	+1	-1	30	7,9	6,7	12,0	386,7	20	1388	31,9	14,8	46,9	55,0	29	0,17	0,72	18,9
13	+1	+1	-1	-1	+1	40	8,0	7,9	9,0	457,6	14	1324	16,3	2,2	106,4	113,1	33	1,28	0,56	43,3
	+1	+1	-1	-1	0	35	8,0	7,9	8,6	435,8	16	1276	16,8	1,4	110,9	118,4	31	1,28	0,56	43,3
	+1	+1	-1	-1	-1	30	8,0	7,8	8,4	401,8	17	1287	18,1	1,1	118,8	129,0	31	1,28	0,56	43,3
14	+1	+1	-1	+1	+1	40	7,9	7,8	8,8	453,6	15	1346	16,8	2,1	114,8	123,1	30	0,86	0,61	43,9
	+1	+1	-1	+1	0	35	7,9	8,0	8,4	425,9	17	1335	17,9	1,2	119,1	128,8	28	0,86	0,61	43,9
	+1	+1	-1	+1	-1	30	7,9	7,8	8,0	389,8	19	1365	19,4	0,4	124,9	137,7	27	0,86	0,61	43,9
15	+1	+1	+1	-1	+1	40	8,0	7,8	8,5	473,4	30	1272	32,1	2,9	71,6	108,5	30	0,90	0,61	44,0
	+1	+1	+1	-1	0	35	8,0	7,8	8,2	441,0	31	1246	32,1	1,6	76,8	113,2	30	0,90	0,61	44,0
	+1	+1	+1	-1	-1	30	8,0	7,7	8,0	411,0	34	1229	33,9	0,1	90,3	110,7	29	0,90	0,61	44,0
16	+1	+1	+1	+1	+1	40	8,1	7,9	8,5	468,4	31	1261	32,4	2,6	73,4	91,8	29	1,00	0,59	42,8
	+1	+1	+1	+1	0	35	8,0	7,9	8,3	439,3	33	1255	34,8	2,1	79,8	104,1	29	1,00	0,59	42,8
	+1	+1	+1	+1	-1	30	8,0	7,9	8,3	406,9	36	1254	37,6	2,0	78,4	113,1	29	1,00	0,59	42,8

Continua

Continuação Tabela D.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	E _u [-]	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
17	-2	0	0	0	+1	40	1,3	1,1	2,5	463,9	12	1285	23,0	13,0	51,6	55,2	28	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	0	35	1,3	1,2	2,2	441,9	13	1239	22,4	10,7	56,2	61,1	27	0,28	0,67	22,5
	-2	0	0	0	-1	30	1,3	1,2	1,6	414,7	15	1206	19,7	5,1	70,5	78,3	26	0,28	0,67	22,5
18	+2	0	0	0	+1	40	10,3	9,6	13,6	444,6	17	1400	23,7	7,6	66,2	71,7	29	0,17	0,77	29,0
	+2	0	0	0	0	35	10,3	9,8	12,3	415,8	20	1401	23,8	5,3	68,4	74,6	29	0,17	0,77	29,0
	+2	0	0	0	-1	30	10,2	9,8	11,5	384,2	21	1406	24,2	3,8	69,2	76,2	28	0,17	0,77	29,0
19	0	-2	0	0	+1	40	5,4	3,0	37,0	436,1	5	1455	49,0	46,5	24,1	24,9	29	0,01	0,99	10,2
	0	-2	0	0	0	35	5,4	3,0	36,7	405,9	5	1470	48,7	46,1	26,0	26,7	29	0,01	0,99	10,2
	0	-2	0	0	-1	30	5,4	3,0	34,4	378,7	5	1447	46,7	43,9	28,2	29,4	28	0,01	0,99	10,2
20	0	+2	0	0	+1	40	5,2	5,2	5,3	472,3	29	1242	29,3	0,9	75,0	88,5	31	3,18	0,48	58,5
	0	+2	0	0	0	35	5,2	5,2	5,2	432,8	31	1293	30,9	0,2	87,3	105,1	30	3,18	0,48	58,5
	0	+2	0	0	-1	30	5,2	5,0	5,2	405,7	30	1261	30,0	0,1	94,4	114,2	30	3,18	0,48	58,5
21	0	0	-2	0	+1	40	5,8	5,4	9,7	462,7	7	1293	12,4	5,7	90,2	112,3	31	0,44	0,64	27,1
	0	0	-2	0	0	35	5,8	5,5	8,2	434,5	8	1283	12,1	4,1	112,6	115,8	30	0,44	0,64	27,1
	0	0	-2	0	-1	30	5,7	5,5	7,2	407,7	9	1249	12,0	2,9	115,8	119,5	30	0,44	0,64	27,1
22	0	0	+2	0	+1	40	5,6	5,1	6,9	476,5	32	1219	40,2	11,8	53,6	70,5	30	0,34	0,67	27,9
	0	0	+2	0	0	35	5,6	5,3	6,6	446,4	33	1216	39,6	9,4	55,9	74,1	30	0,34	0,67	27,9
	0	0	+2	0	-1	30	5,7	5,5	6,2	414,3	36	1209	38,8	4,6	56,9	78,4	30	0,34	0,67	27,9
23	0	0	0	-2	+1	40	5,8	5,0	10,1	472,3	15	1241	27,9	14,8	47,6	53,2	29	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	-2	0	35	5,8	5,2	8,8	443,6	17	1231	26,8	11,7	52,3	59,2	29	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	-2	-1	30	5,8	5,2	8,0	403,3	19	1223	27,3	10,0	54,6	62,5	29	0,21	0,73	27,7
24	0	0	0	+2	+1	40	5,8	5,2	8,9	469,2	15	1257	24,8	10,9	57,4	66,5	28	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	+2	0	35	5,8	5,4	7,9	440,7	18	1246	25,3	8,9	59,2	67,2	27	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	+2	-1	30	5,7	5,3	6,9	409,7	21	1236	25,4	5,6	63,8	70,6	27	0,21	0,73	27,7

Continua

Continuação Tabela D.

Exp.	X1	X2	X3	X4	X5	-ΔP [psi]	C _{VA} [%]	C _{VO} [%]	C _{VU} [%]	Q _A [cm ³ /s]	R _L [%]	Eu	η [%]	η' [%]	d ₅₀ [μm]	d' ₅₀ [μm]	T [°C]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	μ [cP] a 2100 s ⁻¹
25	0	0	0	0	+1	40	5,5	4,5	11,2	472,9	14	1237	30,5	19,1	64,1	71,0	29	0,41	0,64	26,3
	0	0	0	0	0	35	5,5	4,8	9,6	443,6	16	1231	29,2	15,5	75,8	87,3	29	0,41	0,64	26,3
	0	0	0	0	-1	30	5,6	5,0	8,1	413,8	18	1211	27,5	11,2	85,7	96,4	27	0,41	0,64	26,3
	0	0	0	0	-2	25	5,5	5,1	7,0	383,5	21	1175	27,3	7,4	94,3	105,9	26	0,41	0,64	26,3
26	0	0	0	0	+2	45	5,7	4,5	12,8	499,2	13	1249	31,2	21,1	60,2	65,6	29	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	+1	40	5,6	4,6	10,9	473,6	15	1234	30,4	18,4	64,8	71,9	28	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	0	35	5,6	4,9	9,1	446,6	17	1213	28,3	13,8	76,1	84,5	27	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	-1	30	5,6	5,1	7,7	413,6	19	1212	27,2	9,7	87,4	98,2	26	0,21	0,73	27,7
27	0	0	0	0	+1	40	5,8	5,1	9,2	473,2	15	1236	26,0	12,3	72,7	79,9	29	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	0	35	5,7	5,3	7,9	444,7	17	1224	24,6	8,8	83,7	91,9	28	0,21	0,73	27,7
	0	0	0	0	-1	30	5,7	5,4	7,3	411,9	20	1223	25,7	7,3	87,7	97,6	28	0,21	0,73	27,7