



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



**INVESTIGAÇÃO SOBRE O IMPACTO DA REOLOGIA  
DA SUSPENSÃO FRENTE A UM HIDROCICLONE  
CÔNICO-FILTRANTE**

**Murilo Guimarães Morimoto**

**Uberlândia – MG**

**2021**



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



**INVESTIGAÇÃO SOBRE O IMPACTO DA REOLOGIA  
DA SUSPENSÃO FRENTE A UM HIDROCICLONE  
CÔNICO-FILTRANTE**

Murilo Guimarães Morimoto

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira

Marcos Antonio de Souza Barrozo

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

**Uberlândia – MG**

**2021**

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

M857 2021	<p>Morimoto, Murilo Guimarães, 1994- Investigação sobre o impacto da reologia da suspensão frente a um hidrociclone cônico-filtrante [recurso eletrônico] / Murilo Guimarães Morimoto. - 2021.</p> <p>Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira. Coorientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.81">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.81</a> 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> <p style="text-align: right;">CDU: 66.0</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



## **ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 01/2021, PPGEQ				
Data:	10 de fevereiro 2021	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	11912EQU009				
Nome do Discente:	Murilo Guimarães Morimoto				
Título do Trabalho:	Investigação sobre o impacto da reologia da suspensão frente a um hidrociclone cônico-filtrante				
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo experimental e de simulação em hidrociclones não convencionais				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Maria do Carmo Ferreira - DEQ/UFSCar; Henrique Coutinho de Barcelos Costa - DEALI/UFSJ; Danylo de Oliveira Silva - FEQUI/UFU; Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

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

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

**Aprovado.**

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

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 10/02/2021, às 11:01, 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 10/02/2021, às 11:06, 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 **Henrique Coutinho de Barcelos Costa, Usuário Externo**, em 10/02/2021, às 11:08, 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 10/02/2021, às 11:28, 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 **MARIA DO CARMO FERREIRA, Usuário Externo**, em 10/02/2021, às 11:28, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2551827** e o código CRC **09C85AFD**.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por estar sempre presente e pela proteção durante o ano de 2020.

Aos meus pais, Maria Eliane e Ricardo, por me incentivarem a estudar, por estarem sempre ao meu lado e sempre prover ajuda. À minha avó, dona Peta, a quem tenho muito carinho e admiração.

Aos orientadores, Luiz Gustavo Martins Vieira e Marcos Antonio de Souza Barrozo, pela brilhante orientação. Agradeço em especial pela confiança depositada no meu trabalho e pela proposta de um tema tão interessante como esse.

Aos meus amigos mais próximos: Rafael, Caio, o pessoal da *Unforgiven*, o pessoal do intercâmbio, os quais me auxiliaram a manter uma mente saudável e promoveram momentos de distração.

Aos amigos que fiz nos laboratórios do 1Z-A e 1Z-B. À Érica por ter me ajudado a me acostumar aos experimentos com hidrociclones, por ajudar a analisar os dados experimentais e ajudado a navegar por entre os laboratórios. À Suellen, que sempre com boa vontade e paciência ofereceu observações e dicas de como melhor operar as suspensões não-newtonianas. Ao Grégori e ao Rondinelli, que me auxiliaram muito a compreender melhor as simulações computacionais. À Dayana por tornar o dia a dia no laboratório mais agradável. À Glaucia, pela constante ajuda. Agradeço também aos demais pesquisadores desses laboratórios que de algum modo também impactaram de maneira positiva.

Agradeço aos professores da banca examinadora, Danylo de Oliveira Silva, Henrique Coutinho de Barcelos Costa e Maria do Carmo Ferreira. Obrigado, por participarem desse trabalho e pelas contribuições feitas.

Aos professores e funcionários da FEQUI/UFU que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho.

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

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	I
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	VI
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	VIII
<b>RESUMO</b> .....	XIII
<b>ABSTRACT</b> .....	XIV
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 HIDROCICLONES .....	3
2.1.1 <i>Funcionamento</i> .....	3
2.1.2 <i>Design</i> .....	10
2.2 HIDROCICLONE FILTRANTE.....	11
2.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO HIDROCICLONE .....	12
2.3.1 <i>Concentração Volumétrica (<math>C_{Vi}</math>)</i> .....	12
2.3.2 <i>Massa específica (<math>\rho_i</math>) e Vazão Volumétrica (<math>Q_i</math>)</i> .....	13
2.3.3 <i>Razão de Líquido (RL)</i> .....	13
2.3.4 <i>Número de Euler (Eu)</i> .....	13
2.3.5 <i>Eficiência Total (<math>\eta</math>) e Eficiência Total Reduzida (<math>\eta'</math>)</i> .....	14
2.3.6 <i>Eficiência Granulométrica (G) e Eficiência Granulométrica Reduzida (G')</i> 14	
2.3.7 <i>Diâmetro de Corte (<math>d_{50}</math>) e Diâmetro de Corte Reduzido (<math>d'_{50}</math>)</i> .....	15
2.4 REOLOGIA .....	15
2.4.1 <i>Fluidos com comportamento independente do tempo</i> .....	16
2.5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	19
2.6 HISTÓRICO DE ESTUDOS EM HIDROCICLONES.....	23
2.6.1 <i>Hidrocyclonagem na FEQUI/UFU</i> .....	23

2.6.2 Hidrociclonação em outras instituições de pesquisa .....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL.....	34
3.1.1 Reservatório, agitador mecânico e serpentina.....	35
3.1.2 Bomba centrífuga .....	36
3.1.3 Manômetro digital .....	37
3.2 HIDROCICLONES .....	38
3.3 MATERIAL PARTICULADO.....	42
3.4 VISCOSIFICANTE .....	42
3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	43
3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	44
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>47</b>
4.1 ENSAIOS PRELIMINARES .....	47
4.1.1 Material Particulado .....	47
4.1.2 Testes Preliminares .....	48
4.2 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS NA ALIMENTAÇÃO.....	48
4.2.1 Capacidade de Processamento e Consumo Energético .....	49
4.2.2 Capacidade de Espessamento .....	52
4.2.3 Eficiência .....	55
4.2.4 Diâmetros de Corte .....	57
4.3 EFEITO REOLÓGICO PROMOVIDO PELA CONCENTRAÇÃO DO VISCOSIFICANTE – CMC.....	59
4.3.1 Capacidade de Processamento e Consumo Energético .....	61
4.3.2 Capacidade de Espessamento .....	63
4.3.3 Eficiência .....	65
4.3.4 Diâmetro de Corte.....	68
4.3.5 Vazão de Filtrado .....	69

4.4	EQUAÇÕES DE DESEMPENHO E SUPERFÍCIES DE RESPOSTA .....	70
4.4.1	<i>Hidrociclone Convencional (HC) e Hidrociclone Filtrante (HF)</i> .....	71
4.5	CURVAS DE EFICIÊNCIA.....	79
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>81</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	81
5.2	SUGESTÕES.....	82
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE A: FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL</b> .....	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE B: DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE E DA POROSIDADE DO CONE UTILIZADO</b> .....	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE C: DADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE CONVENCIONAL E FILTRANTE</b> .....	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE D: TESTES DE HIPÓTESE</b> .....	<b>108</b>
	<b>APÊNDICE E: DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE EFICIÊNCIA</b> .....	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (A) vista em perspectiva de um hidrociclone e (B) vista lateral do hidrociclone. Adaptado de Gonçalves (2019). .....	4
Figura 2.2 – Esquemática da trajetória espiralada da suspensão dentro de um hidrociclone. Adaptado de Bradley (1965). .....	5
Figura 2.3 – Esquemática dos fluxos de air core e curto-circuito. Adaptado de Bradley (1965). .....	6
Figura 2.4 – Perfil de velocidade axial dentro do hidrociclone em duas seções diferentes e com detalhe no <i>Locous of zero vertical velocity</i> (LZVV) . Adaptado de Svarovsky (1984). .....	7
Figura 2.5 – Região onde a velocidade axial é zero em um hidrociclone. Adaptado de Bradley (1965). .....	7
Figura 2.6 – Perfil de velocidade radial em duas seções do hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984). .....	8
Figura 2.7 – Perfil de velocidade tangencial em duas seções do hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984). .....	9
Figura 2.8 – Esquemática do funcionamento de um hidrociclone filtrante mostrando os movimentos espiralados da suspensão e as correntes de entrada, <i>underflow</i> , <i>overflow</i> e filtrado. Adaptado de Cruz (2008). .....	12
Figura 2.9 – Esquemática do comportamento da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para diferentes tipos de fluidos. Adaptado de Chhabra e Richardson (2008). .....	17
Figura 2.10 – Demonstração do ajuste do modelo <i>Power-Law</i> de um fluido pseudoplástico, com destaque nos extremos do ajuste, onde a viscosidade se torna constante. Adaptado de Boger, 1977. .....	19
Figura 2.11 – Perfil de velocidade radial próximo à parede dos equipamentos HC1 e HF1 propostos por Vieira (2006). Fonte: Vieira (2006). .....	25
Figura 3.1 – Representação esquemática da unidade experimental de hidrociclonagem. (1) reservatório; (2) bomba centrífuga; (3) agitador mecânico; (4) manômetro digital; (5) hidrociclone; (A) corrente de sucção da bomba; (B) corrente de <i>bypass</i> ; (C) corrente de alimentação; (D) corrente de <i>underflow</i> ; (E) corrente de <i>overflow</i> ; (F) filtrado e (G) serpentina do sistema refrigerante. Fonte: autor. ....	34

Figura 3.2 – Detalhes do reservatório da unidade experimental de hidrociclonação.	
Fonte: autor.....	36
Figura 3.3 – Bomba centrífuga sobre o suporte de aço inoxidável com detalhe no bocal de sucção e descarga .	
Fonte: autor. ....	37
Figura 3.4 – Manômetro digital instalado à montante do hidrociclone.	
Fonte: autor. ...	37
Figura 3.5 – Equipamentos utilizados. A) hidrociclone convencional e B) hidrociclone filtrante. 1) Corrente de alimentação; 2) corrente de underflow; 3) corrente de overflow e 4) Corrente de filtrado.	
Fonte: autor.....	39
Figura 3.6 – Parte cilíndrica e duto de alimentação feita de aço inoxidável.	
Fonte: autor. ....	40
Figura 3.7 – Regiões cônicas dos hidrociclones. A) cone do HC feito de latão e B) cone do HF feito de bronze sinterizado.	
Fonte: autor. ....	40
Figura 3.8 – Acessório para acoplamento ao orifício de <i>underflow</i> confeccionado em politetrafluoretileno (A) e vortex finder confeccionado em latão (B).	
Fonte: autor. ....	41
Figura 3.9 – Partes acessórias utilizadas para montagem dos hidrociclones. A) Hastes de alumínio; B) placa hexagonal de latão e C) rosca oca confeccionada em latão.	
Fonte: autor.....	41
Figura 3.10 – Fórmula estrutural da carboximetilcelulose sal sódico. “A” representa a continuação da cadeia polimérica. Adaptado de Szorcik et al. (2006).	
.....	43
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da rocha fosfática e ajuste com modelo RRB.	
Fonte: autor.....	47
Figura 4.2 – Capacidade de alimentação dos equipamentos em função da concentração de sólidos e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).	
.....	49
Figura 4.3 – Número de Euler dos equipamentos em função da concentração de sólidos e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).	
.....	51
Figura 4.4 – Concentração volumétrica na corrente de <i>underflow</i> , em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).	
.....	53
Figura 4.5 – Razão de líquido em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).	
.....	54
Figura 4.6 – Eficiência total em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).	
.....	55

Figura 4.7 – Eficiência total reduzida em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.). .....	56
Figura 4.8 – Diâmetro de corte em função da concentração de sólidos e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.). .....	58
Figura 4.9 – Diâmetro de corte reduzido em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.). .....	58
Figura 4.10 – Tensão de cisalhamento das suspensões utilizadas neste estudo em função da concentração de CMC ( $X1$ ), da taxa de deformação e da concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $X2$ ). .....	59
Figura 4.11 – Viscosidade aparente das suspensões utilizadas nessa pesquisa em função da concentração mássica de CMC ( $X1$ ), taxa de deformação e da concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $X2$ ). .....	60
Figura 4.12 – Vazão de alimentação em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	62
Figura 4.13 – Número de Euler em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	63
Figura 4.14 – Concentração volumétrica de sólidos no <i>underflow</i> em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	64
Figura 4.15 – Razão de líquido em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	65
Figura 4.16 – Eficiência total em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	66
Figura 4.17 – Eficiência total reduzida em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	67
Figura 4.18 – Diâmetro de corte em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	68
Figura 4.19 – Diâmetro de corte reduzido em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	69
Figura 4.20 – Vazão mássica de filtrado em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%. .....	70

Figura 4.21 – Superfícies de resposta para $Q_A$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	72
Figura 4.22 – Superfícies de resposta para o número de Euler dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	73
Figura 4.23 – Superfícies de resposta para $C_{VU}$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	74
Figura 4.24 – Superfícies de resposta para a $RL$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	75
Figura 4.25 – Superfícies de resposta para $\eta$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	76
Figura 4.26 – Superfícies de resposta para $\eta'$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	77
Figura 4.27 – Superfícies de resposta para $d_{50}$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	78
Figura 4.28 – Superfícies de resposta para $d_{50}'$ dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par $X1-X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi. ....	79
Figura 4.29 – Curva de eficiência do experimento de número 1 do HC. ....	80
Figura 4.30 – Curva de eficiência do experimento de número 1 do HF. ....	80
Figura A.1 – Detalhes da malha computacional. A) malha do equipamento; B) detalhe da região superior do equipamento e C) detalhe do filtro. ....	94
Figura A.2 – Comportamento da queda de pressão em função do tempo de simulação. ....	97
Figura A.3 – Comportamento da razão de líquido em função do tempo de simulação. ....	97
Figura A.4 – Perfis de pressão manométrica para o hidrociclone filtrante. A) o perfil que contém as pressões positivas e negativas; B) o perfil apenas com as pressões positivas e C) o perfil de pressão em seção circular anterior à região cônica. ....	99
Figura A.5 – Perfis de velocidade axial. A) o perfil de velocidade axial ascendente indicando o vórtice interno e B) o perfil de velocidade axial descendente indicando o vórtice externo. ....	99
Figura A.6 – Correntes de fluxo com destaque no curto-circuito e na recirculação. ...	100
Figura A.7 – Perfil de velocidade na saída do contorno filtrante e perfil de pressão na superfície do filtro em contato com o interior do equipamento. ....	101
Figura A.8 – Velocidade tangencial do equipamento filtrante. A) Perfil em um corte axial do equipamento e B) Velocidade tangencial em diversas seções circulares. ....	101

Figura E.1 – Curva de eficiência do experimento de número 4 do HC.....	118
Figura E.2 – Curva de eficiência do experimento de número 7 do HC.....	119
Figura E.3 – Curva de eficiência do experimento de número 10 do HC.....	119
Figura E.4 – Curva de eficiência do experimento de número 13 do HC.....	120
Figura E.5 – Curva de eficiência do experimento de número 16 do HC.....	120
Figura E.6 – Curva de eficiência do experimento de número 19 do HC.....	121
Figura E.7 – Curva de eficiência do experimento de número 22 do HC.....	121
Figura E.8 – Curva de eficiência do experimento de número 25 do HC.....	122
Figura E.9 – Curva de eficiência do experimento de número 4 do HF. ....	122
Figura E.10 – Curva de eficiência do experimento de número 7 do HF. ....	123
Figura E.11 – Curva de eficiência do experimento de número 10 do HF. ....	123
Figura E.12 – Curva de eficiência do experimento de número 13 do HF. ....	124
Figura E.13 – Curva de eficiência do experimento de número 16 do HF. ....	124
Figura E.14 – Curva de eficiência do experimento de número 19 do HF. ....	125
Figura E.15 – Curva de eficiência do experimento de número 22 do HF. ....	125
Figura E.16 – Curva de eficiência do experimento de número 25 do HF. ....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação geométrica para algumas famílias de hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).....	10
Tabela 2.2 – Dimensões dos hidrociclones geometricamente otimizados obtidos por Kyriakidis (2018). Adaptado de Kyriakidis (2018).....	28
Tabela 3.1 – Dimensões dos equipamentos HC e HF comparadas com as do equipamento HGOT1.....	39
Tabela 3.2 – Codificação das variáveis utilizadas no planejamento de experimentos... 43	
Tabela 3.3 – Planejamento de experimentos utilizado para investigação do efeito da concentração de viscosificante, concentração de sólidos e queda de pressão. ....	44
Tabela 4.1 – Resultados dos testes hidrodinâmicos utilizando o HC e HF.....	48
Tabela 4.2 – Relação dos parâmetros do modelo <i>Power-Law</i> com a concentração mássica do viscosificante.....	60
Tabela A.1 – Resumo da estratégia computacional utilizada para a simulação do HF..	95
Tabela A.2 - Relação das variáveis obtidas experimentalmente e simuladas. ....	98
Tabela B.1 – Resultados experimentais para a caracterização do filtro.....	104
Tabela C.1 – Dados experimentais do Hidrociclone convencional.....	105
Tabela C.2 – Dados experimentais do Hidrociclone Filtrante.....	106
Tabela D.1 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 1 a 3. ....	108
Tabela D.2 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 4 a 6. ....	109
Tabela D.3 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 7 a 9. ....	110
Tabela D.4 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 10 a 12. ....	111
Tabela D.5 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 13 a 15. ....	112
Tabela D.6 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 16 a 18. ....	113

Tabela D.7 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 19 a 21. ....	114
Tabela D.8 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 22 a 24. ....	115
Tabela D.9 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 25 a 27. ....	116

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{K}$	Média do índice de consistência [ $M^1L^{-1}T^{n-2}$ ]
$\bar{N}$	Média do índice de comportamento [ $M^0L^0T^0$ ]
$\overline{R^2}$	Média do coeficiente de determinação [ $M^0L^0T^0$ ]
$A_{lateral}$	Área lateral externa do cone poroso [ $M^0L^2T^0$ ]
$b$	Matriz com os coeficientes lineares [ $M^0L^0T^0$ ]
$B$	Matriz com os componentes de interação [ $M^0L^0T^0$ ]
$b_0$	Coefficiente linear da regressão não-linear [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{CMC}$	Concentração mássica de CMC [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{VA}$	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> [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{VU_{HC}}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> do equipamento convencional [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{VU_{HF}}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> do equipamento filtrante [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{Wi}$	Concentração mássica de sólidos de uma corrente genérica $i$ [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{WA}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação [ $M^0L^0T^0$ ]
$C_{WU}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> [ $M^0L^0T^0$ ]
$d_{50}$	Diâmetro de corte [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_{50_{HC}}$	Diâmetro de corte do hidrociclone convencional [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_{50_{HF}}$	Diâmetro de corte do hidrociclone filtrante [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_{50}'$	Diâmetro de corte reduzido [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_{50}'_{HC}$	Diâmetro de corte reduzido do hidrociclone convencional [ $M^0L^1T^0$ ]

$d_{50}'_{HF}$	Diâmetro de corte reduzido do hidrociclone filtrante [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado no modelo RRB [ $M^0L^1T^0$ ]
$D_c$	Diâmetro da região cilíndrica [ $M^0L^1T^0$ ]
$D_i$	Diâmetro do tubo de alimentação [ $M^0L^1T^0$ ]
$D_o$	Diâmetro do duto de overflow [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_p$	Diâmetro de uma partícula sólida [ $M^0L^1T^0$ ]
$d_{pa}$	Diâmetro médio das partículas que compõem a matriz a porosa [ $M^1L^0T^0$ ]
$D_u$	Diâmetro do duto de <i>underflow</i> [ $M^0L^1T^0$ ]
$Eu$	Número de Euler [ $M^0L^0T^0$ ]
$Eu_{HC}$	Número de Euler do hidrociclone convencional [ $M^0L^0T^0$ ]
$Eu_{HF}$	Número de Euler do hidrociclone filtrante [ $M^0L^0T^0$ ]
$G$	Eficiência granulométrica [ $M^0L^0T^0$ ]
$G'$	Eficiência granulométrica reduzida [ $M^0L^0T^0$ ]
$h$	Comprimento da região cilíndrica [ $M^0L^1T^0$ ]
$H$	Comprimento da região cônica [ $M^0L^1T^0$ ]
$l$	Comprimento do vortex finder [ $M^0L^1T^0$ ]
$K$	Índice de consistência do fluido [ $M^1L^{-1}T^{n-2}$ ]
$k_m$	Permeabilidade do meio poroso [ $M^0L^2T^0$ ]
$LZVV$	<i>Locus of zero vertical velocity</i> [ $M^0L^0T^0$ ]
$n$	Índice de comportamento do fluido [ $M^0L^0T^0$ ]
$N$	Parâmetro ajustado no modelo RRB [ $M^0L^0T^0$ ]
$p$	Expoente empírico [ $M^1L^0T^0$ ]
$q$	Vazão genérica por meio de um material poroso [ $M^0L^3T^{-1}$ ]
$Q_A$	Vazão volumétrica da corrente de alimentação [ $M^0L^3T^{-1}$ ]

$Q_{A\_HC}$	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone convencional $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_{A\_HF}$	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone filtrante $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_F$	Vazão volumétrica de filtrado $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_i$	Vazão volumétrica de uma corrente genérica $i$ $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_U$	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i> $[M^0L^3T^{-1}]$
$R^2$	Coefficiente de determinação $[M^0L^0T^0]$
$r$	Raio da seção circular $[M^0L^1T^0]$
$Re$	Número de Reynolds $[M^0L^0T^0]$
$RL$	Razão de líquido $[M^0L^0T^0]$
$RL\_HC$	Razão de líquido do hidrociclone convencional $[M^0L^0T^0]$
$RL\_HF$	Razão de líquido do hidrociclone filtrante $[M^0L^0T^0]$
$v$	Velocidade da suspensão na entrada do equipamento $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_r$	Velocidade radial $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_t$	Velocidade tangencial $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_z$	Velocidade axial $[M^0L^1T^{-1}]$
$W_A$	Vazão mássica da corrente de alimentação $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_F$	Vazão mássica de filtrado $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_i$	Vazão mássica de uma corrente genérica $i$ $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_U$	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i> $[M^1L^0T^{-1}]$
$X$	Matriz das variáveis codificadas $[M^0L^0T^0]$
$X_A$	Distribuição granulométrica de sólidos da corrente de alimentação $[M^0L^0T^0]$
$X_d$	Eficiência de coleta cumulativo do modelo RRB $[M^0L^0T^0]$

$X_U$	Distribuição granulométrica de sólidos da corrente de <i>underflow</i> [ $M^0L^0T^0$ ]
$X_1$	Variável codificada: concentração mássica de CMC [ $M^0L^0T^0$ ]
$X_2$	Variável codificada: concentração volumétrica de sólidos na alimentação [ $M^0L^0T^0$ ]
$X_3$	Variável codificada: queda de pressão [ $M^0L^0T^0$ ]
$X^T$	Matriz transposta das variáveis codificadas
$Y$	Resposta de interesse

### Símbolos Gregos

$\bar{\eta}$	Média de viscosidades aparentes [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\gamma$	Taxa de deformação [ $M^0L^0T^{-1}$ ]
$-\Delta P$	Queda de pressão [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$\eta$	Eficiência total [ $M^0L^0T^0$ ]
$\eta_{HC}$	Eficiência total do hidrociclone convencional [ $M^0L^0T^0$ ]
$\eta_{HF}$	Eficiência total do hidrociclone filtrante [ $M^0L^0T^0$ ]
$\eta'$	Eficiência total reduzida [ $M^0L^0T^0$ ]
$\eta'_{HC}$	Eficiência total reduzida do hidrociclone convencional [ $M^0L^0T^0$ ]
$\eta'_{HF}$	Eficiência total reduzida do hidrociclone filtrante [ $M^0L^0T^0$ ]
$\Theta$	Ângulo da região cônica [ $M^0L^1T^0$ ]
$\mu$	Viscosidade [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu'$	Viscosidade aparente [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu_0$	Viscosidade avaliada a baixa taxa de deformação [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu_\infty$	Viscosidade avaliada a alta taxa de deformação [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\varepsilon$	Espessura do filtro [ $M^0L^1T^0$ ]
$\rho$	Massa específica da fase líquida [ $M^1L^{-3}T^0$ ]

$\rho_i$	Massa específica de uma corrente genérica $i$ [ $M^1L^{-3}T^0$ ]
$\rho_s$	Massa específica do material sólido [ $M^1L^{-3}T^0$ ]
$\tau'$	Ordem aparente do método [ $M^0L^0T^0$ ]
$\tau_0$	Tensão de cisalhamento crítica [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$\tau$	Tensão de cisalhamento [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$\psi$	Variável de auxílio para cálculo da permeabilidade [ $M^{-1}L^5T^{-1}$ ]
$\Phi$	Porosidade da matriz porosa [ $M^0L^0T^0$ ]
$\alpha$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones [ $M^0L^0T^0$ ]
$\beta$	Constante característica de uma “família” de hidrociclones [ $M^0L^0T^0$ ]

## RESUMO

O hidrociclone é um equipamento utilizado com o intuito de separar uma fase discreta sólida de outra fase contínua líquida, a instituição FEQUI/UFU possui diversos trabalhos utilizando esse equipamento. A instituição ao combinar a operação de hidrociclonagem à operação de filtração criou o chamado hidrociclone filtrante, que possui vantagens operacionais quando comparado com um hidrociclone convencional de mesma geometria. Uma das pesquisas realizadas pela instituição propôs um equipamento convencional geometricamente otimizado cujo objetivo foi o de alcançar altas eficiências, o HGOT1, quando operado com suspensões newtonianas e diluídas. Entretanto, várias suspensões utilizadas na indústria química são suspensões não-newtonianas e concentradas. Desse modo, esse trabalho se propôs a avaliar o desempenho de dois hidrociclones, ambos geometricamente inspirados no HGOT1, sendo um deles modificado e portador de um cone feito de material filtrante e outro convencional (sem filtro). Por meio de um planejamento de experimentos, foi possível estudar o efeito da concentração volumétrica de sólidos alimentada, da queda de pressão experimentada pelos hidrociclones e o efeito da reologia da suspensão alimentada. Foi, também, conduzido uma simulação tridimensional, monofásica e em estado transiente envolvendo o hidrociclone filtrante com o intuito de desenvolver uma abordagem capaz de descrever esse equipamento. Em resumo, observou-se que o aumento da viscosidade aparente e da concentração da suspensão prejudicaram o desempenho de separação dos hidrociclones. Ao comparar as respostas geradas pelos equipamentos convencional e filtrante, pôde-se observar que elas apresentam diferenças. A média da eficiência total do equipamento convencional foi 4,1% menor do que a do filtrante. Enquanto a média do número de Euler do equipamento filtrante foi aproximadamente 12% menor do que a do convencional. Acredita-se que, mesmo operando com suspensões não-newtonianas e concentradas, a presença do filtro foi capaz de mudar a fluidodinâmica do equipamento, o que garantiu ao hidrociclone filtrante uma vantagem no desempenho de separação e no consumo energético quando comparado ao equipamento convencional.

Palavras-chave: filtração, não-newtoniano, concentração de sólidos.

## ABSTRACT

The hydrocyclone is an equipment used in order to separate a discrete solid phase from another continuous liquid phase, the FEQUI/UFU institution have several studies investigating this device. The institution when combining the hydrocyclone operation with the filtration operation, created the so-called filtering hydrocyclone, which has operational advantages when compared to a conventional hydrocyclone of the same geometry. One of the researches carried out by the institution proposed a conventional geometrically optimized device whose objective was to achieve high efficiencies (HGOT1) when operated with Newtonian and diluted suspensions. Yet, several suspensions used in the chemical industry are non-Newtonian and concentrated suspensions. Hence, this work aims to evaluate the performance of two hydrocyclones, both geometrically inspired by the HGOT1, one being modified and having a cone made of filtering material and the other a conventional one (without the filtering media). Through a design of experiments, it was possible to study the effect of the volumetric concentration of solids fed, the pressure drop experienced by the hydrocyclones and the effect of the rheology of the fed suspension. Also, a three-dimensional, single-phase, transient state simulation involving the filtering hydrocyclone was conducted in order to develop an approach that is capable to describe this equipment. In conclusion, it was observed that the increase of the apparent viscosity and concentration of the suspension harmed the separation performance of hydrocyclones. When comparing the responses generated by conventional and filtering equipment, it was observed that they differ. The average total efficiency of conventional equipment was 4.1% lower than that of the filtering one. While the average Euler number of the filtering equipment was approximately 12% lower than the conventional one. It is believed, that even when operating with non-Newtonian and concentrated suspensions, the presence of the filter was able to change the fluid dynamics of the equipment, which guaranteed the filtering hydrocyclone an advantage in separation performance and energy consumption when compared to the conventional one.

Keywords: filtration, non-Newtonian, solids concentration.

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

---

## 1. INTRODUÇÃO

As técnicas de separação têm papel dominante nas indústrias químicas (SVAROVSKY, 2000). Essas tecnologias são demandadas quando é necessário que um determinado produto ou subproduto atinja determinadas características. As técnicas de separação podem ser aplicadas para segregar fases (como as de uma mistura sólido-sólido, líquido-sólido, líquido-gás). Alguns exemplos de processos de separação são: a destilação, a cristalização, a adsorção, a filtração, a ciclonação, a flotação, dentre outros.

O enfoque desta dissertação é na separação sólido-líquido utilizando hidrociclones. Esses equipamentos são operados com uma suspensão de sólidos em um fluido (comumente água) e são constituídos por uma região cilíndrica acoplada a um tronco de cone. A suspensão é alimentada de uma forma tangencial ao equipamento, fazendo com que ela desenvolva movimentos circulares dentro do equipamento. Tal movimentação gera um campo centrífugo que é responsável pelo processo de divisão da suspensão em duas correntes, a de *underflow* (contendo fluido e sólidos mais grossos) e a de *overflow* (contendo fluido e sólidos mais finos).

A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) possui um histórico notável de trabalhos sobre hidrociclonação. Essa instituição foi a responsável por criar o equipamento denominado hidrociclone filtrante, que é um equipamento não convencional, e foi utilizado nesta dissertação. Pesquisadores como Lanna, Barrozo e Damasceno (1992), Vieira (1997, 2001, 2006), Souza (1999), Arruda *et al.* (2002), Façanha (2012) e Salvador (2013) estudaram tal equipamento e comprovaram que a presença de uma matriz porosa era capaz de modificar o padrão de escoamento no interior do equipamento, beneficiando seu desempenho.

Kyriakidis (2018) associou o histórico de 20 anos sobre hidrociclones estudados na FEQUI/UFU com técnicas de otimização e buscou novas configurações geométricas para esse equipamento. Dentre as três novas geometrias otimizadas encontradas pela autora está o HGOT1 (**H**idrociclone **G**eometricamente **O**timizado do Caso 1), o qual foi capaz de proporcionar uma das mais altas eficiências totais em relação a todos os demais separadores até então estudados ao longo de duas décadas na FEQUI/UFU.

Um dos fatores que influencia o desempenho do hidrociclone é a reologia da suspensão alimentada ao equipamento (KAWATRA e EISELE, 1988) e a concentração de sólidos dessa suspensão (GHODRAT *et al.*, 2016). Boa parte dos estudos com hidrociclones usam fluidos newtonianos e diluídos. Entretanto, muitas aplicações práticas deste equipamento usam fluidos não-newtonianos e concentrados. Dependendo da característica reológica da suspensão e da concentração, a movimentação centrífuga dentro do hidrociclone pode ser reduzida, comprometendo sua função separadora (TIAN *et al.*, 2018; PADHI *et al.*, 2019). Desse modo, estudar como a reologia e concentração da suspensão interferem na operação de hidrociclonagem mostra-se uma tarefa necessária e importante.

### 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é avaliar como o comportamento reológico e concentração da suspensão impactam o funcionamento de um **Hidrociclone Convencional (HC)** e de um **Hidrociclone Filtrante (HF)** (ambos inspirados geometricamente no HGOT1).

Os objetivos específicos são listados na sequência:

- estudar o comportamento de um hidrociclone inspirado geometricamente no HGOT1, porém dotado de uma região cônica filtrante (chamado de HF) frente ao caráter não-newtoniano da suspensão;
- estudar o comportamento de um hidrociclone inspirado geometricamente no HGOT1 (chamado de HC), frente ao caráter não-newtoniano da suspensão;
- estudar o efeito provocado aos equipamentos HC e HF quando operados com suspensões concentradas;
- comparar as principais respostas da operação de hidrociclonagem entre os equipamentos convencional e filtrante;
- propor equações de desempenho a partir de regressões múltiplas que descrevam as respostas geradas pelos equipamentos;
- construir superfícies de resposta e curvas de eficiência que caracterizam os equipamentos.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desse capítulo é apresentar a revisão bibliográfica. Assim, serão abordados tópicos referentes aos hidrociclones (convencional e filtrante), tais como o funcionamento e modelagem matemática. Também será exposto um histórico desse equipamento em pesquisas realizadas pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) e em outras instituições. Neste capítulo também serão apresentadas informações pertinentes sobre a reologia do fluido e técnicas de fluidodinâmica computacional.

#### 2.1 HIDROCICLONES

##### 2.1.1 Funcionamento

Hidrociclones são utilizados com frequência para separar fases, seja separar sólidos de um líquido, seja apartar uma emulsão líquida, seja remover gases de um corpo líquido. Segundo Bradley (1965), em 1891 o primeiro hidrociclone foi patenteado por Bratney. Entretanto, o equipamento só ganhou destaque na indústria durante a década de 1940 quando Driessen (1939) provou a capacidade concentradora desse equipamento na indústria de carvão. Desde então, o hidrociclone vem ganhando espaço e destaque em diferentes tarefas industriais, tais como clarificação, espessamento e classificação.

Na Figura 2.1 representa-se uma vista em perspectiva do hidrociclone, em que é possível visualizar a região cilíndrica, a região cônica, os dutos de alimentação, de *overflow* e de *underflow* do equipamento. Ainda na Figura 2.1, apresenta-se uma vista lateral do hidrociclone com as regiões do equipamento e suas dimensões características. Na Figura 2.1 *Du* representa o diâmetro de *underflow*, *H* o comprimento da região cônica, *h* o comprimento da região cilíndrica, *Dc* o diâmetro da região cilíndrica, *l* o comprimento do *vortex finder*, *Di* o diâmetro do tubo de alimentação, *Do* o diâmetro de *overflow* e  $\theta$  o ângulo da região cônica.

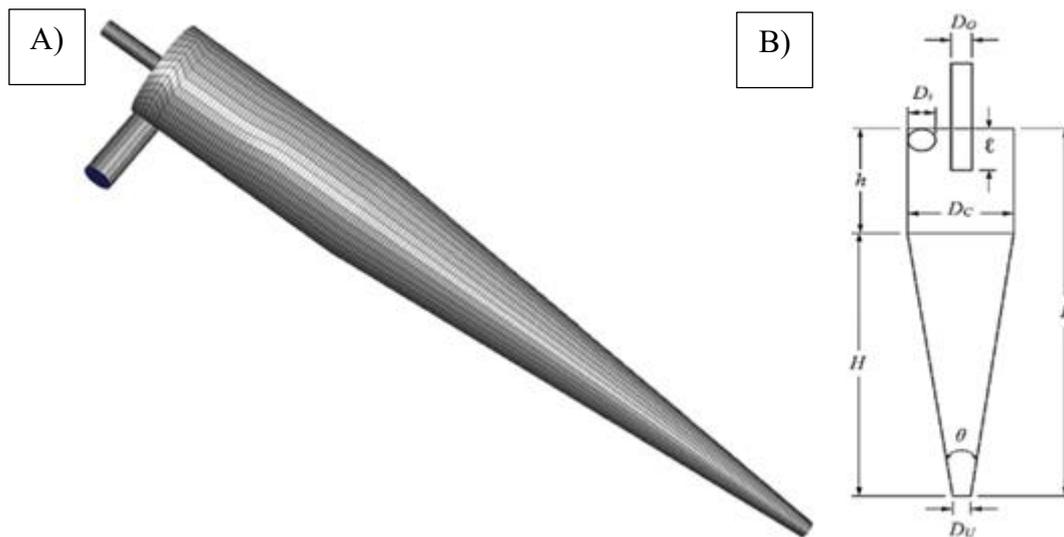


Figura 2.1 – (A) vista em perspectiva de um hidrociclone e (B) vista lateral do hidrociclone. Adaptado de Gonçalves (2019).

Na Figura 2.2 mostra-se um esquema simplificado da operação de hidrociclonagem, ilustrando que a suspensão entra no equipamento de forma tangencial ao cilindro. À medida que a suspensão adentra o hidrociclone, ela assume um movimento descendente espiralado (sendo esse, o chamado vórtice exterior). Por haver diferença de massa específica entre os componentes da suspensão, aqueles com maior massa específica ou tamanho serão direcionados às paredes. Esse movimento seguirá até a suspensão alcançar o orifício de *underflow*, onde parte da suspensão será expurgada gerando a chamada corrente de *underflow*. O restante da mistura terá seu movimento axial invertido e ascenderá, também, em um movimento espiralado (sendo esse, o chamado vórtice interior) e será coletada no topo do equipamento gerando a corrente de *overflow*. Esses movimentos espiralados formados dentro do equipamento geram um campo centrífugo. Uma partícula sob influência desse campo experimentará a ação da força centrífuga e tenderá a se mover em direção às paredes do hidrociclone (SVAROVSKY, 1984).

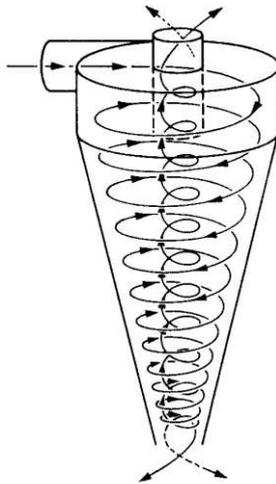


Figura 2.2 – Esquemática da trajetória espiralada da suspensão dentro de um hidrociclone. Adaptado de Bradley (1965).

Uma segunda força que as partículas experimentam dentro do equipamento é a força de arraste, gerada devido a interação entre as fases da suspensão. Essa força arrasta as partículas para a região central do equipamento (SVAROVSKY, 1984). Assim, a separação dos sólidos da fase fluida é proveniente do balanço entre a força centrífuga e a de arraste. Quando o módulo da força centrífuga excede o da força de arraste a partícula se moverá em direção à parede e ao vórtice externo; caso a força de arraste sobreponha em módulo a força centrífuga, a partícula se moverá em direção à região central do equipamento, ao vórtice interno. Assim, partículas que se encontram na região do vórtice exterior têm uma probabilidade maior de serem coletadas no orifício de *underflow* quando comparadas com partículas que estão situadas no vórtice interno (as quais serão mais propensas a serem coletadas na corrente de *overflow*).

A movimentação da suspensão dentro do equipamento é complexa, além de apresentar dois vórtices, também são observados curtos-circuitos, *air core* (BRADLEY, 1965), quebra de vórtices e inversão de fluxo (VIEIRA *et al.*, 2011). O curto-circuito ocorre quando existem regiões de menor resistência para o escoamento localizadas na região superior do equipamento. Esse tipo de fluxo faz com que parte da suspensão alimentada seja coletada no tubo de *overflow* sem sofrer ação do campo centrífugo, o que não é desejável, comprometendo, assim, a eficiência do equipamento (SVAROVSKY, 1984). O *air core* é uma estrutura observada no centro da região cilíndrica e cônica, sendo formada por uma fase gasosa que liga o orifício de *underflow* ao tubo de *overflow* (seja essa fase gasosa proveniente da própria suspensão, seja proveniente da atmosfera). O *air core* é formado devido à baixa pressão que existe na

região central do equipamento, alcançada devido aos movimentos espiralados existentes dentro do hidrociclone (SVAROVSKY, 1984). A formação de *air core* é desejável, uma vez que essa estrutura é um indicativo de estabilidade dos vórtices (BRADLEY, 1965). Na Figura 2.3 mostra-se um esquema simplificado desses dois fluxos.

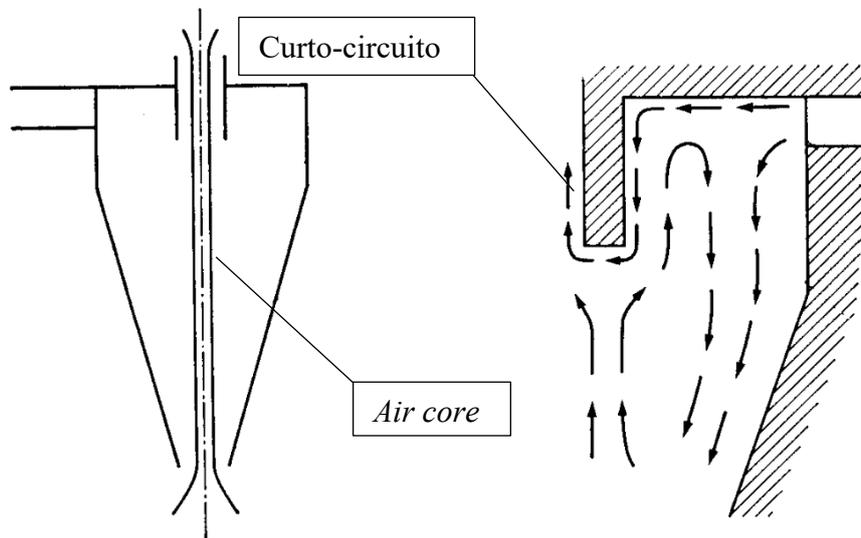


Figura 2.3 – Esquemática dos fluxos de *air core* e curto-circuito. Adaptado de Bradley (1965).

A movimentação da suspensão dentro do equipamento é ditada pela resultante de três componentes de velocidades, sendo elas: a velocidade tangencial ( $v_t$ ), velocidade axial ( $v_z$ ) e a velocidade radial ( $v_r$ ) (BRADLEY, 1965). A velocidade axial é a componente que informa se a partícula ou fluido tem um movimento ascendente ou descendente. Na Figura 2.4 mostram-se dois perfis de velocidade axial dentro do hidrociclone, sendo possível observar que essa componente de velocidade varia tanto com o raio do equipamento, quanto com a localização axial. A velocidade axial tem módulos maiores para seções localizadas mais próximas ao orifício de *underflow*. Outra característica do perfil de velocidade axial é a de que existe um ponto no raio da seção circular em que a velocidade é zero (KELSALL, 1952). É neste ponto em que existe a interface dos vórtices interno e externo, e é nessa região em que a suspensão experimenta um equilíbrio entre forças de arraste e centrífuga. A ligação entre os pontos onde a velocidade vertical é zero é chamada de Locus de Velocidade Vertical Zero (*Locus of zero vertical velocity, LZVV*).

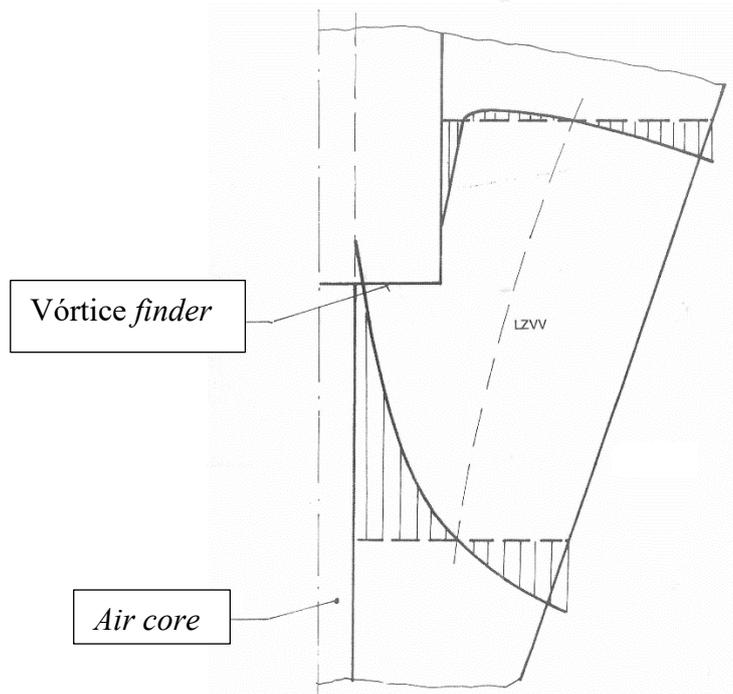


Figura 2.4 – Perfil de velocidade axial dentro do hidrociclone em duas seções diferentes e com detalhe no *Locus of zero vertical velocity (LZVV)*. Adaptado de Svarovsky (1984).

Bradley e Pulling (1958) conduziram estudos com hidrociclones de diâmetro da região cilíndrica entre 38 mm e 76 mm, e estabeleceram que o lócus de velocidade zero na região cilíndrica é uma linha reta (nomeada de manto). O manto está situado dentro de um raio que representa cerca de 21% do diâmetro (Figura 2.5).

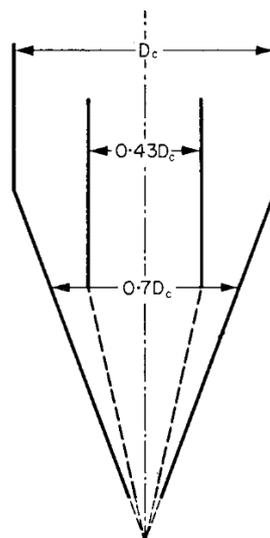


Figura 2.5 – Região onde a velocidade axial é zero em um hidrociclone. Adaptado de Bradley (1965).

A velocidade radial é a componente de menor módulo entre as três (BRADLEY, 1965), sendo intimamente ligada às forças de arraste (MACHACA, 2010). Desse modo, essa velocidade é uma variável crucial para as operações de classificação, pois é ela quem transportará a partícula para o vórtice interno ou externo (BERGSTRÖM e VOMHOFF, 2006). A velocidade radial decresce conforme se aproxima do interior do equipamento, sendo que o maior módulo dessa componente é encontrado nas paredes do equipamento (KELSALL, 1952). Na Figura 2.6 apresenta-se a esquematização das velocidades radiais em duas seções do hidrociclone.

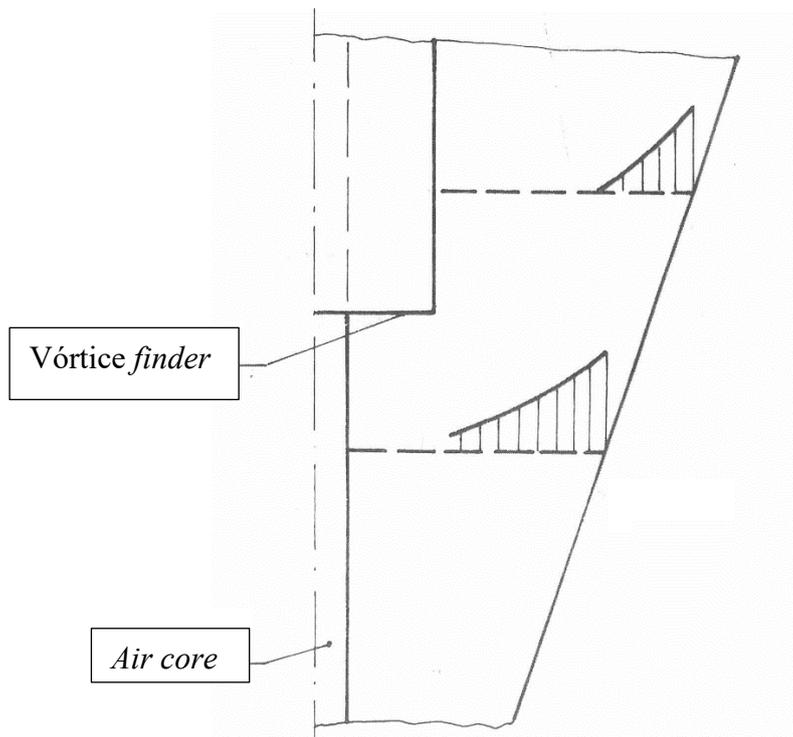


Figura 2.6 – Perfil de velocidade radial em duas seções do hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).

A velocidade tangencial é responsável por gerar as forças centrífugas (MACHACA, 2010). Na Figura 2.7 mostra-se como essa componente de velocidade varia de acordo com o raio e com diferentes seções circulares dentro do equipamento. Observa-se que o perfil de velocidade tangencial pode ser dividido em duas zonas: a primeira delas é situada onde a velocidade tangencial cresce no sentido da parede até um máximo, a segunda zona é aquela onde a velocidade decresce do máximo atingido na zona anterior até atingir o *air core* ou o *vortex finder*. De acordo com a literatura, a posição onde a máxima velocidade tangencial é obtida depende da geometria do equipamento. Kelsall (1952) afere que a localização desse máximo seja em torno de  $D_c/16,7$ , ao passo que

estudos realizados por Heiskanen (1993) indicam que a velocidade máxima ocorre em  $Dc/12$ .

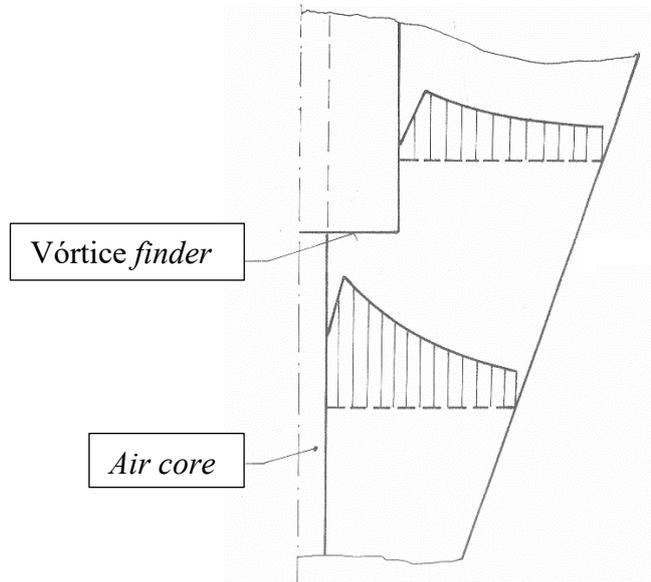


Figura 2.7 – Perfil de velocidade tangencial em duas seções do hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).

A primeira região pode ser descrita pela Equação 2.1, apresentada por Svarovsky (1984), em que  $v_t$  é a velocidade tangencial,  $r$  é o raio da seção circular e  $p$  é um expoente empírico:

$$v_t r^p = constante \quad (2.1)$$

Segundo Bradley (1965) o valor do expoente  $p$  está situado entre 0,5 e 0,9. Bergström e Vomhoff (2006) observaram que o parâmetro  $p$  depende tanto da geometria do equipamento quanto da presença de *air core*. Bergström e Vomhoff (2006) citaram os trabalhos de Yoshioka e Hotta (1955), os quais operaram um hidrociclone com a presença do *air core* e obtiveram valores  $p$  de 0,8. Por outro lado, Knowles, Woods e Feuerstein (1973) operaram um equipamento sem a presença do *air core*, e obtiveram valores para o parâmetro  $p$  de 0,2 e 0,4. A segunda zona pode ser descrita pela Equação 2.2 (BRADLEY, 1965):

$$v_t r^{-1} = constante \quad (2.2)$$

**2.1.2 Design**

As componentes geométricas do equipamento mencionadas na seção anterior ( $D_c$ ,  $l$ ,  $L$ ,  $h$ ,  $H$ ,  $D_o$ ,  $D_i$  e  $\theta$ ) ditam o funcionamento do equipamento (KYRIAKIDIS, 2018). A combinação dessas variáveis é capaz de determinar se um equipamento é adequado para tarefas de classificação, espessamento ou clarificação (WANG e YU, 2006). É muito comum representar as dimensões do equipamento como uma relação com o diâmetro da região cilíndrica. Hidrociclones com relações semelhantes fazem parte de uma mesma família. Na Tabela 2.1, mostram-se algumas famílias de hidrociclones e suas proporções geométricas (SVAROVSKY, 1984).

Tabela 2.1 – Relação geométrica para algumas famílias de hidrociclone. Adaptado de Svarovsky (1984).

Família	Proporções geométricas				
	$D_i/D_c$	$D_o/D_c$	$l/D_c$	$L/D_c$	$\theta$
Rietema	0,28	0,34	0,4	5	20°
Bradley	0,133	0,20	0,33	6,85	9°
Mozley	0,154	0,214	0,57	7,43	6°
RW 2515 (AKW)	0,20	0,32	0,8	6,24	15°
Hi-Klone model 2	0,175	0,25	0,92	5,6	10°
Demco	0,217	0,50	1,0	4,7	25°
Demco	0,244	0,313	0,833	3,9	20°
Rietema	0,14	0,14	0,4	2,5	28°
Dreissen	0,167	0,33	-	-	45°
Rietema	0,083	0,083	0,23	0,53	160°
Krebs	0,267	0,159	-	4,0	15°

Hidrociclones pertencentes a uma mesma família possuem características operacionais semelhantes (VIEIRA, 2006). Os hidrociclones da família Bradley possuem alta eficiência e alto consumo de energia. Em contrapartida, a família Rietema possui equipamentos que operam com uma maior vazão, demandando baixo consumo energético, porém operam com patamares de eficiência mais baixos (VIEIRA, 2006).

Svarovsky (2000) faz duas observações sobre a relação da geometria do hidrociclone com o seu funcionamento. A primeira delas é que uma variável geométrica que aumenta a resistência ao fluxo tende a aumentar a recuperação de sólidos. Svarovsky (2000) ilustra que um equipamento com um duto de entrada e duto de saída menores tenderá a recuperar mais material particulado. Entretanto, essa conquista é atingida ao custo de que o equipamento operará com uma vazão de líquido menor, uma vez que os

duto reduzido oferecem uma maior resistência ao fluxo. A segunda observação feita é que uma dimensão do equipamento deve, necessariamente, se manter ajustável durante a operação do equipamento, é sugerido que tal dimensão deva ser o diâmetro de *underflow* (*Du*). O correto ajuste de *Du* deve ser feito após o *start-up* da planta, esse ajuste é fundamental para se atingir a melhor condição operacional do equipamento, pois o tamanho ideal dessa variável não pode ser predito de maneira confiável (SVAROVSKY, 2000).

### 2.2 HIDROCICLONE FILTRANTE

Nem sempre um hidrociclone pertencente a uma família tradicional pode atender a demanda de operação do usuário. Desse modo, é possível modificar a estrutura do equipamento com a finalidade de que este possa atender às necessidades de uso, criando os hidrociclones não convencionais (VIEIRA; SILVA; BARROZO, 2013; VAKAMALA *et al.*, 2017; YE *et al.*, 2019b). A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) criou os hidrociclones filtrantes (sob o número de patente: PI0701118-0), os quais são equipamentos não convencionais obtidos quando um ou mais contornos do equipamento convencional são trocados de um material maciço para um permeável.

Na Figura 2.8 mostra-se um esquema do hidrociclone filtrante, que apresenta a mesma concepção de funcionamento de um hidrociclone convencional, com a adição de uma terceira corrente de saída (chamada de filtrado). Diferentemente de um filtro convencional, o hidrociclone filtrante não apresenta a formação de torta, porque dentro do equipamento há a atuação de forças cisalhantes sobre a parede do hidrociclone capazes de destruir essa estrutura (VIEIRA, 2006).

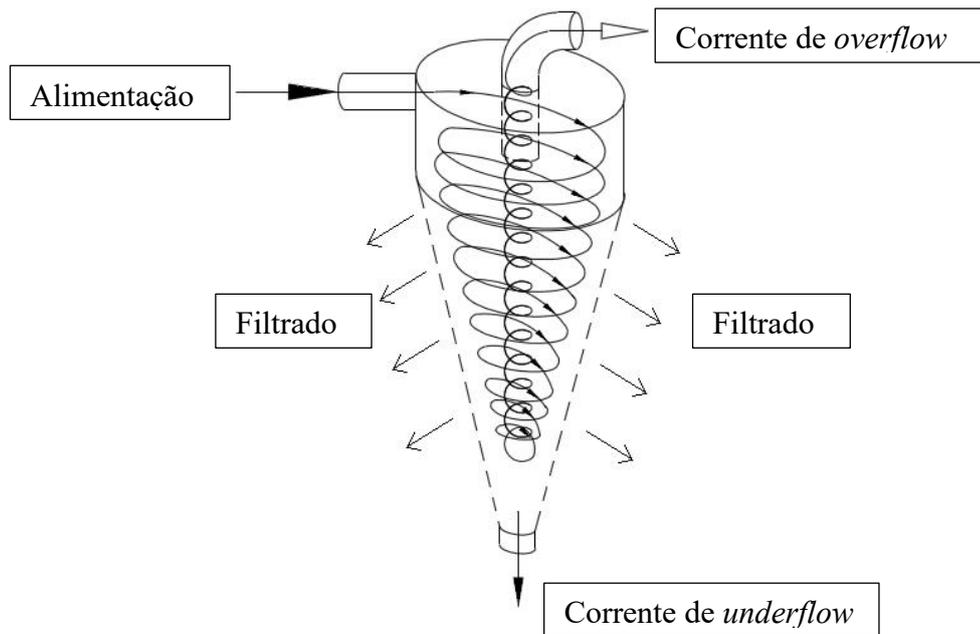


Figura 2.8 – Esquemática do funcionamento de um hidrociclone filtrante mostrando os movimentos espiralados da suspensão e as correntes de entrada, *underflow*, *overflow* e filtrado. Adaptado de Cruz (2008).

A alteração de uma região do hidrociclone convencional por um material filtrante pode provocar mudanças na fluidodinâmica no interior do equipamento (VIEIRA, 2006), desse modo influenciando respostas como: eficiência, diâmetro de corte e consumo energético (VIEIRA, 2006). Em relação aos hidrociclones (convencional e filtrante), a FEQUI/UFU possui diversos trabalhos que buscam compreender seu funcionamento. Tais trabalhos serão mencionados em uma seção posterior (seção 2.6).

### 2.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO HIDROCICLONE

O formalismo matemático utilizado neste estudo é apresentado nessa seção. As respostas de interesse geradas pela operação de hidrociclonagem, bem como informações que auxiliam a compreensão do equipamento são: concentração volumétrica, massa específica de uma corrente, capacidade de operação, número de Euler, razão de líquido, diâmetro de corte, diâmetro de corte reduzido, eficiência (total e total reduzida), eficiência granulométrica e eficiência granulométrica reduzida.

#### 2.3.1 Concentração Volumétrica ( $C_{vi}$ )

A Equação 2.3 representa a concentração volumétrica de uma corrente genérica “ $i$ ” e apresenta a relação entre os volumes de sólidos com o volume total da suspensão (volume de sólidos + volume do líquido).

$$C_{Vi} = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_{Wi}} - 1 \right) + 1} \quad (2.3)$$

Nessa expressão o parâmetro  $C_{Wi}$  indica a concentração mássica de uma corrente genérica e pode ser determinado a partir de técnicas gravimétricas,  $\rho_s$  indica a massa específica do sólido e  $\rho$  a massa específica do fluido utilizado.

### 2.3.2 Massa específica ( $\rho_i$ ) e Vazão Volumétrica ( $Q_i$ )

A massa específica pode ser calculada pela Equação 2.4 e a vazão volumétrica pela Equação 2.5, nessa expressão o termo  $W_i$  indica a vazão mássica e pode ser determinado gravimetricamente.

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

$$Q_i = \frac{W_i}{\rho_i} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 Razão de Líquido (RL)

A razão de líquido, representada pela Equação 2.6, é a relação entre o volume de líquido presente na corrente de *underflow* com o originalmente alimentado. Na Equação 2.6,  $Q_U$  refere-se à vazão volumétrica da corrente de *underflow*,  $C_{VU}$  é a concentração volumétrica de sólidos da corrente de *underflow*,  $Q_A$  é a corrente volumétrica alimentada ao hidrociclone e  $C_{VA}$  é a concentração volumétrica de sólidos da alimentação. Independentemente do efeito centrífugo do equipamento, o hidrociclone age como um divisor de correntes o que faz com que parte da suspensão seja coletada no orifício de *underflow* sem, necessariamente, sofrer a ação do campo centrífugo. Esse fenômeno é conhecido como efeito T e é relacionado com a razão de líquido.

$$RL = \frac{Q_U (1 - C_{VU})}{Q_A (1 - C_{VA})} \quad (2.6)$$

### 2.3.4 Número de Euler (Eu)

A Equação 2.7 apresenta o número de Euler, um adimensional que relaciona a queda de pressão experimentada pelo equipamento ( $-\Delta P$ ) (a tomada de pressão ocorre entre a corrente de alimentação e a corrente de *overflow*) com a energia cinética por

unidade de volume. Esse adimensional é um indicativo do consumo energético demandado para bombear a suspensão por entre o equipamento.

$$Eu = \frac{(-\Delta P)}{\frac{\rho}{2} \left( \frac{4Q_A}{\pi Dc^2} \right)^2} \quad (2.7)$$

### 2.3.5 Eficiência Total ( $\eta$ ) e Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ )

A Equação 2.8 e a Equação 2.9, respectivamente descrevem a eficiência total e a total reduzida, ambas são uma relação entre a massa de material sólido coletado na corrente de *underflow* com o originalmente alimentado ao equipamento. A diferença entre a eficiência total reduzida e a eficiência total, é que a primeira considera apenas as partículas que chegam à corrente de *underflow* devido ao efeito centrífugo (então é necessário descontar o material particulado coletado devido ao efeito T do equipamento), ao passo que a última não discrimina por qual efeito a partícula alcança a corrente inferior (efeito T ou efeito do campo centrífugo).

$$\eta = \frac{C_{WU} W_U}{C_{WA} W_A} \quad (2.8)$$

$$\eta' = \frac{\eta - RL}{1 - RL} \quad (2.9)$$

### 2.3.6 Eficiência Granulométrica ( $G$ ) e Eficiência Granulométrica Reduzida ( $G'$ )

Tanto a eficiência granulométrica (Equação 2.10), quanto a reduzida (Equação 2.11) informam a separação por tamanho de partícula. A eficiência granulométrica leva em consideração o produto entre a eficiência total e a relação da distribuição granulométrica da corrente de *underflow* com a distribuição granulométrica da corrente de alimentação. De maneira semelhante, a eficiência granulométrica reduzida também leva em consideração os mesmos parâmetros utilizados na eficiência granulométrica. A diferença entre as duas é que a eficiência granulométrica reduzida leva em consideração apenas o sólido captado pela corrente de *underflow* devido a ação centrífuga, desse modo é necessário que o material coletado devido ao efeito T seja descontado do cálculo.

$$G = \eta \frac{dX_U}{dX_A} \quad (2.10)$$

$$G' = \frac{G - RL}{1 - RL} \quad (2.11)$$

A distribuição granulométrica é uma expressão matemática ajustada a partir de modelos reportados na literatura, cujo objetivo é representar a porcentagem acumulada de material particulado, o qual possui um diâmetro igual ou inferior a um determinado valor.

### **2.3.7 Diâmetro de Corte ( $d_{50}$ ) e Diâmetro de Corte Reduzido ( $d'_{50}$ )**

O diâmetro de corte pertence à partícula que possui 50% de chance de ser coletada na corrente de *underflow* (Massarani, 2002) independentemente do efeito que a coleta (efeito T ou efeito do campo centrífugo). Já o diâmetro de corte reduzido representa a dimensão da partícula que tem 50% de probabilidade de ser coletada na corrente de *underflow* considerando apenas o efeito centrífugo do equipamento.

## **2.4 REOLOGIA**

O objetivo dessa seção é introduzir conceitos sobre reologia que serão utilizados no decorrer do texto. Trabalhos que envolvem a operação de hidrociclonagem utilizando suspensões de caráter não-newtoniano serão apresentadas em uma seção posterior (seção 2.6). Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura investigam a operação de hidrociclonagem usando fluidos newtonianos (como exposto na seção 2.6); entretanto, diversos fluidos utilizados nas indústrias possuem caráter não-newtoniano e têm viscosidades elevadas (GONÇALVES, 2019). Deste modo, com o intuito de investigar o processo de hidrociclonagem em condições mais próximas às das indústrias, foi proposto, neste trabalho, a investigação dos efeitos provocados pela reologia da suspensão.

A reologia é um ramo da ciência mecânica cujo objeto de estudo são as deformações de sólidos e escoamento de fluidos sob ação de tensões. Se sob condições estacionárias, de temperatura, pressão e concentração, um determinado fluido apresentar viscosidade constante, independentemente da taxa de deformação aplicada, ele é dito newtoniano (CHHABRA e RICHARDSON, 2008). A Equação 2.12 representa um fluido incompressível e newtoniano em escoamento laminar, em que o produto entre a viscosidade ( $\mu$ ) e a taxa de deformação ( $\gamma$ ) gera a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ). Já a taxa de deformação pode ser calculada pelo gradiente de velocidade na direção perpendicular à tensão de cisalhamento (CHHABRA e RICHARDSON, 2008).

$$\tau = \mu\gamma \quad (2.12)$$

Por outro lado, um fluido é chamado de não-newtoniano quando sua tensão de cisalhamento não varia de maneira proporcional à taxa de deformação. Nesse tipo de fluido a viscosidade não é constante, sendo uma função da taxa de deformação aplicada a ele (CHHABRA e RICHARDSON, 2008). Os fluidos não-newtonianos podem ser divididos em três classes (CHHABRA e RICHARDSON, 2008):

- a) fluidos cuja tensão de cisalhamento é determinada somente pela taxa de deformação e independem da variável tempo;
- b) fluidos que possuem uma tensão de cisalhamento dependendo da taxa de deformação e do tempo;
- c) fluidos que demonstram comportamento de um fluido ideal e de um sólido elástico, demonstrando uma recuperação elástica parcial mesmo depois de se deformarem.

### ***2.4.1 Fluidos com comportamento independente do tempo***

Essa classe de fluido não-newtoniano pode ser subdividida em três grupos:

- a) fluidos pseudoplásticos: têm uma redução da viscosidade quando a taxa de deformação aplicada sobre eles aumenta;
- b) fluidos dilatantes: apresentam um comportamento inverso ao observado nos fluidos pseudoplástico. Desse modo, se tornam mais viscosos à medida que a taxa de deformação sobre eles aumenta;
- c) fluidos viscoplásticos (ou fluidos de *Bingham*): se diferenciam dos dois primeiros por possuírem uma tensão de cisalhamento crítica, o que significa que somente sofrerão deformação se experimentarem uma tensão de cisalhamento que ultrapasse a tensão crítica.

Tanto os fluidos pseudoplásticos, dilatantes e viscoplásticos possuem suas tensões de cisalhamento como uma função não-linear da taxa de deformação. Na Figura 2.9 mostra-se, esquematicamente, o comportamento da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para esses três fluidos não-newtonianos e para um fluido newtoniano.

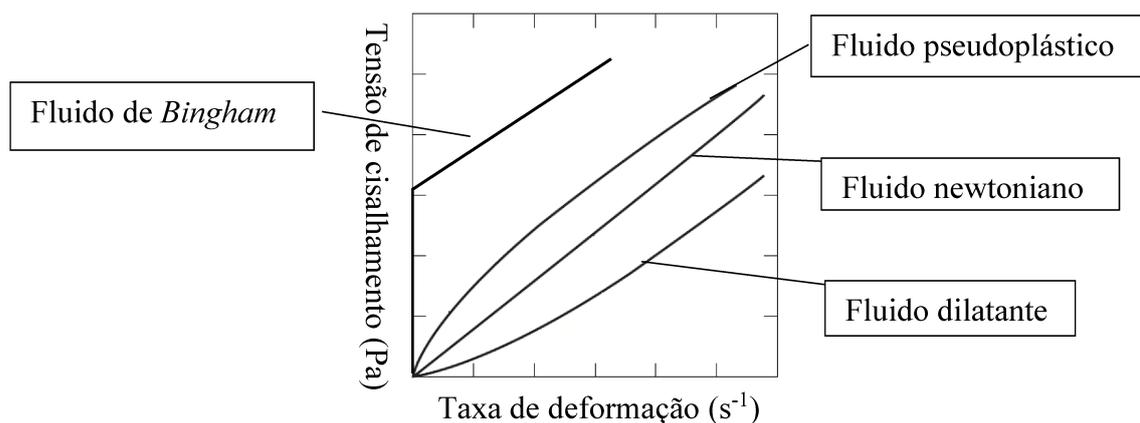


Figura 2.9 – Esquematização do comportamento da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para diferentes tipos de fluidos. Adaptado de Chhabra e Richardson (2008).

Kawatra e Eisele (1988) expõe que a viscosidade de uma suspensão formada por um líquido e contendo material particulado depende fortemente de quatro parâmetros:

- quantidade de material particulado: quanto maior a quantidade de material suspenso maior será a viscosidade da suspensão;
- granulometria do material: para duas suspensões com a mesma quantidade de material particulado, é de se esperar que aquela que possuir mais partículas finas em sua composição apresente uma viscosidade maior, isso ocorre devido ao aumento da área superficial;
- temperatura: um acréscimo na temperatura tende a diminuir a viscosidade da fase carreadora;
- meio químico: a presença de materiais químicos pode influenciar na viscosidade da suspensão. Tais materiais podem agir como espessantes ou como dispersantes (ORTEGA-RIVAS e SVAROVSKY, 1998; TAVARES *et al.*, 2002; SCHEID *et al.*, 2013; MOGNON *et al.*, 2016).

A viscosidade da suspensão desempenha um importante papel para as operações de hidrociclonagem (BRADLEY, 1965), podendo ditar o ritmo da velocidade de assentamento das partículas em suspensão (KAWATRA; BAKSHI; EISELE, 1999). Desse modo, a correta caracterização da viscosidade é uma tarefa importante para a descrição matemática da operação de hidrociclonagem. Nesse cenário, é indispensável a utilização de modelos adequados para descrever o comportamento reológico da suspensão.

O caráter da maioria das suspensões utilizadas neste trabalho foi pseudoplástico. A literatura propõe alguns modelos de uso consagrado para a descrição do comportamento desse tipo de fluido, como o modelo *Power-Law* (CHHABRA e RICHARDSON, 2008), a equação de Carreau (CARREAU, 1972), a equação de Cross (CROSS, 1965), o modelo de fluido de Ellis e o modelo de Herschel-Bulkley (CHHABRA e RICHARDSON, 2008).

Na presente dissertação, os fluidos se enquadraram no modelo *Power-Law* (Equação 2.13). Esse modelo apresenta dois parâmetros a serem ajustados experimentalmente, sendo eles, o coeficiente de consistência do fluido ( $K$ ) e o índice de comportamento do fluido ( $n$ ). A viscosidade aparente do fluido é uma variável de interesse nos estudos de reologia, ela pode ser calculada como a relação entre a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação (Equação 2.14) (SCHEID *et al.*, 2013).

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (2.13)$$

$$\mu' = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (2.14)$$

É importante salientar que o modelo de *Power-Law* não prevê de maneira correta o comportamento do fluido pseudoplástico frente a baixa ou alta taxa de deformação. Nessas duas regiões a viscosidade da suspensão é praticamente constante, sendo representada por  $\mu_0$  (em baixa taxa de deformação) e  $\mu_\infty$  (em alta taxa de deformação), como mostrado na Figura 2.10. Desse modo, o modelo deve ser aplicado com cautela. Apesar de ser difícil de generalizar em quais valores de taxa de deformação as viscosidades se tornam constantes, Chhabra e Richardson (2008) indicam que muitos materiais têm taxas de deformação limites para a utilização do modelo de *Power-Law* entre  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $10^5 \text{ s}^{-1}$ .

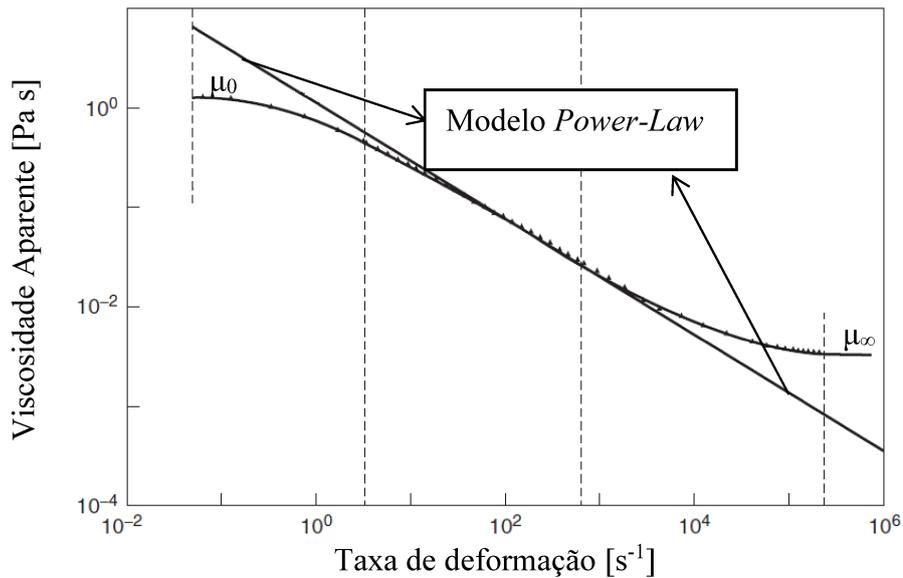


Figura 2.10 – Demonstração do ajuste do modelo *Power-Law* de um fluido pseudoplástico, com destaque nos extremos do ajuste, onde a viscosidade se torna constante. Adaptado de Boger, 1977.

Como exposto, a taxa de deformação pode ser calculada a partir do gradiente de velocidade na direção perpendicular à tensão de cisalhamento (Equação 2.15). Dentro do hidrociclone a força que desempenha o papel da tensão de cisalhamento é a força centrífuga (TAVARES *et al.*, 2002; XU *et al.*, 2016).

$$\gamma = \frac{dv_t}{dr} \quad (2.15)$$

## 2.5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) é uma técnica empregada com a finalidade de simular o comportamento de um determinado fluido frente às condições impostas pelo usuário. Baseado nas técnicas de CFD, é possível obter informações como a trajetória de uma partícula dentro do hidrociclone (HOFFMAN; SKORPEN; CHANG, 2019), perfis de velocidade axial, radial, tangencial (SILVA, 2012; ZHOU *et al.*, 2018), perfis de taxa de deformação (XU *et al.*, 2016), contornos de densidade (VAKAMALLA e MANGADODDY, 2015) e contornos de pressão (VEGA-GARCIA; BRITO-PARADA; CILLIERS, 2018). Nesta seção serão apresentados alguns dos conceitos e técnicas referentes à fluidodinâmica computacional. Mais adiante (seção 2.6) serão apresentados alguns trabalhos que aplicam as técnicas de CFD mencionadas na operação de hidrociclonagem.

A fluidodinâmica computacional é uma forma de transpor limitações impostas pelo experimentalismo. Utilizando as técnicas de CFD é possível realizar previsões e obter dados mesmo sem a aquisição de uma matéria-prima cara, ou obter dados sem operar uma unidade experimental em condições consideradas perigosas (SILVA, 2012). Entretanto, como as técnicas de CFD não excluem a parte experimental de um estudo, a modelagem empregada deve ser validada com o auxílio de experimentos (MURPHY *et al.*, 2007).

O escoamento dentro de um hidrociclone apresenta um caráter turbulento. Uma simples tentativa de se definir a turbulência é proposta por Bird, Stewart e Lightfoot (2004), os quais explicam que a turbulência é um regime de escoamento atingido por um fluido quando seu perfil de velocidade flutua de forma caótica de acordo com o tempo e espaço. Um indicativo de que esse regime foi atingido ocorre quando o número de Reynolds ultrapassa o valor de 2100 (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004), sendo essa estimativa válida para escoamentos em tubos. Uma singularidade do regime turbulento é a alta magnitude dos gradientes de propriedades ligadas ao escoamento do fluido, os quais se propagam na direção do escoamento favorecendo os processos de difusão de massa e energia (VIEIRA, 2006). Em adição, o regime turbulento é um fenômeno tridimensional, transiente, rotacional possuindo vorticidade, multiplicidade de escalas e dependente das condições iniciais (SILVA, 2012).

A modelagem de qualquer regime pode ser realizada utilizando as Equações de Navier-Stokes. Entretanto, um problema associado a um alto número de Reynolds é a existência de estruturas que demandam um custo computacional elevado para serem calculadas (VIEIRA, 2006). No intuito de modelar a turbulência e contornar as dificuldades impostas por esse regime, é necessário tratar as equações de Navier-Stokes na forma de um grupo de equações médias ou de um rol de equações filtradas (SILVA, 2012). A manipulação das equações de Navier-Stokes por essas duas metodologias se faz por meio da introdução de termos adicionais, os quais devem ser modelados usando os chamados Modelos de Turbulência (VIEIRA, 2006).

Os modelos de turbulência podem ser classificados segundo sua dependência da viscosidade turbulenta (um parâmetro que depende apenas do escoamento do fluido no espaço e tempo e não do fluido em si). A caracterização da viscosidade turbulenta não é uma tarefa trivial, sua modelagem demanda um conjunto de equações não-lineares a serem resolvidas (VIEIRA, 2006).

Um exemplo de modelo de turbulência dependente da viscosidade turbulenta é o *Large Edge Simulation* (LES) (VIEIRA, 2006). Por outro lado, um exemplo de um modelo que não depende da viscosidade turbulenta é o *Reynolds Stress Model* (RSM). Esse modelo conta com seis equações de transporte cada uma representando uma componente do tensor de Reynolds.

Além da turbulência dentro do hidrociclone, existe mais de uma fase em fluxo, como uma fase líquida (água), uma fase gasosa (ar) e uma fase sólida (material particulado). Para a caracterização dessas fases, existe a possibilidade de emprego de duas abordagens para o tratamento de escoamentos multifásicos sendo elas Euler-Euler e Euler-Lagrange (SILVA, 2012). A primeira pondera que as fases do sistema são interpenetrantes entre si, desse modo é necessário que exista equações de conservação para cada uma dessas fases (SILVA, 2012). O tratamento do fluxo multifásico, segundo a abordagem Euler-Lagrange, considera a possibilidade de modelar a fase contínua a partir das equações médias de Navier-Stokes em estado transiente (URANS) (VIEIRA, 2006).

Um primeiro exemplo de modelo multifásico segundo a abordagem Euler-Euler é o Modelo Volume de Fluido (*Volume of Fluid*, VOF). Esse artifício matemático pode modelar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo equações de momento e rastreando a fração de volume por todo o domínio do fluido (FLUENT INC, 2019). Esse modelo deve ser empregado quando existe a formação de uma interface bem definida entre duas fases imiscíveis (VIERA, 2006). São exemplos de aplicação em que o modelo VOF é empregado: movimentação de grandes bolhas dentro de um líquido, descrição do *air core* dentro de um hidrociclone e movimentação de líquido após o rompimento de uma barragem.

Um segundo modelo multifásico seguindo a abordagem Euler-Euler é o Modelo de Mistura. Esse modelo pode ser utilizado para cálculos cujas fases se movem com velocidades diferentes, também pode ser utilizado para modelar diferentes fases homogêneas dentro de um fluxo multifásico (FLUENT INC, 2019). É recomendável a utilização desse modelo quando a fração volumétrica da fase discreta não representa mais que 10% do volume total da suspensão (SILVA, 2012).

Os modelos apresentados anteriormente demandam uma resolução simultânea de equações diferenciais parciais. Soluções para tais equações podem ser difíceis ou até

mesmo impossíveis de serem obtidas de maneira analítica, assim é necessário que sejam aplicadas técnicas numéricas para resolvê-las. Métodos numéricos transformam as equações diferenciais parciais em equações algébricas por meio de técnicas de discretização, desse modo a informação de uma determinada variável é conhecida somente em alguns pontos do domínio (nos chamados nós) (VIEIRA, 2006).

Um procedimento numérico conhecido é o Método Dos Elementos Finitos. Nessa metodologia uma determinada variável é calculada em pontos da malha (a malha é a região discretizada por onde o fluido flui) e com o auxílio de funções interpoladoras é possível descobrir os valores dessa variável entre esses pontos (VIERA, 2006). Um segundo procedimento numérico é o Método Das Diferenças Finitas. Nessa metodologia os valores de interesse da variável são calculados apenas em determinados nós da malha, não existindo qualquer descrição do comportamento entre um nó e outro. Nessa metodologia não existem volumes de controle, mas pontos de discretização (SILVA, 2012).

Por fim, existe um terceiro procedimento chamado de Método dos Volumes Finitos (PATANKAR, 1980), o qual mescla características dos dois primeiros procedimentos matemáticos. A utilização desse último método desperta interesse, uma vez que a solução gerada possibilita a conservação de quantidades de massa, energia e momento (SILVA, 2012). Nesse método, o domínio é subdividido em inúmeros volumes de controle onde o ponto central é o ponto de interesse (VIEIRA, 2006).

O *software* FLUENT<sup>®</sup> disponibiliza ao usuário técnicas de interpolação tais como: *Power-Law*, diferenças centrais, *upwind* de primeira e segunda ordem e QUICK. Nos estudos de CFD, durante os cálculos matemáticos para a integração das equações de transporte em cada um dos volumes de controle, a pressão em um momento inicial não é levada em consideração (MEIER, 1998). A estimativa de pressão é feita num momento posterior por meio de um acoplamento dessa variável com o termo da velocidade, que é feita segundo uma combinação entre a equação do movimento com a equação da continuidade (VIEIRA, 2006).

O *software* também disponibiliza algoritmos para acoplamento de pressão com velocidade como o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), o qual corrige a pressão a cada iteração da velocidade (CARETTO *et al.*, 1972). O cálculo da pressão é feito no ponto central do volume de controle, assim, é necessário que sejam

feitas interpolações para descrever essa variável situada entre diferentes nós (VIEIRA, 2006). O *software* FLUENT® fornece ferramentas capazes de executar tais interpolações como o PRESTO! (*Pressure Straggering Option*) (PATANKAR, 1980).

Vieira (2006) foi o primeiro pesquisador a investigar computacionalmente o comportamento do hidrociclone filtrante, o que auxiliou a compreender melhor o comportamento do fluido no interior do equipamento. Entretanto, uma das características das simulações feitas pelo autor é que elas foram conduzidas de forma bidimensional e desde então, nenhuma simulação envolvendo o hidrociclone filtrante foi feita de maneira tridimensional. Deste modo, neste trabalho foi proposta uma abordagem computacional com o intuito de simular o hidrociclone filtrante em três dimensões e em estado transiente. Tal simulação, mesmo que conduzida apenas com água, é uma contribuição que abre caminhos para futuras simulações envolvendo o hidrociclone filtrante.

No Apêndice A deste trabalho apresenta-se essa abordagem computacional que tem como intuito modelar computacionalmente o hidrociclone filtrante usando apenas água (fluido newtoniano e incompressível). Os resultados computacionais obtidos, mesmo não auxiliando à compreensão dos resultados experimentais, apresentam um avanço significativo para o grupo do Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da FEQUI/UFU por ser a primeira simulação envolvendo o equipamento filtrante tridimensional e em estado transiente. Desta forma, esses dados inéditos podem nortear futuras pesquisas a desenvolver melhores abordagens computacionais para o equipamento filtrante.

## 2.6 HISTÓRICO DE ESTUDOS EM HIDROCICLONES

O objetivo dessa seção é apresentar alguns trabalhos relativos à hidrociclonagem que auxiliam na compreensão do funcionamento do equipamento e dos resultados experimentais obtidos. Serão mostradas pesquisas que investigam o funcionamento de equipamentos convencionais e não-convencionais, operando com suspensões diluídas, concentradas, newtonianas e não-newtonianas. Serão abordados trabalhos realizados na Universidade Federal de Uberlândia pela Faculdade de Engenharia Química (FEQUI/UFU) e em outras instituições de pesquisa.

### 2.6.1 Hidrociclonagem na FEQUI/UFU

Nessa seção são mostradas algumas das diversas pesquisas que envolvem o hidrociclone convencional e filtrante realizadas na FEQUI/UFU. Observa-se que a

maioria dos trabalhos apresentados investigam os efeitos provocados pelas variáveis geométricas. A maioria desses estudos utiliza suspensões newtonianas e diluídas. Desse modo, existe uma deficiência em ensaios que investigam o efeito da reologia e da concentração da suspensão nos hidrociclones convencionais e filtrantes na FEQUI/UFU, o que justifica o objetivo desse trabalho.

Os primeiros estudos utilizando um hidrociclone filtrante realizados na FEQUI/UFU pertencem a Lanna, Barrozo e Damasceno (1992), Vieira (1997) e Souza (1999). Estes pesquisadores trocaram a parte cônica maciça do equipamento por cones feitos em *nylon*, propileno e bronze com o objetivo de estudar o comportamento do hidrociclone associado à operação de filtração. Todos os autores concluíram que a presença da parede permeável tende a diminuir o consumo energético e aumentar a concentração de sólidos na corrente de *underflow* do equipamento. As conclusões alcançadas por esses cientistas impulsionaram e inspiraram novos pesquisadores a seguir investigando esse equipamento ímpar.

Com o passar dos anos, novos trabalhos envolvendo os hidrociclones filtrantes foram desenvolvidos. Vieira (2001) comparou o comportamento de um hidrociclone da família Rietema quando operado com uma superfície filtrante. Em adição, Arruda *et al.* (2002) estudaram um hidrociclone filtrante com dimensões pertencentes às famílias Krebs e DEMCO.

Vieira (2006) propôs um planejamento composto central (PCC) relacionando as principais variáveis geométricas do hidrociclone, e criou 25 combinações geométricas de hidrociclones filtrantes. Os equipamentos foram operados com suspensões diluídas e newtonianas. O autor reconfirmou o fato de que a filtração associada à hidrociclonagem alterou o desempenho dos hidrociclones. Além disso, foi visto que os hidrociclones filtrantes quando comparados com os hidrociclones convencionais a uma mesma vazão de alimentação, apresentaram menores quedas de pressão o que significa uma menor demanda energética.

Além disso, Vieira (2006) utilizou técnicas de CFD e mostrou como a fluidodinâmica do equipamento filtrante é diferente da do convencional. Uma das conclusões de Vieira (2006) foi que o equipamento filtrante (HF) possuiu um perfil de velocidade radial, em módulo, menos intenso do que o hidrociclone convencional (HC) (Figura 2.11). Isso fez com que o fluxo de material particulado que parte do vórtice

externo em direção ao interno fosse menos intenso no HF, fazendo com que esse sólido fosse coletado no orifício de *underflow* com maior facilidade.

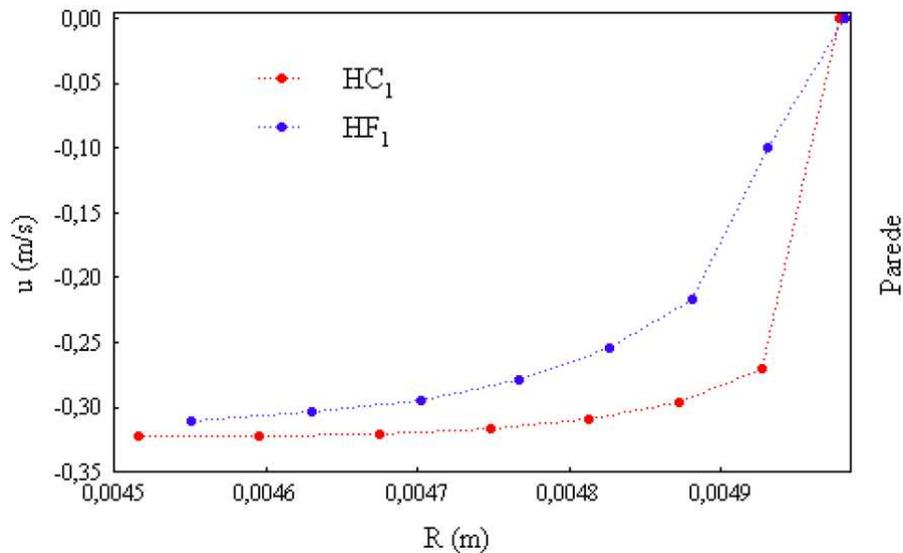


Figura 2.11 – Perfil de velocidade radial próximo à parede dos equipamentos HC1 e HF1 propostos por Vieira (2006). Fonte: Vieira (2006).

Por fim, o autor concluiu que a filtração foi um fenômeno benéfico para a separação sólido-líquido quando associada ao hidrociclone, pois além de diminuir o consumo energético, a eficiência total de coleta foi majorada. É interessante mencionar duas combinações geométricas obtidas pelo autor, o HF11 (**H**idrociclone **F**iltrante número 11) e o HC11 (**H**idrociclone **C**onvencional número 11), as quais apresentaram o melhor desempenho de separação entre as geometrias estudadas e serviram de estímulo para futuras pesquisas.

Almeida (2008) deu continuidade ao trabalho de Vieira (2006) ao estudar o comportamento do HF11 e HC11 variando o diâmetro do orifício de *underflow* e comprimento do *vortex finder*. Almeida (2008) constatou que o equipamento filtrante teve um consumo energético menor do que o convencional em todas as condições experimentais analisadas. Em adição, o autor também concluiu que o equipamento filtrante também teve uma maior capacidade de coleta de material particulado.

Partindo do HF11, Façanha (2012) propôs estudos com o intuito de avaliar como o posicionamento da região filtrante, seja na região cilíndrica (gerando o chamado **H**idrociclone **C**ilindro **F**iltrante - HCiF), seja na região cônica (gerando o chamado **H**idrociclone **C**one **F**iltrante - HCoF) impactam no desempenho do equipamento. Foi avaliado o comportamento de respostas como capacidade de operação, número de Euler,

eficiência de coleta, razão de líquido e diâmetro de corte. A autora, como os autores passados, concluiu que hidrociclones filtrantes e convencionais apresentam respostas diferentes. Façanha (2012) apontou que para algumas respostas (número de Euler, razão de líquido) o HCoF e o HCiF apresentaram uma mesma tendência de comportamento à medida que a região filtrante foi alterada. Entretanto, foi mostrado que para outras respostas (diâmetro de corte reduzido e eficiência total reduzida) a tendência de comportamento foi oposta.

Dando continuidade ao trabalho de Vieira (2006), Silva (2012) propôs modificações no HC11. O autor sugeriu alterações na espessura da parede do *vortex finder*, com o objetivo de diminuir a eficiência de separação para partículas maiores (WANG e YU, 2008). Uma segunda alteração proposta foi a respeito do tipo do *vortex finder*. Com o intuito de diminuir o fluxo de curto-circuito, a utilização de um *vortex finder* do tipo coifa se mostrou apropriada (WANG e YU, 2008). Silva (2012) também propôs uma rampa de alimentação, tal mecanismo fez com que o fluido não experimentasse tanta turbulência ao ser alimentado no equipamento (MORGAN, 2004). Por fim, Silva (2012), baseando-se em estudos realizados por Kyriakidis e Vieira (2010), estudou o efeito de uma alimentação dotada de movimento rotacional com o intuito de diminuir o número de Euler e aumentar a razão de líquido.

A respeito da espessura do *vortex finder*, Silva (2012) concluiu que à medida que essa variável de estudo foi majorada, a perda de carga inicialmente diminuiu e então aumentou. Além disso, Silva (2012) expôs que o número de Euler foi indiferente à variação da espessura do *vortex finder*. O autor ainda concluiu que a coifa presente no *vortex finder* modificou o escoamento dentro do equipamento, fazendo com que o diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido fossem diminuídos, implicando em uma maior separação de finos pelo hidrociclone. A partir das equações empíricas propostas por Vieira (2006), Silva (2012) aplicou uma metodologia de otimização nomeada de Algoritmo de Evolução Diferencial, obtendo três geometrias de hidrociclones: HCOT1 (equipamento de alta eficiência total de separação), HCOT2 (equipamento de baixa razão de líquido) e HCOT3 (equipamento de baixo consumo energético).

No ano seguinte, Salvador (2013) investigou o comportamento dos equipamentos do tipo HCiF, HCoF, **Hidrociclone Convencional (HCon)** e **Hidrociclone Cilindro Cone Filtrante (HCiCoF)**. A autora estudou como o diâmetro do orifício de *underflow* e diferentes permeabilidades do material poroso influenciam na operação de

hidrociclonagem. A autora concluiu que para todos os tipos de hidrociclone estudados, à medida que o diâmetro do orifício de *underflow* aumentou, a capacidade de operação também aumentou, o que já era esperado devido à diminuição da restrição de escoamento no equipamento. Esse aumento de matéria sendo alimentada a uma mesma queda de pressão fez com que o número de Euler fosse minimizado, o que significa dizer que com o aumento do diâmetro de *underflow* houve uma diminuição na demanda energética por parte do equipamento. Em adição, a autora observou que os hidrociclones operados com os maiores níveis do diâmetro do tubo de *underflow* tendem a atingir uma maior eficiência total.

Salvador (2013) concluiu que para um aumento de permeabilidade da matriz filtrante existe um decréscimo na capacidade de operação do equipamento, efeito este perceptível no número de Euler, o qual foi majorado. Por fim, a autora concluiu que a permeabilidade do meio filtrante não provocou modificações significativas na eficiência total de coleta. No que diz respeito à posição da região filtrante, Salvador (2013) se mostrou consoante com os autores mencionados nessa seção, confirmando que a presença de uma região porosa modificou o desempenho do hidrociclone convencional.

Dando continuidade aos trabalhos de Silva (2012), Kyriakidis (2014) estudou, experimentalmente e computacionalmente, como o diâmetro do *underflow* e comprimento do *vortex finder* afetam o comportamento dos equipamentos otimizados de Silva (2012). A autora concluiu que maiores valores de diâmetro de *underflow* tendem a aumentar a capacidade de processamento do HCOT1, diminuindo então o consumo energético do equipamento. Além disso, maiores valores de diâmetro de *underflow* tendem a aumentar a eficiência do equipamento, porém ao custo de um aumento da razão de líquido. Segundo a autora, alterações no comprimento do *vortex finder* tendem a fazer com que as respostas de interesse assumam um comportamento não-linear. Assim, a autora chegou à conclusão de que existe uma condição ótima de diâmetro de *underflow* e comprimento de *vortex finder*.

Silva (2014) avaliou três hidrociclones filtrantes geometricamente otimizados, obtidos por um processo de otimização geométrica utilizando um algoritmo de evolução diferencial. Um desses equipamentos foi o chamado de HFOT3, o qual apresentou baixo consumo energético e alta capacidade de processamento. Segundo a autora, quando o HFOT3 foi operado com suspensão newtoniana de concentração volumétrica de 1,00% de rocha fosfática, o equipamento atingiu um *Eu* de 753.

Mognon *et al.* (2015) estudaram o efeito de variáveis geométricas e queda de pressão sobre a performance de um hidrociclone desenvolvido para uso na indústria petroquímica. Por meio de métodos estatísticos, foi concluído que o aumento da queda de pressão do equipamento tende a aumentar a eficiência total e a vazão de alimentação do equipamento. Entretanto, Mognon *et al.* (2015) relataram que a queda de pressão não afetou significativamente a razão de líquido do equipamento utilizado.

Com o intuito de obter geometrias otimizadas, Kyriakidis (2018) associou técnicas de superfície de resposta com o Algoritmo de Otimização de Evolução Diferencial (AED), tendo como base um histórico de trabalhos sobre hidrociclonagem realizados na FEQUI/UFU. A autora propôs três equipamentos com geometrias otimizadas: HGOT1 (Hidrociclone Geometricamente OTimizado para o caso 1, desenvolvido para alta eficiência), HGOT2 (otimizado para uma menor razão de líquido) e HGOT3 (otimizado com a finalidade de obter um baixo número Euler). As dimensões desses equipamentos são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Dimensões dos hidrociclones geometricamente otimizados obtidos por Kyriakidis (2018). Adaptado de Kyriakidis (2018).

Geometria	Hidrociclone Geometricamente Otimizado		
	HGOT1	HGOT2	HGOT3
$D_i$ (mm)	8,7	8,7	6,3
$D_o$ (mm)	4,8	9,4	10,5
$L$ (mm)	228,0	174,0	228,0
$H$ (mm) / $h$ (mm)	69,0 / 159,0	15,0 / 159,0	114,0 / 114,0
$\theta$ (°)	9,0	9,0	12,5
$l$ (mm)	55,2	12,0	91,2
$D_u$ (mm)	5,0	3,0	5,0

Kyriakidis (2018), utilizando técnicas de CFD e experimentos, concluiu que o HGOT1 apresentou uma eficiência de coleta total semelhante ao mais eficiente dos hidrociclones apresentados no histórico utilizado, o HCOT1. A vantagem do HGOT1 sobre o HCOT1 é que o primeiro possui um número de Euler menor. Desse modo, o HGOT1 foi capaz de operar uma maior capacidade de alimentação (cerca de 34,48% maior que o HCOT1).

Gonçalves (2019) estudou diversos equipamentos otimizados pela FEQUI/UFU (dentre eles o HGOT1) com o intuito de os avaliar quando operados com suspensões não-newtonianas e concentradas. A autora utilizou fluidos pseudoplásticos obtidos via

alteração de concentração de sólidos e com a adição de viscosificante. A autora utilizou um PCC e investigou o efeito de variáveis, como diâmetro de *underflow* ( $D_u$ ), concentração de sólidos na alimentação ( $C_{VA}$ ), comprimento do *vortex finder* ( $l$ ), queda de pressão ( $-\Delta P$ ) e concentração da carboximetilcelulose ( $C_{CMC}$ ), que foi o viscosificante utilizado para fazer com que a reologia da suspensão mudasse.

Gonçalves (2019) concluiu que a reologia do fluido tem um papel crucial na operação de hidrociclone. A autora apontou que à medida que o índice de consistência da suspensão diminuía e a suspensão se tornava mais viscosa, a eficiência dos hidrociclones otimizados diminuía. Isso foi causado por uma mudança da fluidodinâmica dentro dos equipamentos, o que fez com que os movimentos espiralados fossem prejudicados e as partículas experimentassem um menor tempo de residência no equipamento. Por fim, a partir dos resultados obtidos, a pesquisadora propôs equações capazes de descrever o desempenho dos hidrociclones estudados.

### **2.6.2 Hidrociclone em outras instituições de pesquisa**

Li *et al.* (2021) avaliaram o processo de remoção de partículas de coque em águas residuais provenientes da indústria de petróleo utilizando um hidrociclone não-convencional. Os autores propuseram um estudo computacional inicial que investigou o efeito provocado pela dimensão da alimentação e ângulo do cone sobre a velocidade tangencial. O modelo de turbulência utilizado foi o RSM, o acoplamento de pressão com velocidade foi feito com algoritmo SIMPLEC e a discretização da pressão foi feita com o PRESTO!. Segundo os autores, uma das combinações geométricas proposta foi capaz de atingir um patamar satisfatório de eficiência. Além disso, a abordagem computacional proposta pelos autores levou a bons resultados quando comparados com os dados experimentais.

Padhi *et al.* (2019) estudaram o comportamento de uma mistura aquosa de sílica e magnetita em um hidrociclone, levando em consideração as diferentes distribuições granulométricas e massas específicas desses minérios. Os autores além de realizarem experimentos, estudaram via CFD o comportamento da suspensão com o intuito de comparar resultados experimentais e computacionais.

Inicialmente, Padhi *et al.* (2019) simularam água e ar juntos utilizando o modelo de mistura VOF e utilizaram o LES para descrever a turbulência. Quando o sistema atingiu o equilíbrio, o modelo multifásico foi alterado para ASM e então as partículas

foram injetas. Os autores optaram por utilizar a metodologia PRESTO! para a resolução da pressão, QUICK para a discretização da fase dispersa e SIMPLE para o acoplamento da pressão com velocidade. No que diz respeito à qualidade da simulação, os autores concluíram que os resultados obtidos via CFD condizem com os dados obtidos experimentalmente divergindo em cerca de 3-5%.

Ye *et al.* (2019a) estudaram computacionalmente o efeito da região cônica sobre a performance do hidrociclone e da concentração de sólidos. Os pesquisadores inicialmente simularam água e ar utilizando o modelo VOF até atingir a estabilidade do fluxo. Em seguida o modelo VOF foi trocado pelo modelo de Mistura e então partículas sólidas foram injetadas. A abordagem computacional de Ye *et al.* (2019a) foi semelhante a abordagem de Padhi *et al.* (2019). Além disso, foi usado uma abordagem do tipo *Second Order Upwind Scheme* para discretização do momento, da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação turbulenta. Ye *et al.* (2019a.), apesar de não realizarem experimentos, validaram a metodologia matemática utilizando dados experimentais obtidos por Hsieh (1988). Os autores chegaram à conclusão de que o uso de cones mais alongados tende a aumentar a capacidade de coleta do equipamento. Além disso, foi constatado que à medida que a concentração de sólidos alimentada aumenta a coleta de material foi prejudicada.

Ye *et al.* (2019b) buscaram a melhor combinação geométrica entre uma alimentação em forma de arco com uma região cônica convexa para obter um hidrociclone capaz de classificar partículas ultrafinas. Assim, os pesquisadores, além de realizar experimentos, conduziram estudos sobre simulações em CFD. Ye *et al.* (2019b) inicialmente utilizaram o modelo VOF para simulação da água com ar, juntamente com RSM até atingir estabilidade do *air core*. Em seguida o modelo VOF foi trocado para o modelo de Mistura e então as partículas foram injetadas. A abordagem computacional de Ye *et al.* (2019b) foi semelhante à de Ye *et al.* (2019a). Os autores concluíram que a região cônica convexa fortalece o efeito centrífugo do equipamento. Além disso, a alimentação em forma de arco foi capaz de promover uma pré-classificação do material. Desse modo, a associação dessas duas estruturas foi capaz de enriquecer a corrente de *underflow* com material particulado.

Jiang *et al.* (2019) investigaram numericamente o comportamento de um hidrociclone não-convencional com um orifício de *underflow* em formato anular e ajustável. Com o intuito de comparação, os autores também investigaram um

equipamento convencional de mesma geometria. Os pesquisadores também iniciaram a simulação utilizando o modelo VOF juntamente com RSM para descrever água e ar até atingir uma estabilidade no *air core*. Em seguida, o modelo VOF foi trocado para o Modelo de Mistura e as partículas foram injetadas. A abordagem computacional utilizada foi semelhante à de Ye *et al.* (2019a). Os autores validaram seus modelos utilizando dados experimentais obtidos por Hsieh (1988).

Jiang *et al.* (2019) concluíram que à medida que o orifício de *underflow* se tornou menor, a queda de pressão dentro do equipamento diminuiu. Pelas técnicas de CFD foi constatado que a velocidade tangencial na região do vórtice externo foi maior no equipamento não convencional. Enquanto a velocidade tangencial na região do vórtice interno foi maior no equipamento convencional. Por fim, foi constatado que essas diferenças na fluidodinâmica fizeram com que esse equipamento não convencional tivesse uma maior capacidade de coleta de material sólido.

Vakamalla *et al.* (2017) estudaram via CFD diferentes hidrociclones. O objetivo foi comparar a performance entre equipamentos não convencionais e hidrociclones comuns. Neste estudo, foram utilizados equipamentos com o *vortex finder* em forma de tronco de cone, pois esse *design* foi capaz de reduzir a coleta de material grosso pelo tubo de *overflow*. Além disso, os pesquisadores estudaram equipamentos que possuíam em sua região cônica dois cones de ângulo diferentes, hidrociclones com uma região parabólica no lugar da cônica, hidrociclones apresentando um ângulo de cone muito pequeno e um equipamento dotado de um bastão que atravessa o equipamento, com o intuito de suprimir o *air core* fazendo com que esse hidrociclone tenha uma turbulência menor que os equipamentos anteriores. Segundo os autores, essa redução na turbulência reduz perdas de pressão e aumenta a eficiência de separação do equipamento.

Vakamalla *et al.* (2017) concluíram que a forma cônica do *vortex finder* tem a capacidade de diminuir a coleta de material grosso na corrente de *underflow* em diversos dos equipamentos propostos. Os autores chegaram à conclusão de que todos os equipamentos não convencionais apresentaram maior velocidade tangencial e maior eficiência de coleta de material particulado.

Wu *et al.* (2017) estudaram a performance de hidrociclones frente aos fluidos não-newtonianos. Os autores observaram como partículas de alumina se comportam quando estão suspensas em água com a presença do viscosificante ácido poliacrílico. Os

pesquisadores, além da execução de experimentos, desenvolveram simulações via CFD utilizando a metodologia SIMPLE para a descrição do momento e *Reynolds Stress Model* para a turbulência. Os autores concluíram que fluidos com índice de comportamento perto da unidade apresentavam um escoamento mais fluído, desse modo sofriam uma menor queda de pressão e maiores velocidades tangenciais à uma velocidade de alimentação fixa. Por outro lado, fluidos com o índice de comportamento mais baixos experimentavam uma maior resistência de escoamento devido a uma maior viscosidade molecular. Desse modo, equipamentos operando com esses fluidos tiveram seu movimento rotacional prejudicado. Assim, os autores concluíram que a redução do índice de comportamento da suspensão resulta em um campo centrífugo baixo e um tempo de residência da partícula menor.

Xu *et al.* (2016) estudaram o efeito da tensão de cisalhamento em um processo de remoção de óleo da superfície de um catalizador utilizando um hidrociclone. Os autores complementaram os resultados experimentais com simulações CFD realizadas no software *Fluent*<sup>®</sup>. As simulações foram conduzidas sem a fase gasosa de ar (sem a formação de *air core*) e foi utilizado o modelo RSM como modelo de turbulência. Além disso, foi utilizado o algoritmo SIMPLE para acoplamento da pressão com velocidade, PRESTO! para a interpolação da pressão e a metodologia QUICK foi utilizada para discretização das demais equações. Por fim, os autores utilizaram o modelo DPM (*Discrete Particle model*) para a determinação do movimento das partículas. Os autores com o intuito de validar o modelo matemático simularam estudos realizados por Ma (2009).

Segundo Xu *et al.* (2016) foi observado que existe uma distribuição de taxas de cisalhamento dentro do hidrociclone devido ao movimento turbulento da suspensão em seu interior. Para a situação analisada pelos pesquisadores, a remoção de óleo foi beneficiada à medida que essas tensões de cisalhamento aumentaram dentro do equipamento. Segundo os autores, o fortalecimento da tensão de cisalhamento pôde ser obtido quando maior vazão de suspensão foi alimentada ao equipamento.

Vakamalla e Magadoddy (2015) desenvolveram um modelo CFD capaz de prever o comportamento de um *dense medium cyclone* (DMC) levando em consideração diferentes modelos de reologia. Os pesquisadores estudaram os modelos: *Granular viscosity model* (GV), *Newtonian viscosity model with total feed solid correction* (Nfs), *Newtonian viscosity model with total solids and fine corrections* (Nfsfc) e *Non-Newtonian*

*Herschel-Bulkley model with feed total solids correction* (HB). Como nos trabalhos reportados anteriormente, inicialmente água e ar foram simulados utilizando o modelo de mistura VOF até estabilização do *air core* e em seguida o modelo de mistura foi alterado para o ASM, levando em consideração os modelos de reologia. Os autores também utilizaram o PRESTO! para a solução da pressão e QUICK para discretização de todas as equações da fase dispersa. Vakamalla e Magadoddy (2015) compararam os resultados computacionais com dados experimentais obtidos por He, Laskowski e Klein (2001), e concluíram que o HB se mostrou capaz de prever com maior acurácia o comportamento reológico da suspensão no hidrociclone.

Yang *et al.* (2015) analisaram numericamente o efeito da reologia de fluidos não-newtonianos sobre o escoamento em um hidrociclone. Os autores simularam diferentes tipos de fluidos entre eles: água, esgoto, fluido de perfuração e petróleo (citados em ordem crescente de viscosidade aparente para uma mesma taxa de deformação). A simulação contou com a utilização do RSM e do modelo de Mistura, e foi considerado que os fluidos se enquadraram no modelo de *Power-Law*. Os pesquisadores observaram que a velocidade tangencial é bastante dependente da reologia do fluido, tendo que os menores valores dessa componente de velocidade foram encontrados nos fluidos com a viscosidade aparente mais elevada. Isso foi explicado pelo fato de que os fluidos mais viscosos impuseram uma maior restrição a qualquer tipo de movimento, o que acabou por comprometer a sedimentação centrífuga do equipamento.

Li *et al.* (2007) estudaram o comportamento da queda de pressão em função da velocidade de alimentação e da concentração de sólidos alimentada. Foi observado que para algumas condições fixas operacionais de vazão de alimentação a queda de pressão dentro do equipamento assumiu um comportamento não-linear. Os autores concluíram que a queda de pressão pôde inicialmente diminuir, até atingir um valor crítico com o aumento da concentração de sólidos alimentada, devido ao aumento da fricção do material particulado com as paredes do equipamento. Entretanto, a queda de pressão pôde aumentar caso a concentração de sólidos aumentasse ainda mais, nesse caso foi possível dizer que houve um acúmulo de material particulado dentro do equipamento o que reduziu a perda de carga do equipamento.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo expõe os equipamentos utilizados e a metodologia aplicada ao trabalho. Desse modo, serão apresentados a unidade experimental, os hidrociclones utilizados, as características do material particulado, o viscosificante utilizado para atingir a reologia desejada, o planejamento de experimentos e o procedimento experimental.

#### 3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

Na Figura 3.1 retrata-se um esquema da unidade experimental. Tanto o reservatório quanto a bomba se encontraram suportadas em um aparato de aço inoxidável. A unidade experimental, esteve localizada no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER), situado no Bloco 1Z-B, sala 109, no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

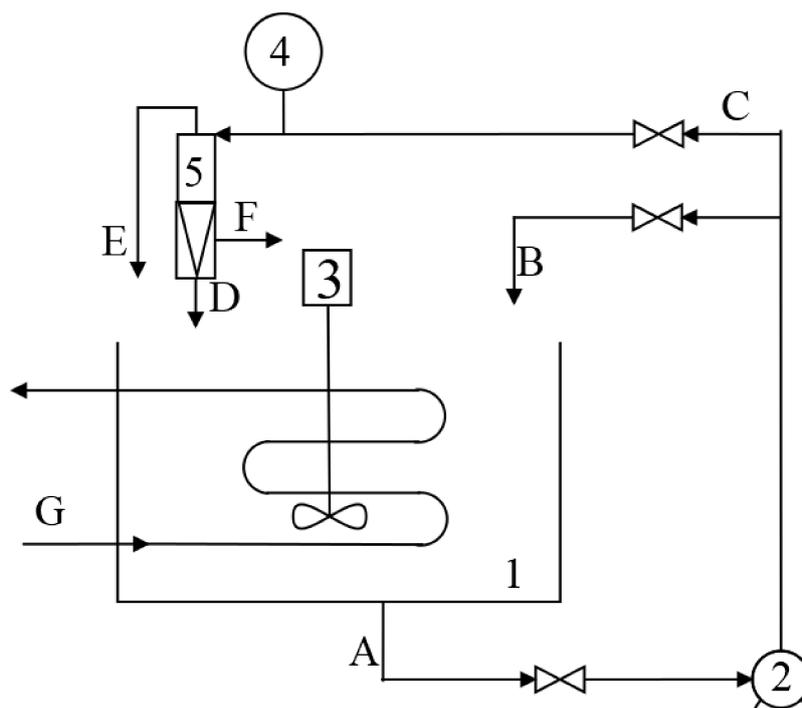


Figura 3.1 – Representação esquemática da unidade experimental de hidrociclonação. (1) reservatório; (2) bomba centrífuga; (3) agitador mecânico; (4) manômetro digital; (5) hidrociclone; (A) corrente de sucção da bomba; (B) corrente de *bypass*; (C) corrente de alimentação; (D) corrente de *underflow*; (E) corrente de *overflow*; (F) filtrado e (G) serpentina do sistema refrigerante. Fonte: autor.

Em respeito à Figura 3.1, a suspensão armazenada no reservatório era succionada pela bomba, e em seguida era dividida em duas correntes: a de *bypass* (B) e a de alimentação do hidrociclone (C). A suspensão da corrente C, uma vez dentro do hidrociclone, era dividida em duas correntes (se um hidrociclone convencional fosse utilizado) ou em três correntes (se um hidrociclone filtrante fosse utilizado): *underflow* (D), *overflow* (E) e filtrado (F).

Por se tratar de um sistema fechado, à medida que a suspensão era sugada pela bomba ela teve sua temperatura aumentada. Como visto no capítulo anterior, a temperatura é um fator que altera o comportamento reológico da suspensão. Desse modo, foi interessante trabalhar entre uma faixa de temperatura, o que foi possível graças ao uso de uma serpentina com líquido refrigerante inserida no reservatório, capaz de manter a temperatura da suspensão entre 25 °C e 35 °C. O controle da temperatura foi feito de maneira manual, ligando ou desligando o sistema de refrigeração à medida que a temperatura do tanque chegava perto desses limites.

### **3.1.1 Reservatório, agitador mecânico e serpentina**

O reservatório utilizado nos experimentos foi um tanque de polietileno da marca FORTLEV com capacidade de 250 L, tendo 0,5 m de altura e diâmetro da base de 0,78 m, o volume do reservatório ocupado pela suspensão era de 150 L. Com a intenção de promover a homogeneização da suspensão, foi acoplado ao reservatório um agitador mecânico com hélice do tipo naval da marca Voges, modelo B90 S4 com motor de 2 cv, operando a 1730 rpm. Além do agitador, foram acopladas duas chicanas feitas em aço inoxidável para eliminar as zonas mortas e a formação de redemoinho na parte central do reservatório. Por fim, com o intuito de manter a temperatura do tanque dentro de uma faixa operacional aceitável, um sistema de refrigeração foi instalado no reservatório. Na Figura 3.2 mostram-se o reservatório, as chicanas, o agitador mecânico e a serpentina do sistema de refrigeração.

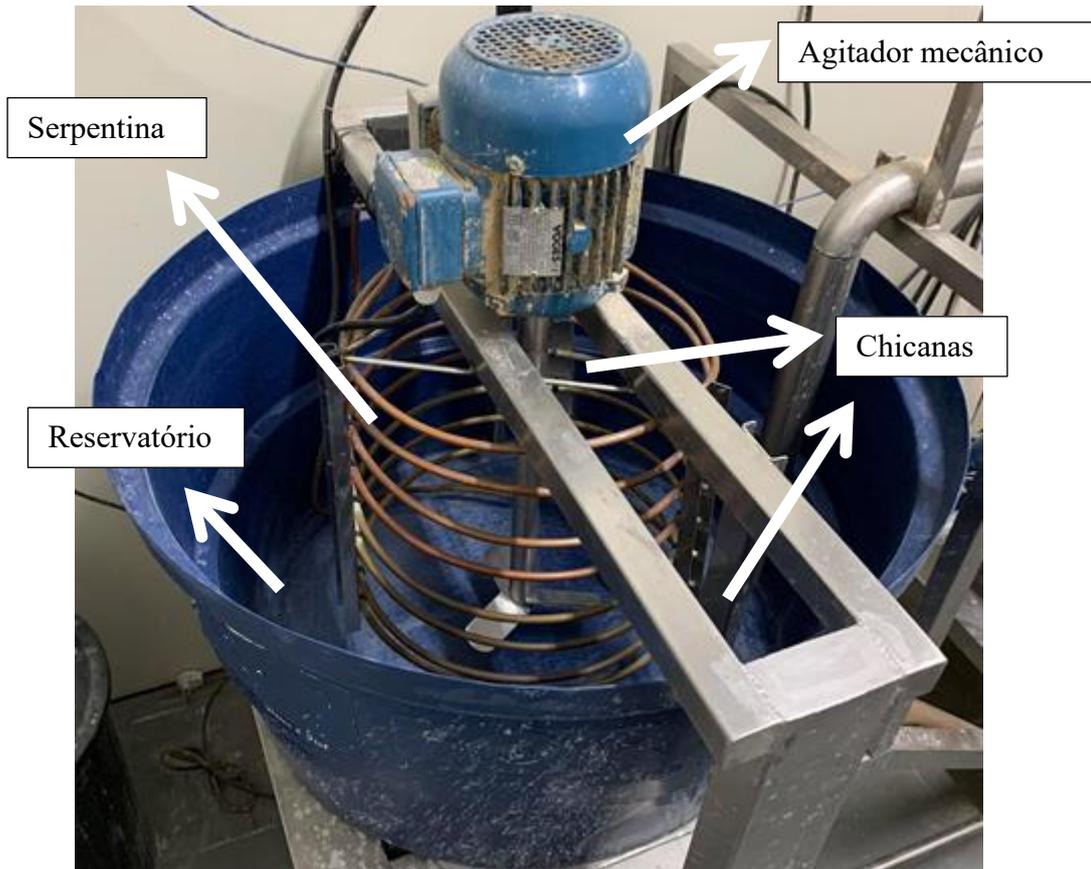


Figura 3.2 – Detalhes do reservatório da unidade experimental de hidrociclonação.  
Fonte: autor.

### ***3.1.2 Bomba centrífuga***

A bomba centrífuga utilizada para a realização dos experimentos (Figura 3.3) é da marca *Weir Minerals* (modelo 1,5/1B-AH), possui potência de 7,5 cv e um revestimento interno para bombeamento de lamas ou suspensões abrasivas.

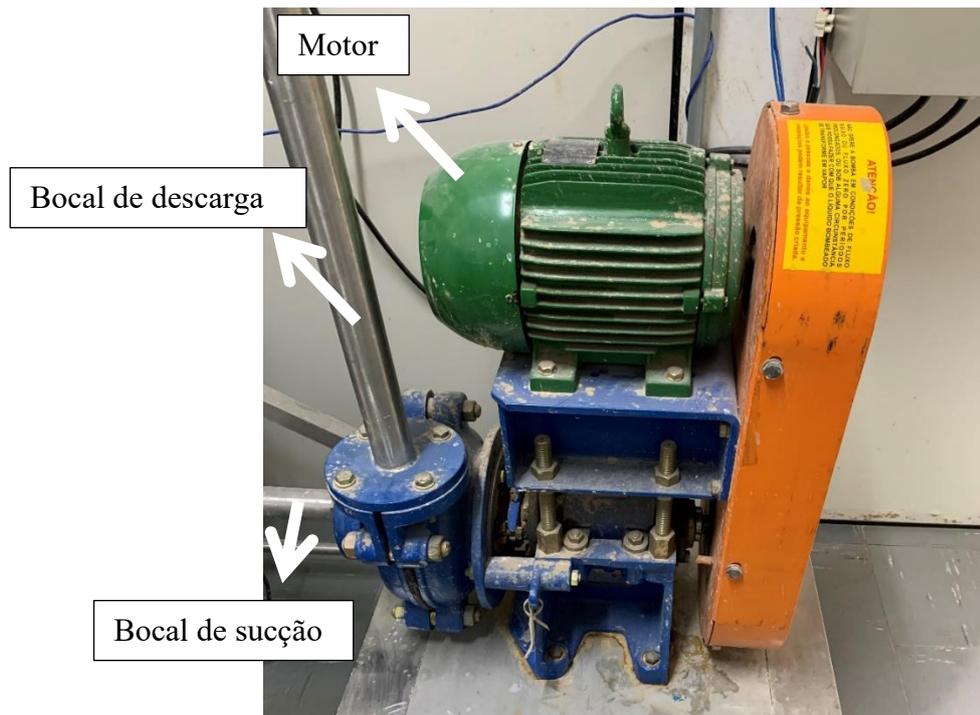


Figura 3.3 – Bomba centrífuga sobre o suporte de aço inoxidável com detalhe no bocal de sucção e descarga. Fonte: autor.

### 3.1.3 Manômetro digital

A unidade experimental contou com um indicador de pressão digital instalado no duto de alimentação logo a montante do hidrociclone (Figura 3.4). O indicador utilizado era um manômetro de Bourdon Digital da marca Dwyer (modelo DPG-204) tendo uma faixa operacional entre 0 e 50 psi.

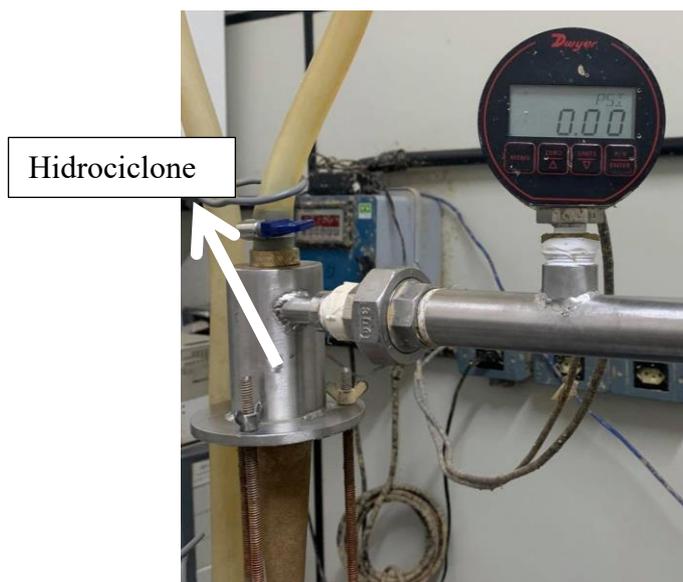


Figura 3.4 – Manômetro digital instalado a montante do hidrociclone. Fonte: autor.

### 3.2 HIDROCICLONES

Para realizar os experimentos foram utilizados dois equipamentos, ambos inspirados no dispositivo denominado de HGOT1 [Hidrociclone Geometricamente OTimizado 1, Kyriakidis (2018)]. De acordo com Kyriakidis (2018), esse equipamento foi obtido a partir de um processo de otimização geométrica utilizando um algoritmo de evolução diferencial (AED). O processo de otimização usado por Kyriakidis (2018) teve como objetivo encontrar as geometrias de um hidrociclone que atingisse alto poder de separação, mas que tivesse um número de Euler menor do que 7000.

Gonçalves (2019) investigou diversos hidrociclones operados com suspensões não-newtonianas, sendo um deles o HGOT1. Foi concluído que maiores comprimentos de *vortex finder* prejudicam a sedimentação centrífuga do equipamento. Desse modo, a presente dissertação utilizou duas versões geometricamente inspiradas no HGOT1, a diferença entre elas com o HGOT1 é que ambas contêm um comprimento de *vortex finder* de 41 mm [14,2 mm menor do que o do HGOT1, esse valor foi proposto e utilizado por Gonçalves (2019)]. Uma das versões foi um equipamento convencional confeccionado inteiramente de material maciço (HC) e a segunda versão foi um hidrociclone cuja região cônica foi feita de um material filtrante (HF). O filtro foi caracterizado seguindo a metodologia proposta no Apêndice B, tendo uma porosidade de 3,52% e permeabilidade de  $1,61 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ .

O corpo cilíndrico dos equipamentos e o duto de alimentação foram confeccionados em aço inoxidável; os tubos de *overflow* e a região cônica maciça foram confeccionadas em latão e a região cônica filtrante foi confeccionada em bronze sinterizado, tendo uma espessura ( $\epsilon$ ) de 2,5 mm. Mostram-se na Figura 3.5 o hidrociclone convencional, hidrociclone filtrante e suas principais correntes. Por fim, na Tabela 3.1 apresentam-se as dimensões dos equipamentos HGOT1, HC e HF.

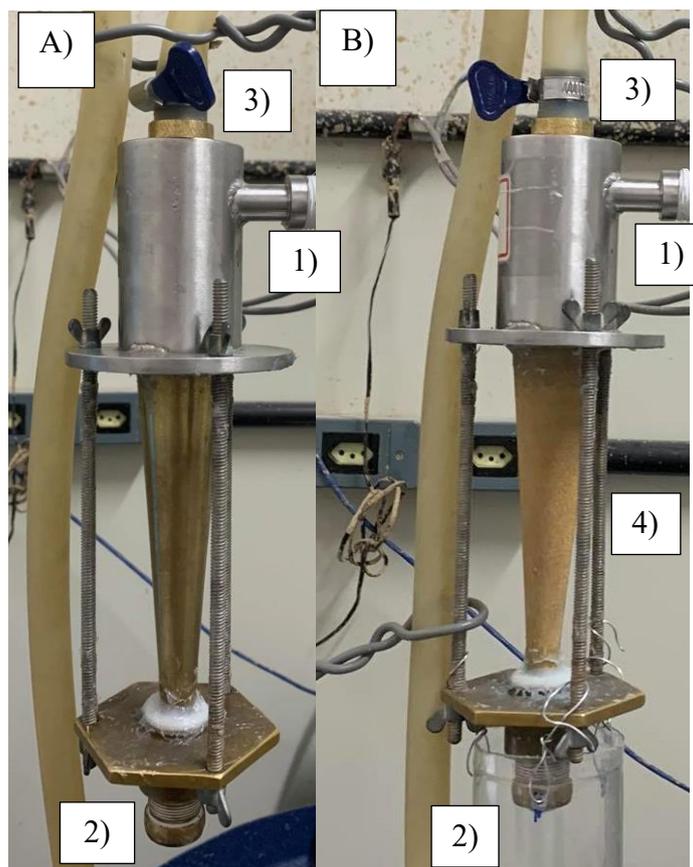


Figura 3.5 – Equipamentos utilizados. A) hidrociclone convencional e B) hidrociclone filtrante. 1) Corrente de alimentação; 2) corrente de *underflow*; 3) corrente de *overflow* e 4) Corrente de filtrado. Fonte: autor.

Tabela 3.1 – Dimensões dos equipamentos HC e HF comparadas com as do equipamento HGOT1.

	HGOT1	HC	HF
$D_i$ (mm)	8,7	8,7	8,7
$D_o$ (mm)	4,8	4,8	4,8
$D_u$ (mm)	5,0	5,0	5,0
$L$ (mm)	228,0	228,0	228,0
$h$ (mm)	69,0	69,0	69,0
$H$ (mm)	159,0	159,0	159,0
$l$ (mm)	55,2	41,0	41,0
$\theta$ (°)	9,0	9,0	9,0
Espessura do filtro ( $\epsilon$ ) (mm)	-	-	2,5

Nas figuras a seguir mostram-se as peças utilizadas para a montagem dos hidrociclones: parte cilíndrica junto com a alimentação (Figura 3.6); cone maciço e cone filtrante (Figura 3.7); acessório auxiliar para acoplamento ao orifício de *underflow* e *vortex finder* (Figura 3.8) e partes acessórias, que auxiliam na montagem do equipamento

(Figura 3.9). Nessa última figura são apresentadas hastes e uma placa hexagonal que auxiliam no acoplamento da região cilíndrica com a cônica e uma rosca oca que auxilia no correto ajuste do diâmetro do orifício de *underflow*.



Figura 3.6 – Parte cilíndrica e duto de alimentação feita de aço inoxidável. Fonte: autor.



Figura 3.7 – Regiões cônicas dos hidrociclones. A) cone do HC feito de latão e B) cone do HF feito de bronze sinterizado. Fonte: autor.

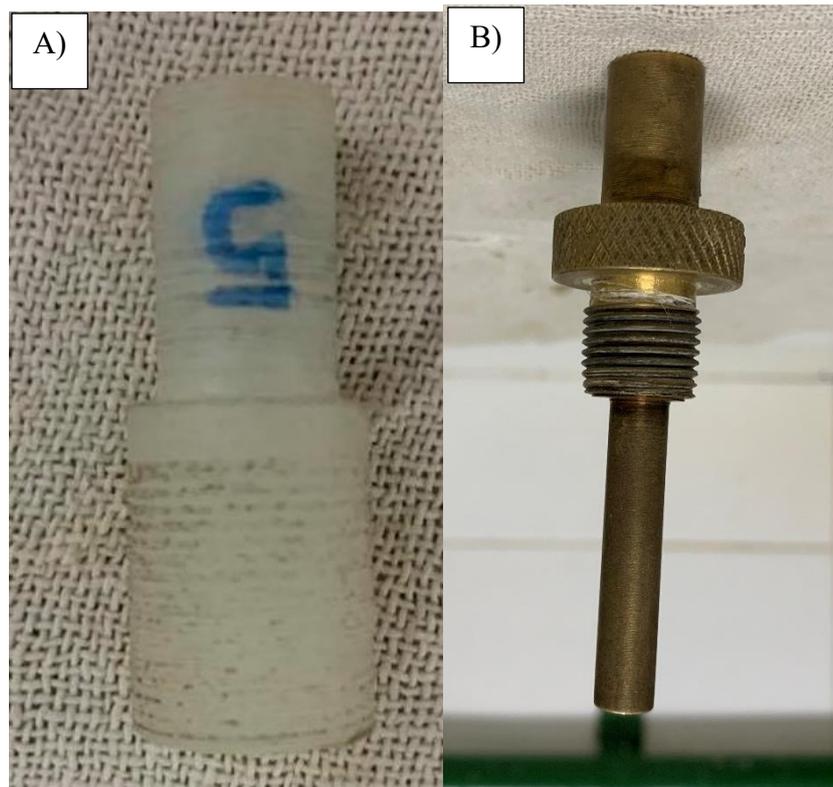


Figura 3.8 – Acessório para acoplamento ao orifício de *underflow* confeccionado em politetrafluoretileno (A) e *vortex finder* confeccionado em latão (B). Fonte: autor.

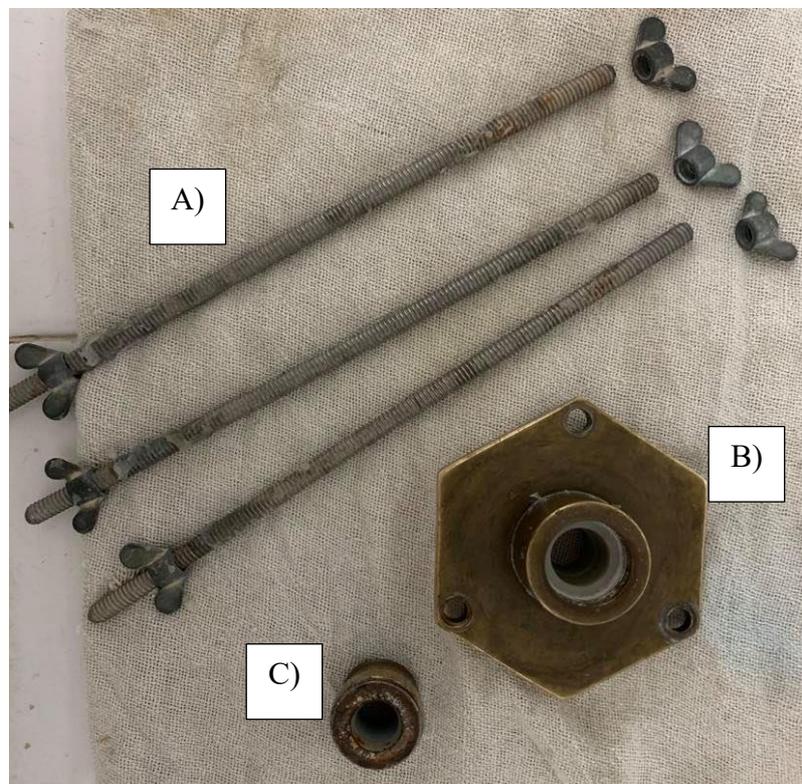


Figura 3.9 – Partes acessórias utilizadas para montagem dos hidrociclones. A) Hastes de alumínio; B) placa hexagonal de latão e C) rosca oca confeccionada em latão usada no ajuste do orifício de *underflow*. Fonte: autor.

### 3.3 MATERIAL PARTICULADO

É de grande importância a escolha do material particulado que possua estabilidade no tamanho de partículas para que sua granulometria não mude no decorrer dos experimentos. O LASER/UFU tem usado em suas pesquisas sobre hidrociclonagem dois tipos de material: o quartzito (KYRIAKIDIS, 2014; SALVADOR, 2017; KYRIAKIDIS, 2018) e a rocha fosfática (VIEIRA, 2006; SILVA 2012; SILVA, 2014; GONÇALVES, 2019), a qual foi utilizado neste trabalho.

A rocha fosfática é um produto importante encontrado na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (GONÇALVES, 2019). Esse material foi doado pela Mosaic Fertilizantes, sediada em Araxá (MG). Com o intuito de atingir a faixa granulométrica desejada, o material foi cominuído utilizando um moinho de bolas. O moinho operou a 23 rpm e era composto por um tanque cilíndrico feito de cerâmica, tendo 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura, esse equipamento conta com 75 bolas de cerâmica, cada uma com diâmetro de 4 cm. Dentro desse moinho foram colocados 3 kg de rocha fosfática e o tempo de moagem foi de 6 h. As aferições sobre a distribuição de tamanho de partículas do material foram feitas utilizando o equipamento *Mastersizer Microplus* da *Malvern*, que usou técnicas de difração de raios *laser* para fornecer a distribuição de tamanhos das partículas (PSD, na sigla em inglês, *Particle Size Distribution*).

### 3.4 VISCOSIFICANTE

Com o intuito de alterar o caráter reológico da suspensão foi utilizado a carboximetilcelulose sal sódico (CMC) como agente viscosificante, cuja fórmula estrutural é mostrada na Figura 3.10. A CMC é um sólido de cor esbranquiçada com características higroscópicas (MOREIRA, 2014) e é capaz de tornar a suspensão aquosa newtoniana em pseudoplástica (GONÇALVES, 2019).

A CMC é um material polimérico e, devido às particularidades da reação de polimerização, pode haver diferenças entre lotes e entre fornecedores. Para evitar tais diferenças é aconselhado utilizar uma CMC pertencente a um mesmo lote de um mesmo fabricante (GONÇALVES 2019). Desse modo, A CMC utilizada neste estudo pertence toda a um mesmo lote da empresa Dinâmica Química Contemporânea.

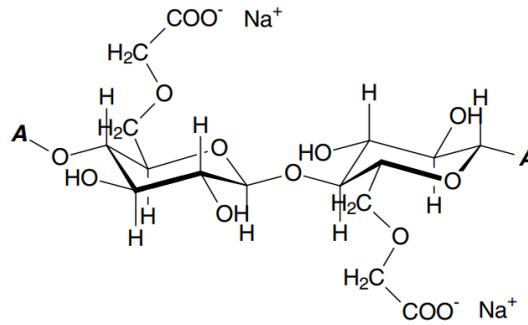


Figura 3.10 – Fórmula estrutural da carboximetilcelulose sal sódico. “A” representa a continuação da cadeia polimérica. Adaptado de Szorcik et al. (2006).

### 3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para analisar o comportamento do HC e do HF frente aos efeitos provocados pela concentração de sólido na alimentação ( $C_{VA}$ ), concentração de CMC ( $C_{CMC}$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ ), foi realizado um planejamento de experimentos do tipo fatorial completo a três níveis. As variáveis de estudo e os valores que elas assumem nesta pesquisa são apresentados na Tabela 3.2. As equações de codificação que descrevem a  $C_{CMC}$  ( $X1$ ),  $C_{VA}$  ( $X2$ ) e a queda de pressão ( $X3$ ), são apresentadas em sequência (equações 3.1 a 3.3).

Tabela 3.2 – Codificação das variáveis utilizadas no planejamento de experimentos.

Variável	Codificação		
	-1	0	+1
$X1$ ( $C_{CMC}$ )	0,20%	0,40%	0,60%
$X2$ ( $C_{VA}$ )	1,000%	2,125%	3,250%
$X3$ ( $-\Delta P$ )	30,00 psi	35,00 psi	40,00 psi

$$X1 = \frac{C_{CMC} [\%m.] - 0,4}{0,2} \quad (3.1)$$

$$X2 = \frac{C_{VA} [\%v.] - 2,125}{1,125} \quad (3.2)$$

$$X3 = \frac{(-\Delta P) [psi] - 35,00}{5} \quad (3.3)$$

A utilização do planejamento de experimentos permite que se avaliem os efeitos das variáveis de estudo, tanto individualmente quanto em conjunto com outra. Desse modo, é possível dizer se uma variável sozinha ou em interação é significativa ou não.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Na Tabela 3.3 mostra-se o planejamento de experimentos realizado nesta dissertação, com os níveis das variáveis apresentados na forma codificada.

Tabela 3.3 – Planejamento de experimentos utilizado para investigação do efeito da concentração do viscosificante, da concentração de sólidos e da queda de pressão.

Teste	$X1 (C_{CMC})$	$X2 (C_{VA})$	$X3 (-\Delta P)$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Com o intuito de comparar o hidrociclone convencional e o hidrociclone filtrante, esse planejamento de experimentos foi executado para cada um dos equipamentos. Assim, foi possível verificar os efeitos da filtração combinada com o fluido não-newtoniano e concentrado.

### 3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram divididos em três blocos, sendo o primeiro bloco os experimentos com  $C_{VA}$  no nível  $-1$ , o segundo bloco com essa variável no nível  $0$  e o último bloco com ela no nível  $+1$ . Dentro desses blocos, a variável  $C_{CMC}$  e a queda de

pressão assumiram seus três níveis. Essa divisão foi feita com o intuito de economizar material particulado durante a condução dos experimentos.

Para o preparo da suspensão não-newtoniana o reservatório era preenchido com 150 L de água. Em seguida era adicionada a quantidade de CMC necessária para atingir a concentração mássica desejada. Em seguida, o agitador era ligado por 30 min em 1000 rpm para que houvesse uma solubilização inicial da CMC. Após esse tempo inicial de agitação, o fluido era deixado por 24 h em repouso com o intuito de hidratar o polímero. Na sequência, o material sólido era adicionado e o agitador era ligado novamente por mais 30 min. Após esse procedimento, uma alíquota era retirada do reservatório e analisada no reômetro para checagem da reologia da suspensão. Como a CMC diluída em água promovia um ambiente propício para a proliferação de micro-organismos (GONÇALVES, 2019), era adicionado formaldeído (37%) no reservatório como agente antimicrobiano. O volume de formaldeído adicionado em mL era numericamente igual à quantidade de CMC adicionada em gramas (PEREIRA, 2010; MOREIRA, 2014; GONÇALVES, 2019).

Com a suspensão preparada dentro do reservatório, o manômetro e o agitador eram ligados. Após 1 h a suspensão dentro do tanque se tornava homogênea (GONÇALVES, 2019), e os experimentos eram iniciados. A bomba era então ligada e após estabilização da unidade experimental (o que ocorria cinco minutos depois que bomba era ligada) as vazões de *underflow*, *overflow*, alimentação e filtrado (caso o HF fosse o equipamento de estudo) eram medidas. Todas essas vazões foram aferidas via gravimetria com o auxílio de uma balança semi-analítica com precisão de  $\pm 0,01$ g e um cronômetro digital com precisão de  $\pm 0,01$  s. Para cada uma das vazões analisadas, eram aferidas três ou mais medidas para que o balanço de massa das correntes garantisse um erro relativo menor que 3%. Para as correntes de *underflow* e de alimentação, era aferida a fração de sólidos suspensa, e para isso amostras dessas correntes eram coletas em triplicatas. Elas eram pesadas e então levadas à estufa ajustada em 105 °C. Após 24 h, quando já estavam secas, eram pesadas novamente. A temperatura da suspensão foi monitorada no final de cada experimento, quando ela atingia 28 °C o sistema de refrigeração era ligado de modo que a temperatura dentro do tanque ficasse em uma faixa de operação aceitável (entre 25°C e 30°C).

As correntes de *underflow* e de alimentação tiveram suas distribuições granulométricas aferidas. Para isso, três alíquotas dessas correntes eram amostradas e

deixadas em repouso por uma semana (GONÇALVES, 2019). Após esse tempo, elas eram misturadas com 40 mL de Calgon com concentração de 25 g/L e analisadas no *Mastersizer* da *Malvern*. Os parâmetros utilizados no *Mastersizer* foram: rotação do agitador de 2900 rpm, tempo de banho ultrassônico de 40 s com intensidade de 19. As distribuições granulométricas obtidas eram ajustadas ao modelo de distribuição granulométrica *Rosin-Rammer-Bennet* (RRB) (Equação 3.4). Nessa equação,  $d_{63,2}$  indica o tamanho de uma partícula que tem 63,2% de chance de ser coletada no orifício de *undeflow*, e  $X_d$  indica a probabilidade de se coletar uma partícula de tamanho  $d_p$ .

$$X_d = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{d_{63,2}} \right)^N \right] \quad (3.4)$$

O equipamento utilizado para medir a reologia das suspensões no tanque foi o reômetro *Brookfield* modelo *R/S plus*, com *spindle* coaxial de 40 mm (CC-40), com um banho termostático ligado a uma jaqueta de aquecimento para manter a temperatura da suspensão constante a 30 °C. Neste sistema foram determinadas, tensão cisalhante, viscosidade aparente, temperatura e tixotropia para uma dada faixa de deformação, mediante o auxílio do *software* Rheo 3000. De acordo com Pereira (2010), é de suma importância que a suspensão experimente um cisalhamento prévio antes das principais informações reológicas serem obtidas; esse pré-cisalhamento tem como objetivo quebrar estruturas géis da suspensão evitando, assim, problemas relacionados a histerese, típica de fluidos tixotrópicos (GONÇALVES, 2019). Assim, um cisalhamento prévio era realizado nas amostras, que consistiu numa taxa de deformação de 1021 s<sup>-1</sup> durante 60 s (PEREIRA, 2010; GONÇALVES, 2019). Após a preparação prévia da amostra, a suspensão era submetida a uma taxa de deformação de 0 a 2100 s<sup>-1</sup> em ciclo crescente durante 5 min (GONÇALVES, 2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos. As informações são dispostas em gráficos de barras, superfícies de respostas e curvas de eficiência. Além disso, foram realizados tratamentos estatísticos com o intuito de propor equações de previsão das seguintes variáveis: vazão de alimentação, número de Euler, concentração volumétrica no *underflow*, razão de líquido, eficiência total, eficiência total reduzida, diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido. O detalhamento dos resultados experimentais também é disposto em tabelas no Apêndice C. Em adição, no Apêndice D apresentam-se testes de hipótese que auxiliam a julgar se uma determinada resposta do hidrociclone convencional é estatisticamente semelhante ao do hidrociclone filtrante.

### 4.1 ENSAIOS PRELIMINARES

A seguir, será apresentado o resultado que caracteriza o material particulado utilizado e resultados referentes aos testes hidrodinâmicos realizados utilizando o hidrociclone convencional (HC) e filtrante (HF). Estes testes hidrodinâmicos serão utilizados como base para a realização das simulações computacionais do Apêndice A.

#### 4.1.1 Material Particulado

O modelo RRB foi o utilizado para o ajuste da distribuição granulométrica das partículas. Na Figura 4.1 indica-se a distribuição granulométrica tipicamente obtida para a rocha fosfática, sendo o eixo das abcissas o diâmetro da partícula e o eixo das ordenadas a fração mássica cumulativa.

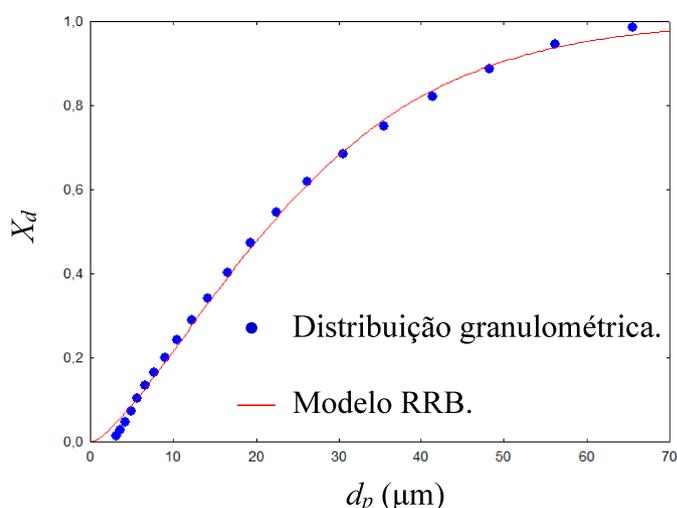


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da rocha fosfática e ajuste com modelo RRB.  
Fonte: autor.

O material teve a sua massa específica real aferida em  $3,1354 \pm 0,0012 \text{ g/cm}^3$  usando o picnômetro a gás hélio *AccuPyc1330* da marca *Micromeritics*. Por fim, os parâmetros ajustados para o Modelo RRB podem ser visualizados na Equação 4.1.

$$X_d = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{27,187} \right)^{1,41} \right] \quad (R^2 = 0,9980) \quad (4.1)$$

#### 4.1.2 Testes Preliminares

Com o intuito de obter informações para as simulações fluidodinâmicas, o HC e HF foram acoplados à unidade experimental e água foi colocada no reservatório. Os experimentos foram conduzidos a uma queda de pressão de 30 psi. Os resultados de vazões obtidos para cada um desses equipamentos são apresentados na Tabela 4.1. Nestes experimentos hidrodinâmicos foi possível constatar que o hidrociclone filtrante apresenta uma vazão de alimentação maior do que o convencional (cerca de 29% maior), que já é um indício de que a associação da filtração à hidrociclonagem beneficiou a capacidade de operação do equipamento. Estes resultados, serão usados no Apêndice A como base para os estudos envolvendo a simulação do hidrociclone filtrante.

Tabela 4.1 – Resultados dos testes hidrodinâmicos utilizando o HC e HF.

Variável	HC	HF
Vazão mássica de alimentação	300,85 g/s	390,41 g/s
Vazão mássica de <i>underflow</i>	115,66 g/s	163,21 g/s
Vazão mássica de <i>overflow</i>	176,77 g/s	229,22 g/s
Vazão mássica de filtrado	-	0,15 g/s
Queda de pressão	30 psi	30 psi
Temperatura	22 °C	25 °C

## 4.2 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS NA ALIMENTAÇÃO

A concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $C_{VA}$ ) foi uma das variáveis estudadas no planejamento de experimentos. A importância do estudo desta variável deve-se ao fato de que muitas suspensões utilizadas nas indústrias possuem concentrações elevadas. Os itens subsequentes discutem os efeitos provocados pela concentração de sólidos na alimentação em respostas de interesse.

#### 4.2.1 Capacidade de Processamento e Consumo Energético

Uma das respostas que caracteriza a capacidade de processamento é a vazão volumétrica, representada pela variável “ $Q_A$ ”. Essa vazão é intimamente relacionada à queda de pressão ( $-\Delta P$ ), que foi a variável manipulada nos experimentos, e é de suma importância para a análise dos custos de operação do equipamento.

Na Figura 4.2 apresentam-se gráficos em barras representando a vazão de alimentação. A parte esquerda da figura indica a vazão para o hidrociclone convencional (HC), enquanto a parte direita indica as vazões obtidas para o hidrociclone filtrante (HF). As informações apresentadas referem-se à condição reológica mais branda proposta pelo planejamento de experimentos ( $C_{CMC}$  igual a 0,20%).

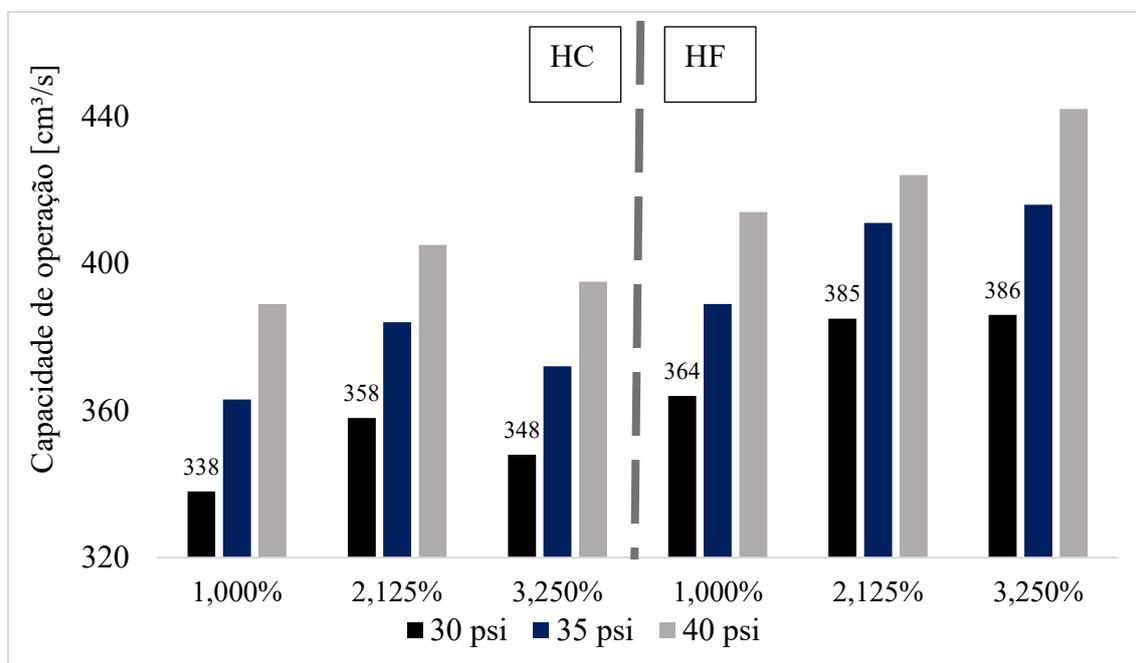


Figura 4.2 – Capacidade de alimentação dos equipamentos em função da concentração de sólidos e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

Na Figura 4.2 ilustra-se o comportamento esperado de como o aumento da queda de pressão também aumenta a vazão volumétrica de alimentação, para todos os equipamentos, independentemente da concentração volumétrica de sólidos na alimentação (GONÇALVES, 2019).

A respeito do hidrociclone convencional (HC), observou-se que, para a maioria dos casos, a vazão de alimentação experimentou uma flutuação em torno de uma vazão média. Constatou-se que quando a concentração volumétrica de sólidos aumentou de

1,000% para 2,125%, a vazão de alimentação foi majorada para todos os níveis de queda de pressão. Em contraste, foi observado que na maioria dos casos a capacidade de alimentação diminuiu quando a concentração de sólidos passou de 2,125% para 3,250%. Esse comportamento não-linear leva a acreditar que exista uma concentração de alimentação que pode promover uma vazão de alimentação máxima, o que resultaria em uma redução no número de Euler, o que acarretaria um menor consumo energético do equipamento.

Segundo Li *et al.* (2007), em baixos valores de  $C_{VA}$  o atrito dos sólidos na parede pode fazer com que ocorra uma perda de carga no equipamento diminuindo a queda de pressão. Desse modo, com o intuito de manter a queda de pressão, uma maior quantidade de suspensão deve ser alimentada ao equipamento.

O hidrociclone filtrante (HF) apresentou um comportamento diferente do hidrociclone convencional (HC). Nos experimentos propostos, a vazão de alimentação do HF aumentou significativamente quando se passou do valor de  $C_{VA}$  de 1,000% para 2,125%. Entretanto, esse ganho na vazão se tornou menos significativo quando a concentração de sólidos aumentou de 2,125% para 3,250%. É plausível acreditar que caso a fração sólida aumentasse além da porcentagem de 3,250%, a vazão de alimentação do HF poderia ainda atingir um valor máximo e depois decair. A justificativa utilizada para o comportamento crescente inicial da vazão do hidrociclone convencional (HC) pode ser estendida para o comportamento crescente da vazão no hidrociclone filtrante (HF). Por fim, foi observado que a vazão de alimentação apresentou um comportamento semelhante nos três níveis de concentração de viscosificante para os dois equipamentos.

Quando se comparou o HF e HC em mesmas condições operacionais, o HF apresentou valores de vazão significativamente maiores que o HC (em média, cerca de 6% maior), o que evidenciou como a presença do meio filtrante certamente alterou o perfil de escoamento no interior do equipamento. Vieira (2006) propôs que o líquido retirado pela matriz filtrante faria com que o sistema demandasse maior quantidade de suspensão alimentada, mesmo que a vazão de filtrado fosse ínfima. Desse modo, o HF apresentou uma vantagem interessante frente ao HC: para uma mesma queda de pressão, o HF operou maior quantidade de suspensão do que o HC, o que fez com que o primeiro consumisse energia de maneira mais eficiente do que o segundo. Tal constatação ficou evidenciada na Figura 4.3, referente ao número de Euler.

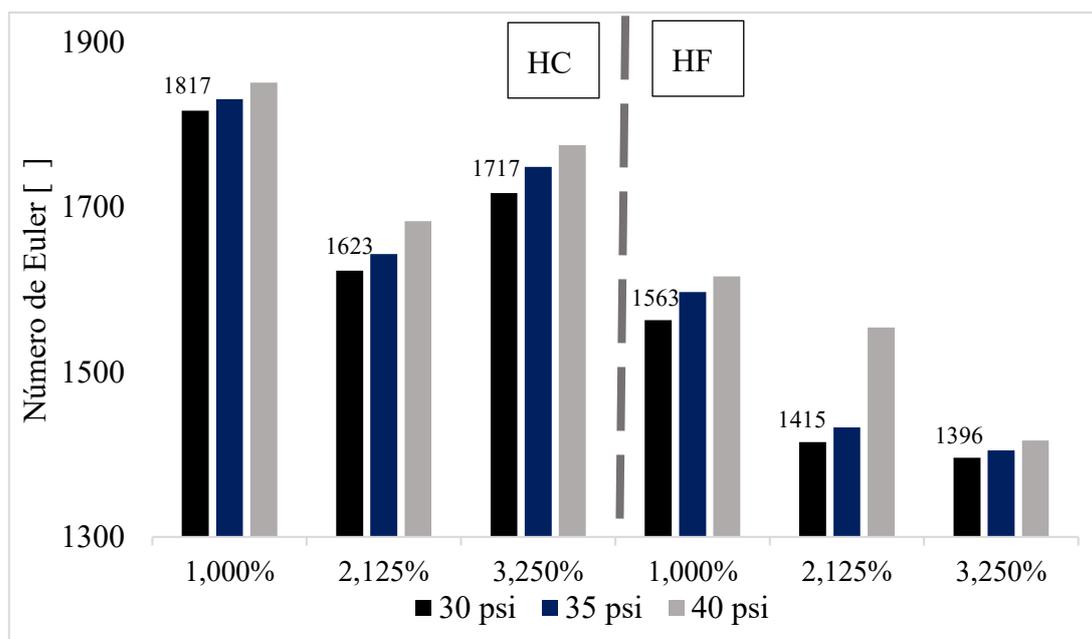


Figura 4.3 – Número de Euler dos equipamentos em função da concentração de sólidos e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

O número de Euler é uma relação da queda de pressão com energia cinética por unidade de volume. É uma resposta importante que auxilia a compreender o consumo energético dos equipamentos. Sempre que possível, o número de Euler deve ser minimizado, pois equivale a um menor consumo energético do equipamento para o processo de separação.

Para o equipamento convencional, observou-se inicialmente uma redução do número de Euler, que ocorreu justamente pelo aumento da vazão que o equipamento experimentou quando a fração de sólido passou de 1,000% para 2,125%. Como dito anteriormente, isso ocorreu devido à perda de carga causada pelo atrito da partícula com a parede (LI *et al.*, 2007). Entretanto, o número de Euler aumenta quando a concentração volumétrica de sólidos passou de 2,125% para 3,250%, devido à redução da vazão de alimentação.

O número de Euler, para o equipamento filtrante, apresentou na maioria das vezes, um comportamento decrescente sempre que a fração de sólidos era aumentada. Tal comportamento era esperado, pois a vazão de alimentação do HF, na maioria dos casos, teve um comportamento crescente com a fração de sólidos. Observou-se que a variação no número de Euler não foi tão pronunciada quando se passou da fração sólida de 2,125% a 3,250%. Isso foi um reflexo da baixa variação da vazão de alimentação entre tais frações

de sólido. Essa baixa variação do número de Euler, também levou a acreditar que caso a fração de sólidos aumentasse ainda mais, o número de Euler poderia atingir um mínimo e depois aumentar. Foi observado que o número de Euler apresentou um comportamento semelhante em todos os níveis propostos de concentração mássica de viscosificante para ambos os equipamentos.

Quando se comparou o hidrociclone filtrante (HF) com o hidrociclone convencional (HC), constatou-se que o HF possui números de Euler, na maioria dos casos, significativamente menores do que o HC (em média, 12% menor). Isso mostra como a presença do filtro foi benéfica à operação de hidrociclonagem, pois o contorno filtrante aumentou a vazão de alimentação do HF frente ao HC e, como consequência, fez com que o HF atingisse um consumo energético reduzido.

De modo geral, a filtração contribuiu para a capacidade de operação do equipamento. A vazão de alimentação para o HF ficou entre 364 a 527 cm<sup>3</sup>/s enquanto a do HC ficou entre 337 a 499 cm<sup>3</sup>/s. O número de Euler, para o HF variou entre 952 a 1616, e para o HC houve uma variação entre 1065 a 1851.

### **4.2.2 Capacidade de Espessamento**

A capacidade de espessamento pode ser mensurada pela razão de líquido ( $RL$ ) do equipamento e pela concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* ( $C_{VU}$ ). Quando o objetivo é o de se obter uma corrente de *underflow* espessa, é de suma importância que o hidrociclone opere com baixas razões de líquido e altos valores de concentração volumétrica de sólidos no *underflow*. Apesar do HGOT1 ser um hidrociclone tipicamente classificador, a capacidade de espessamento dos hidrociclones HC e HF foi analisada neste trabalho.

Na Figura 4.4 representa-se o comportamento da concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow*, comparando-se o equipamento convencional com o filtrante.

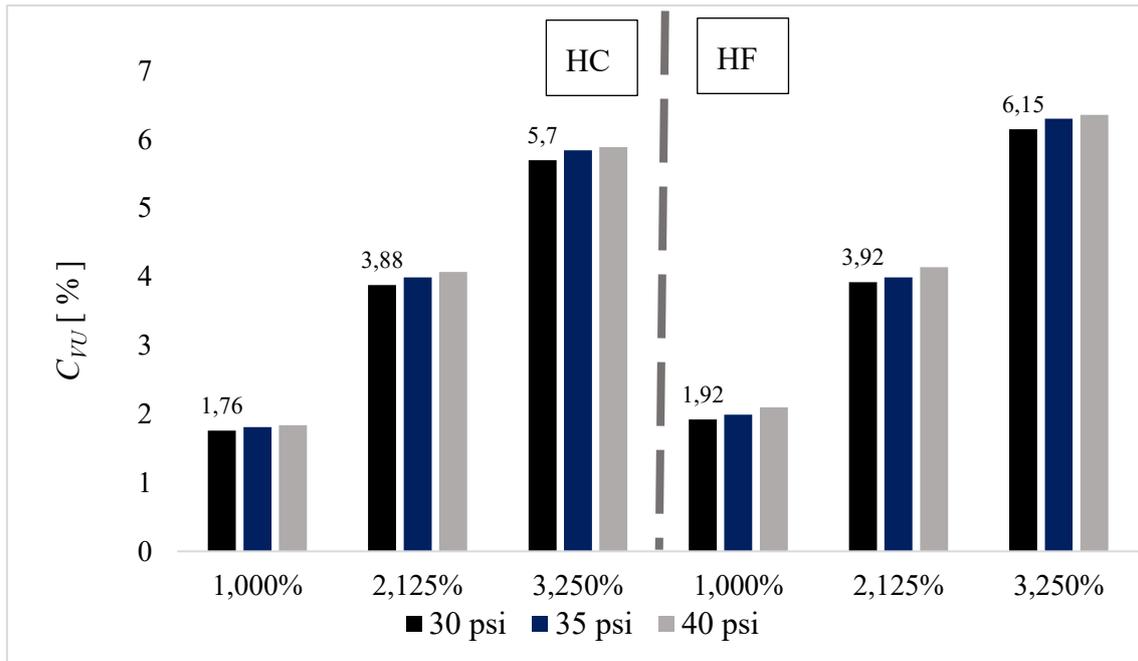


Figura 4.4 – Concentração volumétrica na corrente de *underflow*, em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

Observou-se que o aumento da queda de pressão fez com que a  $C_{VU}$  fosse aumentada. Isso se deve ao fato de que à medida que a queda de pressão aumenta, mais vazão de alimentação era disponibilizada ao equipamento, o que fez que o campo centrífugo se tornasse mais pronunciado, favorecendo o direcionamento do material particulado ao vórtice externo do hidrociclone e, assim, sua coleta no *underflow*.

O aumento na concentração volumétrica da alimentação ( $C_{VA}$ ) fez com que a  $C_{VU}$  também aumentasse. Quando se comparou o hidrociclone filtrante (HF) com o hidrociclone convencional (HC), constatou-se que o HF possui, na maioria dos casos, valores de  $C_{VU}$  significativamente maiores (em média, cerca de 6% maior). Isto pode ser explicado pelo fato de o HF apresentar, em módulo, velocidade radial menos intensa na região cônica do que o HC (VIEIRA, 2006). Essa velocidade radial menos pronunciada do HF pôde ter feito com que menos partículas fossem transferidas do vórtice externo para o vórtice interno (VIEIRA, 2006). Assim, foi possível inferir que as partículas tiveram uma maior chance de se manterem no vórtice externo do equipamento, o que fez com que elas possuíssem maior probabilidade de serem coletadas na corrente de *underflow*. Para os três níveis de  $C_{CMC}$  propostos, foi observado que a  $C_{VU}$  apresentou comportamento semelhante frente à queda de pressão e à concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $C_{VA}$ ).

Como mencionado anteriormente, a razão de líquido ( $RL$ ), também é uma variável que auxilia a compreender o poder de espessamento do equipamento. Na Figura 4.5 representa-se o comportamento da  $RL$  frente a variações da  $C_{VA}$  e da queda de pressão, comparando essa variável obtida pelos equipamentos convencional e filtrante.

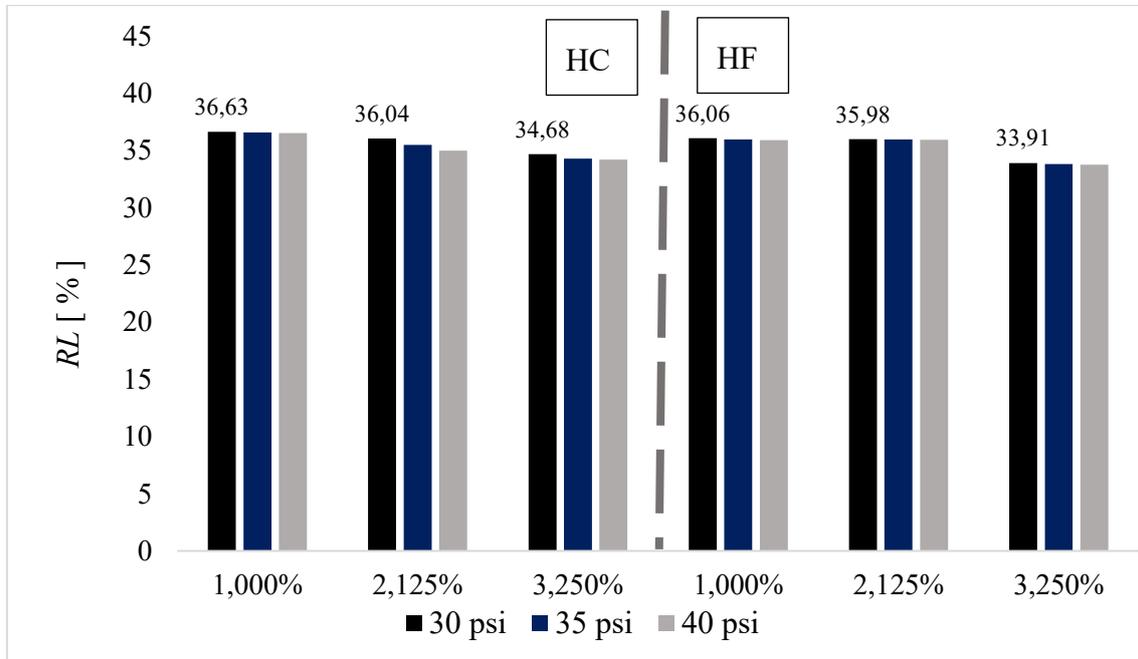


Figura 4.5 – Razão de líquido em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

Foi observado que incrementos na queda de pressão e na concentração volumétrica de sólidos na alimentação, não impactaram de forma significativa no comportamento da razão de líquido para ambos os equipamentos (como apresentado no Apêndice D). Isso provavelmente acontece porque as suspensões utilizadas nessa pesquisa são significativamente mais viscosas do que a água. A viscosidade da suspensão tende a inibir o desenvolvimento dos movimentos espiralados da suspensão (WU *et al.*, 2017). Desse modo, acredita-se que os efeitos provocados pela queda de pressão e concentração de sólidos não foram intensos o suficiente a ponto de sobrepor o efeito supressor causado pelo caráter reológico da suspensão. Foi observado que o comportamento da razão de líquido frente à queda de pressão e à concentração volumétrica de sólidos na alimentação, foi semelhante em todos os níveis de  $C_{CMC}$  propostos.

Com o intuito de comparar os valores de  $RL$  obtidos pelos equipamentos convencional e filtrante foram realizados testes de hipótese (Apêndice D). Os testes

realizados apontam que os equipamentos tiveram uma tendência de apresentar valores estatisticamente semelhantes para a razão de líquido. Desse modo, não houve evidências estatísticas de que a associação da filtração à hidrociclonação impactou a razão de líquido.

### 4.2.3 Eficiência

A eficiência pode ser quantificada pelas variáveis  $\eta$  (eficiência total) e  $\eta'$  (eficiência total reduzida). Na Figura 4.6 representa-se o comportamento da eficiência total quando o comportamento reológico da suspensão se encontra no nível -1 da variável  $C_{CMC}$ . Como nos gráficos anteriores, à esquerda da figura encontram-se dados referentes ao hidrociclone convencional (HC), enquanto as informações ao lado direito expõem os dados sobre o hidrociclone filtrante (HF).

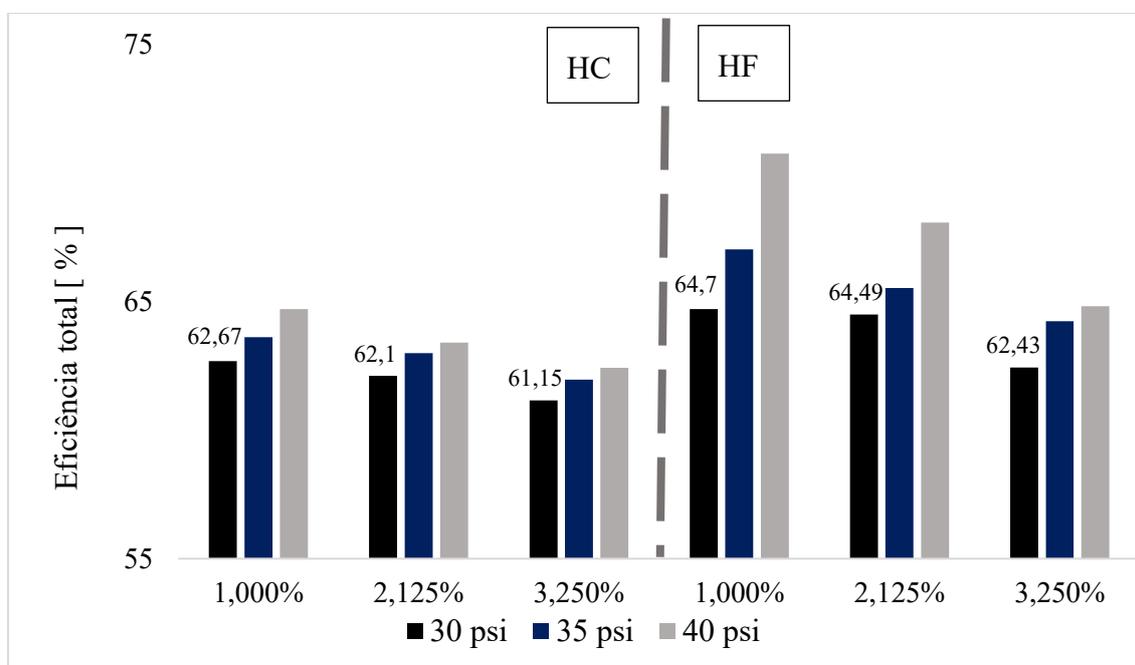


Figura 4.6 – Eficiência total em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

Primeiramente, observou-se que para todas as situações o aumento da queda de pressão também elevou a eficiência. O incremento da queda de pressão elevou a vazão de alimentação ao equipamento e, assim, beneficiou a intensidade do campo centrífugo, o que fez com que mais material particulado fosse direcionado ao vórtice externo e, assim, sendo coletado no orifício de *underflow*.

Por outro lado, à medida que a fração mássica de sólidos na alimentação aumentou, houve uma redução da eficiência total para o equipamento convencional e

filtrante. O aumento da concentração de sólidos no sistema pode ter feito com que a velocidade terminal das partículas fosse diminuída, assim mais material sólido foi conduzido ao vórtice interno e escapou pelo tubo de *overflow* (SVAROVSKY, 2000; ASCENDINO, 2019; GOÇALVES, 2019).

No Apêndice D desta dissertação são apresentados diversos testes de hipótese comparando as eficiências totais médias dos hidrociclones convencional e filtrante. De modo geral, a média da eficiência para o HC foi de 53,46% enquanto a do equipamento filtrante foi de 56,06%, sendo estatisticamente diferentes. Pôde-se entender que o HF apresentou maior eficiência pelo fato de sua corrente de *underflow* ser mais rica em material particulado, pois nesse equipamento a velocidade radial foi menos intensa do que a mesma componente de velocidade encontrada no HC (VIEIRA, 2006). Essa menor intensidade de velocidade radial pode ter feito com que o material particulado ficasse mais próximo à parede do equipamento, o que aumentou a chance de que fosse coletado no orifício de *underflow*.

Na Figura 4.7 indicam-se os resultados obtidos para a eficiência total reduzida. Observou-se que assim como na eficiência total, o aumento da queda de pressão tendeu a elevar os valores de eficiência total reduzida, por fortalecer o campo centrífugo do equipamento, fazendo com que maior parcela de material fosse coletada devido à sedimentação centrífuga.

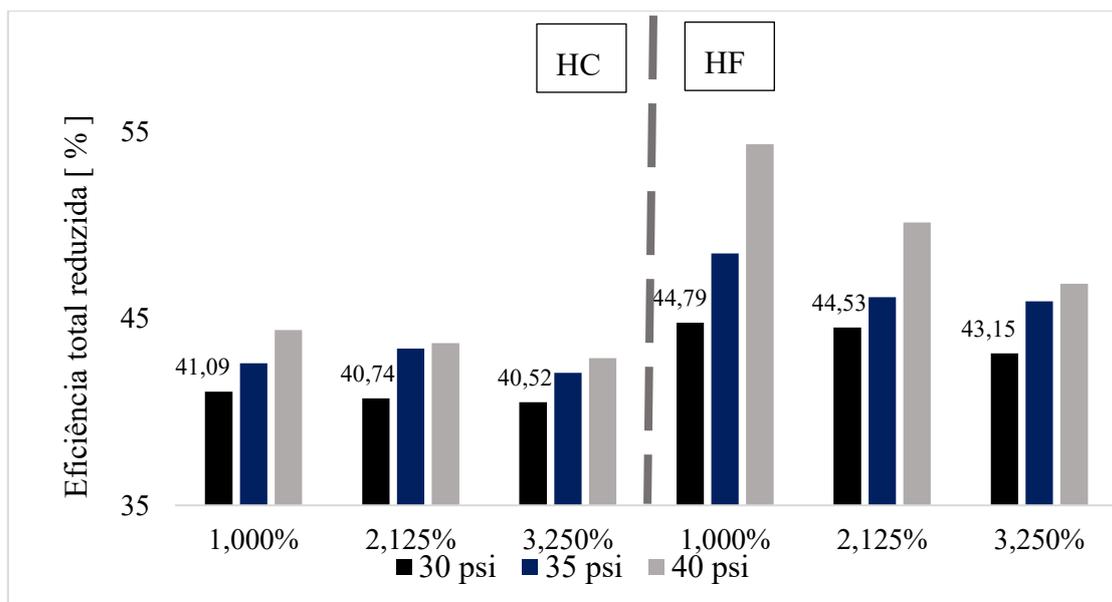


Figura 4.7 – Eficiência total reduzida em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

Ao observar a Figura 4.7 é possível constatar que o aumento da concentração de sólidos na alimentação diminuiu a eficiência total reduzida. Segundo Davailles *et al.* (2012), o aumento da  $C_{VA}$  pôde ter diminuído a intensidade das componentes de velocidades tangenciais, o que por sua vez pôde ter reduzido o campo centrífugo do equipamento fazendo com que a eficiência total reduzida diminuísse. Observa-se também, que a média de separação centrífuga do equipamento filtrante (HF) foi de aproximadamente 26%, enquanto a do convencional foi de 22%, indicando o HF como um separador centrífugo mais eficiente. Além disso, foi observado que o comportamento das eficiências frente à queda de pressão e  $C_{VA}$  foi semelhante em todos os níveis de concentração de viscosificante propostos.

#### 4.2.4 Diâmetros de Corte

O diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) indica o tamanho de uma partícula que tem 50% de chance de ser coletada na corrente de *underflow*. O  $d_{50}$  contabiliza tanto as partículas que são captadas pelo efeito do campo centrífugo ou pelo arraste axial descendente do fluido. Por outro lado, o diâmetro de corte reduzido ( $d_{50}'$ ) contabiliza apenas as partículas coletadas devido ao efeito do campo centrífugo, excluindo o material coletado devido o arraste de líquido axial da suspensão.

Partículas maiores que o  $d_{50}$  possuem uma chance maior que 50% de serem coletadas no *underflow*, enquanto partículas menores que  $d_{50}$  possuem uma chance menor do que 50% de serem coletadas na descarga de concentrado. Nas figuras 4.8 e 4.9 são mostradas as respostas diâmetro de corte e diâmetro de corte reduzido, respectivamente, para os equipamentos convencional (HC) e filtrante (HF).

De acordo com as figuras 4.8 e 4.9, o aumento da queda de pressão diminuiu os valores dos diâmetros de corte. Essa redução pôde ter sido causada devido ao fato de que o campo centrífugo foi fortalecido e assim uma maior fração de material fino foi coletada no orifício de *underflow*.

Para ambos os equipamentos, notou-se um aumento de  $d_{50}$  e  $d_{50}'$  à medida que a fração de sólidos alimentada aumentou. Esse é um comportamento, como esperado, inverso ao experienciado pelas eficiências. O aumento de  $C_{VA}$  fez com que a velocidade tangencial da suspensão dentro do equipamento fosse reduzida (DAVAILLES *et al.*, 2012). Essa redução fez com que menos material particulado atingisse a corrente de *underflow*, e as partículas escaparam pelo tubo de *overflow* (GHODRAT *et al.*, 2016).

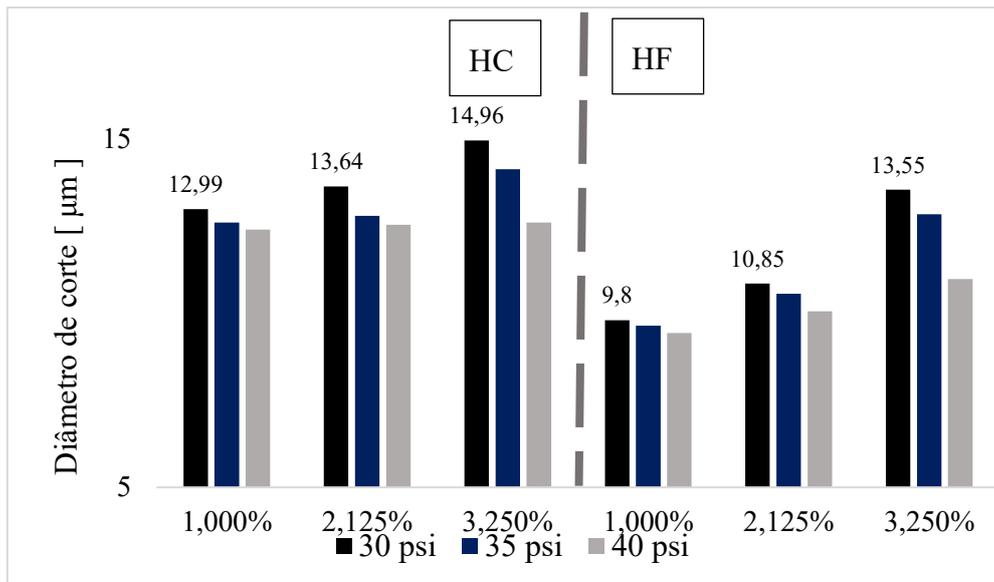


Figura 4.8 – Diâmetro de corte em função da concentração de sólidos e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

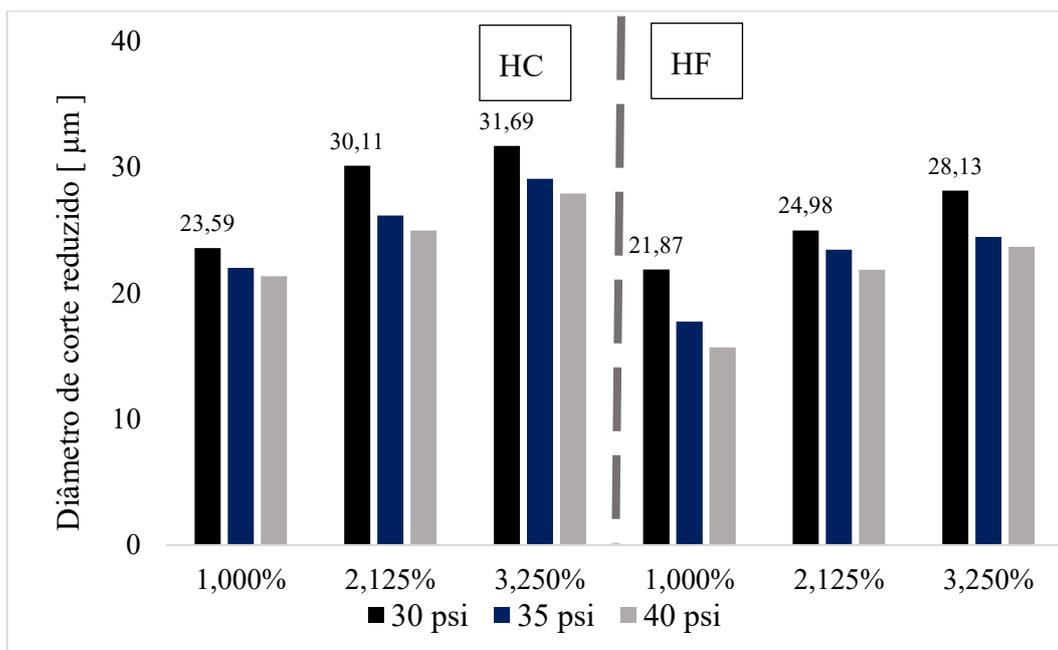


Figura 4.9 – Diâmetro de corte reduzido em função da concentração de sólidos alimentada e queda de pressão para a condição de menor concentração de viscosificante (0,20% m.).

Para o equipamento convencional (HC), o  $d_{50}$  variou entre 12,40 a 46,67  $\mu\text{m}$ , enquanto para o filtrante (HF) a variação foi de 9,43 a 42,56  $\mu\text{m}$ . O  $d_{50}'$  variou de 21,34 a 105,01  $\mu\text{m}$  para o HC, e variou de 15,70 a 88,92  $\mu\text{m}$  para o HF. Observou-se que o equipamento filtrante alcançou  $d_{50}$  e  $d_{50}'$  menores do que o seu similar convencional. Isso foi um reflexo do HF possuir maiores eficiências totais, pois o contorno filtrante auxiliou a manter as partículas sólidas próximas às paredes do equipamento filtrante (VIEIRA,

2006), fazendo com que elas fossem coletadas no orifício de *underflow* com maior probabilidade. Além disso, foi observado que o comportamento do  $d_{50}$  e do  $d_{50}'$  frente às variações na queda de pressão e concentração volumétrica de sólidos na alimentação foi semelhante em todas as condições de  $C_{CMC}$  propostas.

### 4.3 EFEITO REOLÓGICO PROMOVIDO PELA CONCENTRAÇÃO DO VISCOSIFICANTE – CMC

Antes de discutir o efeito provocado pela mudança da reologia da suspensão de operação no desempenho dos hidrociclones, é válido discorrer sobre os impactos causados pela adição do viscosificante (CMC) na suspensão alimentada. Apesar de variação branda na concentração mássica do viscosificante, de 0,2% (nível -1) a 0,6% (nível +1), o comportamento reológico da suspensão mudou drasticamente.

Nas Figura 4.10 retratam-se curvas de tensão de cisalhamento das suspensões utilizadas nessa pesquisa em função da taxa de deformação, da concentração de viscosificante e da concentração de sólidos. Na Figura 4.11 é ilustrado o comportamento da viscosidade das suspensões utilizadas nesta pesquisa em função da concentração de viscosificante, da taxa de deformação e da concentração de sólidos. Observa-se que, neste estudo, a reologia da suspensão foi influenciada mais pela concentração do viscosificante do que pela concentração volumétrica de sólidos.

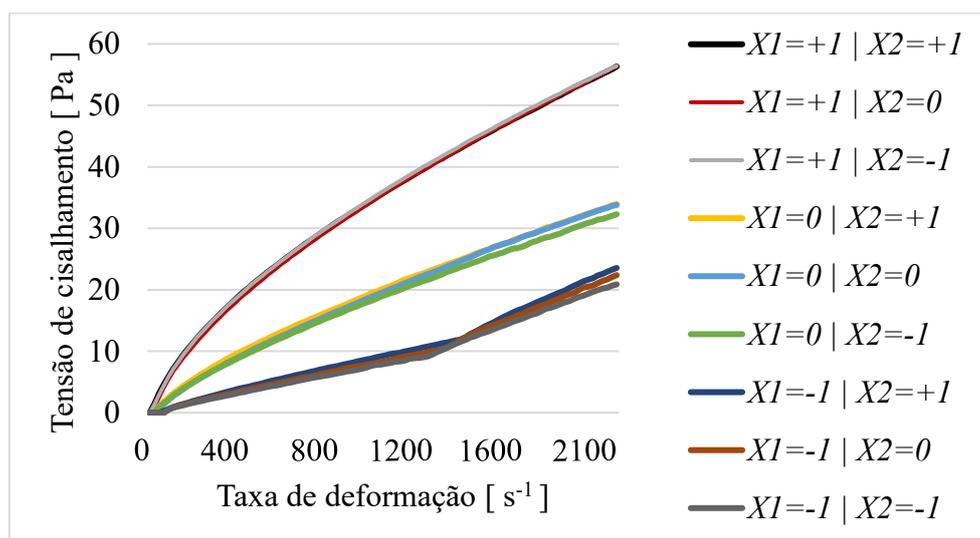


Figura 4.10 – Tensão de cisalhamento das suspensões utilizadas neste estudo em função da concentração de CMC ( $X1$ ), da taxa de deformação e da concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $X2$ ).

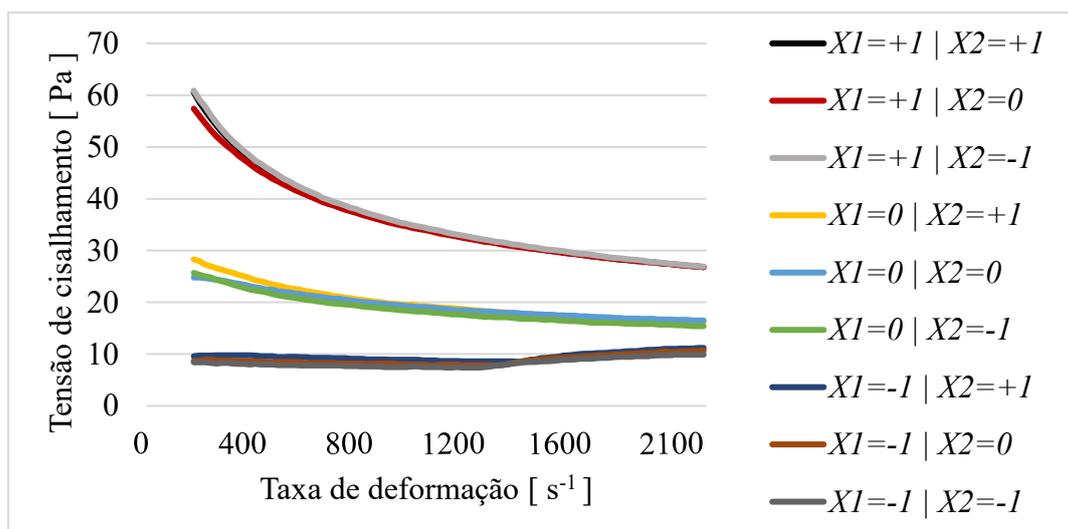


Figura 4.11 – Viscosidade aparente das suspensões utilizadas nessa pesquisa em função da concentração mássica de CMC ( $X_1$ ), taxa de deformação e da concentração volumétrica de sólidos na alimentação ( $X_2$ ).

As suspensões utilizadas nesta dissertação foram classificadas como não-newtonianas. Esse tipo de fluido apresenta tensão de cisalhamento crescente e não-linear com o aumento da taxa de deformação. Conseqüentemente, a viscosidade mostrou-se variável (viscosidade aparente). Além disso, as suspensões utilizadas neste estudo foram caracterizadas matematicamente seguindo um modelo do tipo de *Power-Law* (Equação 2.13). Como dito no capítulo anterior, antes da realização de cada experimento, amostras da suspensão retida no reservatório foram coletadas com a finalidade de se determinar os parâmetros do modelo *Power-Law*.

Na Tabela 4.2 mostram-se médias dos parâmetros reológicos da suspensão em cada uma das concentrações de CMC, levando em consideração toda as concentrações volumétricas de sólidos,  $\bar{K}$  representa a média do índice de consistência,  $\bar{N}$  a média dos índices de comportamento,  $\bar{\eta}$  a média da viscosidade aparente avaliada em uma taxa de deformação de  $1250 \text{ s}^{-1}$  e  $\bar{R}^2$  indica a média dos coeficientes de determinação obtidos para o ajuste dos dados da reologia da suspensão usando o modelo *Power-Law*.

Tabela 4.2 – Relação dos parâmetros do modelo *Power-Law* com a concentração mássica do viscosificante.

Concentração mássica do viscosificante	$\bar{K}$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	$\bar{N}$ [ ]	$\bar{\eta}$ [cP]	$\bar{R}^2$
0,2%	0,0132±0,0020	0,9317±0,0128	7,8±0,5	0,9989±0,0003
0,4%	0,0888±0,0115	0,7753±0,0159	17,8±0,6	0,9995±0,0008
0,6%	0,3517±0,0271	0,6635±0,0113	31,9±0,3	0,9998±0,0001

A análise das Figuras 4.10 e 4.11 em conjunto com a Tabela 4.2 indica como o comportamento reológico foi significativamente alterado à medida que a concentração do viscosificante aumentou. Em adição, a Tabela 4.2 mostra valores satisfatórios para o coeficiente de determinação, o que indica um bom ajuste dos dados experimentais sobre a reologia com o modelo *Power-Law*. Observou-se que, com o aumento da concentração mássica da CMC, houve uma redução no índice de comportamento do fluido, o que garantiu um caráter pseudoplástico à suspensão. Em adição, observa-se que, para uma mesma taxa de deformação, a viscosidade aparente também aumentou juntamente com a concentração mássica da CMC. Como será visto nas seções seguintes, essa mudança reológica da suspensão impactou na operação de hidrociclonagem. Serão apresentados resultados referentes aos experimentos cuja concentração volumétrica de sólidos na alimentação ficou mantida em 1,000%. Além disso, os resultados apresentados são referentes às quedas de pressão de 30, 35 e 40 psi.

### ***4.3.1 Capacidade de Processamento e Consumo Energético***

Assim como nas seções passadas, os gráficos referentes desta seção sobre o efeito reológico contêm tanto dados sobre o equipamento convencional (à esquerda da figura) quanto dados sobre o equipamento filtrante (à direita da figura). Na Figura 4.12 representa-se o comportamento da vazão de alimentação em função da concentração de viscosificante da suspensão alimentada e da queda de pressão.

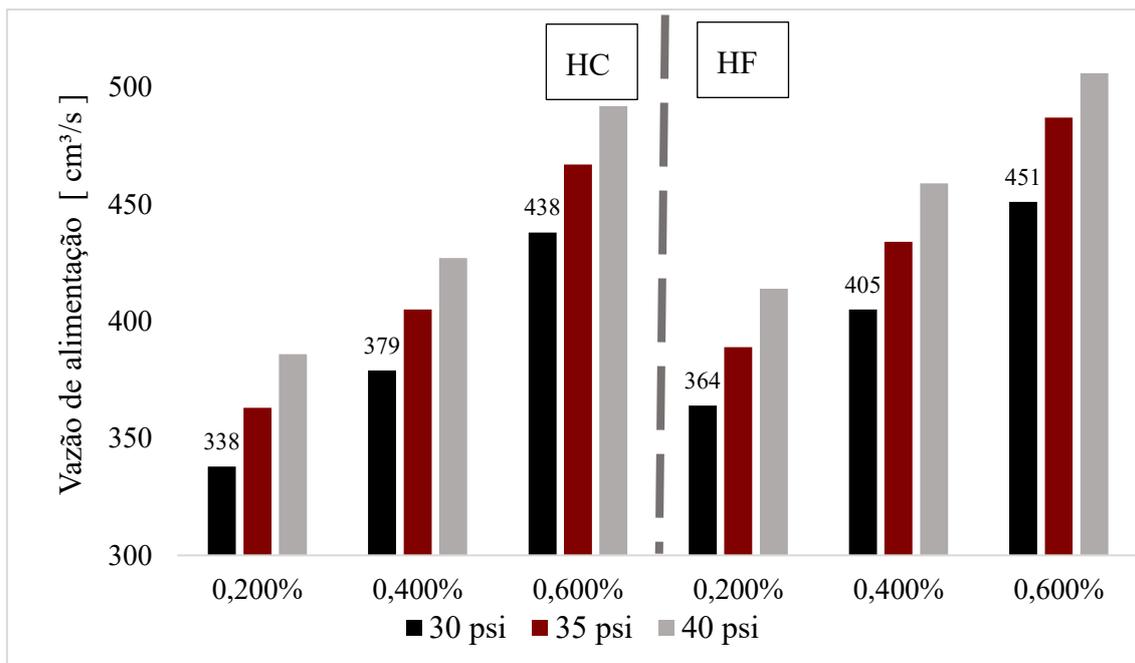


Figura 4.12 – Vazão de alimentação em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

Apesar de escoamentos viscosos tenderem a majorar a queda de pressão devido ao atrito molecular de parcelas do fluido entre si ou com estruturas sólidas (efeito indesejável), eles também podem apresentar alterações nos perfis de velocidade, especialmente no que se refere ao movimento espiralado no interior do hidrociclone (GONÇALVES, 2019). É sabido que o movimento espiralado no interior do hidrociclone é o principal responsável pela dissipação de energia que se reflete diretamente na queda de pressão. Desta forma, apesar de os dois fenômenos (atrito molecular e movimento espiralado reduzido) estarem presentes e atuarem em sentidos opostos na queda de pressão, a redução da velocidade tangencial deve ter sido a situação preponderante durante o funcionamento dos hidrociclones. Assim, notou-se que a capacidade de alimentação dos hidrociclones foi diretamente proporcional ao aumento de viscosidade do meio.

A segunda resposta que caracteriza a capacidade de operação do equipamento é o Número de Euler. Na Figura 4.13 indica-se como o efeito da reologia impactou nessa resposta. Foi observado que o comportamento do número de Euler foi inverso ao comportamento da vazão de alimentação. Desse modo, o acréscimo de viscosificante fez com que o número de Euler sofresse reduções. O comportamento descendente do número de Euler com o aumento do viscosificante se deu à diminuição da intensidade do movimento rotacional da suspensão (GONÇALVES, 2019). A diferença do número de

Euler entre os equipamentos tendeu a diminuir à medida que o meio se tornou mais viscoso, pois nessas condições provavelmente menos líquido percolou a matriz porosa. Foi observado que, para a concentração de sólidos de 1,000%, houve uma redução, em média, de 71% na diferença do número de Euler entre o equipamento convencional e filtrante, quando a concentração do viscosificante passou do nível -1 para o +1. Portanto, nesse patamar pode-se inferir que a operação de filtração, ora benéfica para redução do número de Euler, passou a se tornar pouco relevante à medida que a suspensão se tornou mais viscosa.

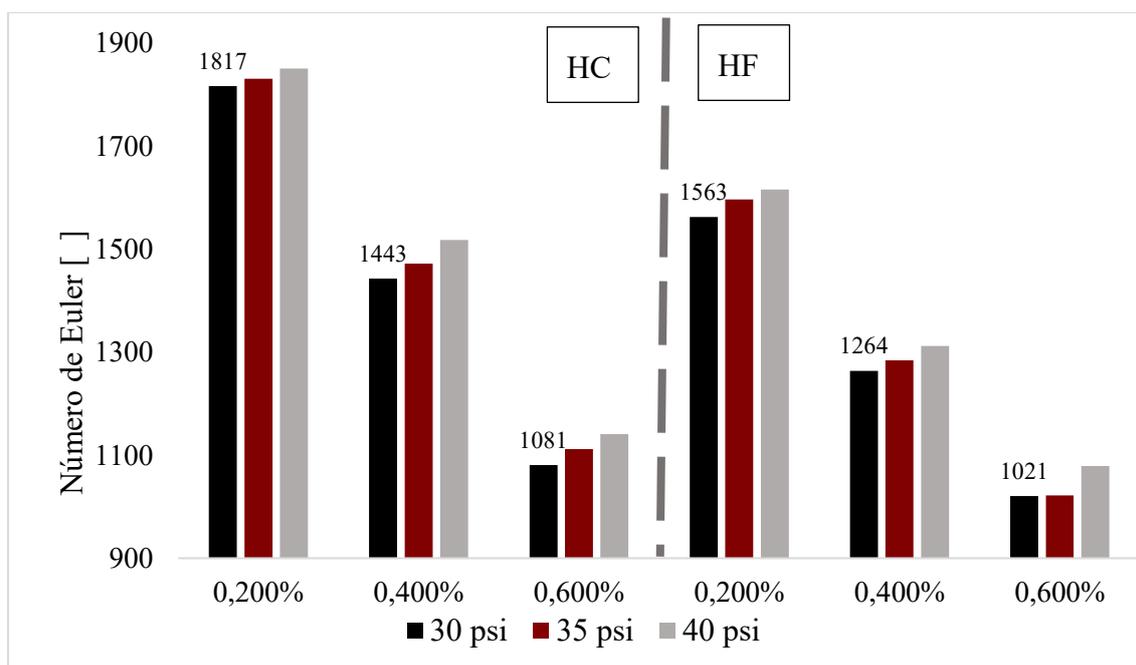


Figura 4.13 – Número de Euler em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

### 4.3.2 Capacidade de Espessamento

O comportamento frente à mudança do comportamento reológico da suspensão na capacidade de espessamento é mostrado nas figuras 4.14 e 4.15, as quais se referem, respectivamente, à concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* ( $C_{VU}$ ) e à razão de líquido ( $RL$ ). De modo geral, à medida que a suspensão se tornou mais viscosa, a capacidade de espessamento dos equipamentos convencional e filtrante diminuiu. É importante lembrar que os sólidos chegam à corrente de *underflow* devido à combinação do campo centrífugo com o efeito T do equipamento. Além disso, é de grande importância ressaltar que, além da suspensão se tornar cada vez mais viscosa com a adição do viscosificante, ele se apresenta mais inapta a desenvolver os movimentos rotacionais dentro dos hidrociclones, reduzindo o potencial de separação (GONÇALVES, 2019).

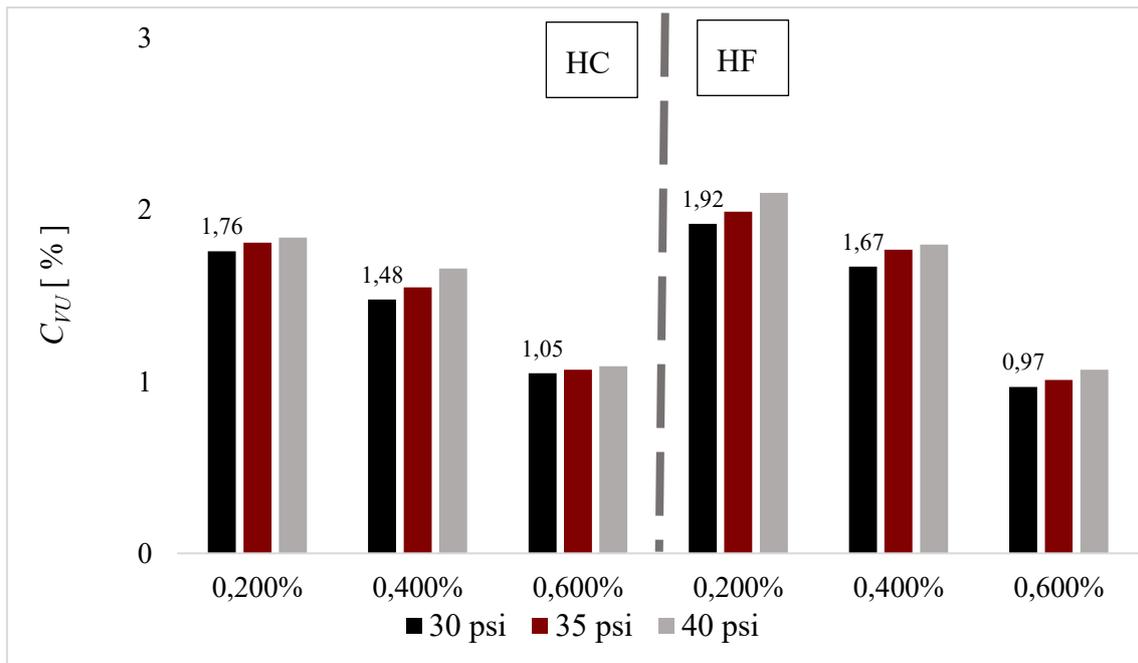


Figura 4.14 – Concentração volumétrica de sólidos no *underflow* em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

Em todos os experimentos realizados com o intuito de estudar o efeito da reologia da suspensão, observou-se que o aumento da quantidade de viscosificante fez com que a quantidade de material coletado no orifício de *underflow* diminuísse. Esse comportamento descendente foi resultado da perda dos movimentos espiralados. À medida que o comportamento reológico foi alterado pela adição do viscosificante, pôde ter ocorrido uma redução da componente tangencial de velocidade o que pôde ter feito com o campo centrífugo fosse prejudicado (TIAN *et al.*, 2018). Isto, por sua vez, fez com que menos material sólido fosse direcionado ao vórtice externo do equipamento (YANG *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017), resultando em menos material coletado na corrente de *underflow*.

Em adição, foi observado que a diferença entre os valores de  $C_{VU}$  do equipamento convencional e filtrante é significativamente menor na condição mais viscosa proposta do que na condição menos viscosa. Em média, a diferença da  $C_{VU}$  entre os equipamentos teve uma redução de cerca de 75% quando a concentração de  $C_{CMC}$  passou do nível -1 para o +1. À medida que a suspensão se tornava mais viscosa a operação de filtração era prejudicada. Essa perda da operação de filtração pôde ter equalizado o perfil de velocidade radial do HF com o do HC, o que fez com que, na condição mais viscosa, os

equipamentos operassem de maneira semelhante. Entretanto, tal afirmação só poderia ser comprovada com auxílio de técnicas em CFD.

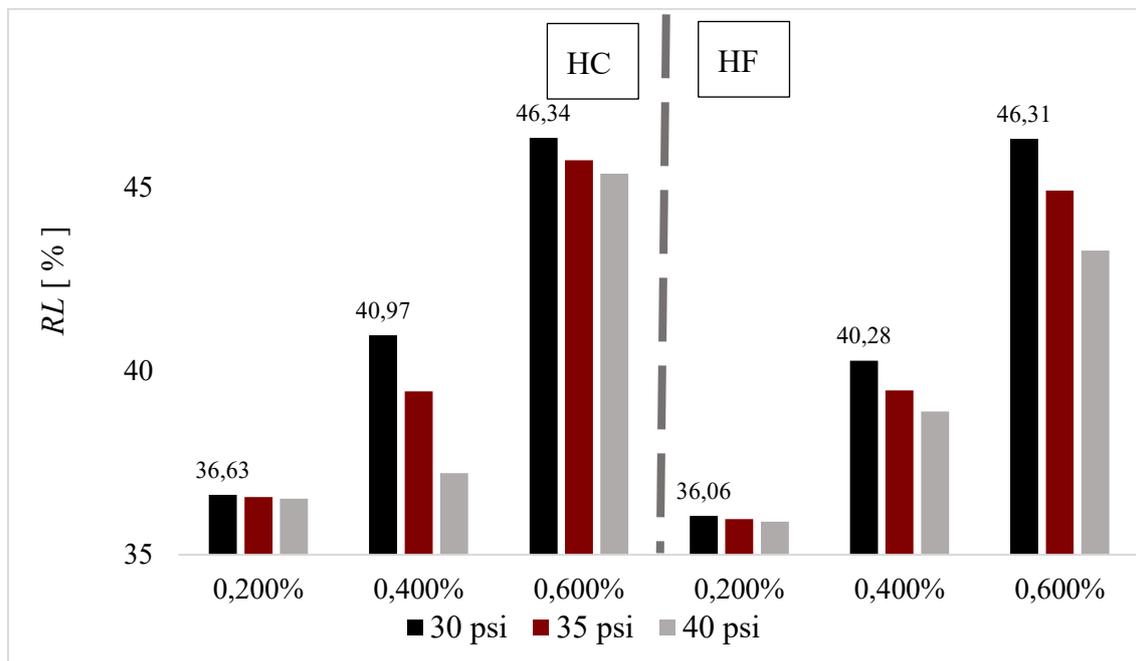


Figura 4.15 – Razão de líquido em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

À medida que a suspensão se tornou mais viscosa, a razão de líquido tendeu a aumentar. Neste caso, foi possível aferir que além de existir uma redução da componente tangencial da velocidade (YANG *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017) existiu um aumento na componente axial descendente (KAWATRA; BAKSHI; RUSESKEY, 1996; TIAN *et al.*, 2018), o que fez com que uma maior porção de líquido fosse conduzida à corrente de *underflow*, assim, o efeito T tornou-se mais pronunciado à medida que a viscosidade aumentou. Levando em consideração os experimentos e os testes de hipótese feitos (Apêndice D), é possível dizer que os equipamentos HF e HC tiveram um comportamento semelhante frente ao efeito reológico da suspensão em respeito à razão de líquido.

#### 4.3.3 Eficiência

A eficiência de separação foi medida pela eficiência total e pela eficiência total reduzida, as quais são representadas pelas figuras 4.16 e 4.17, respectivamente.

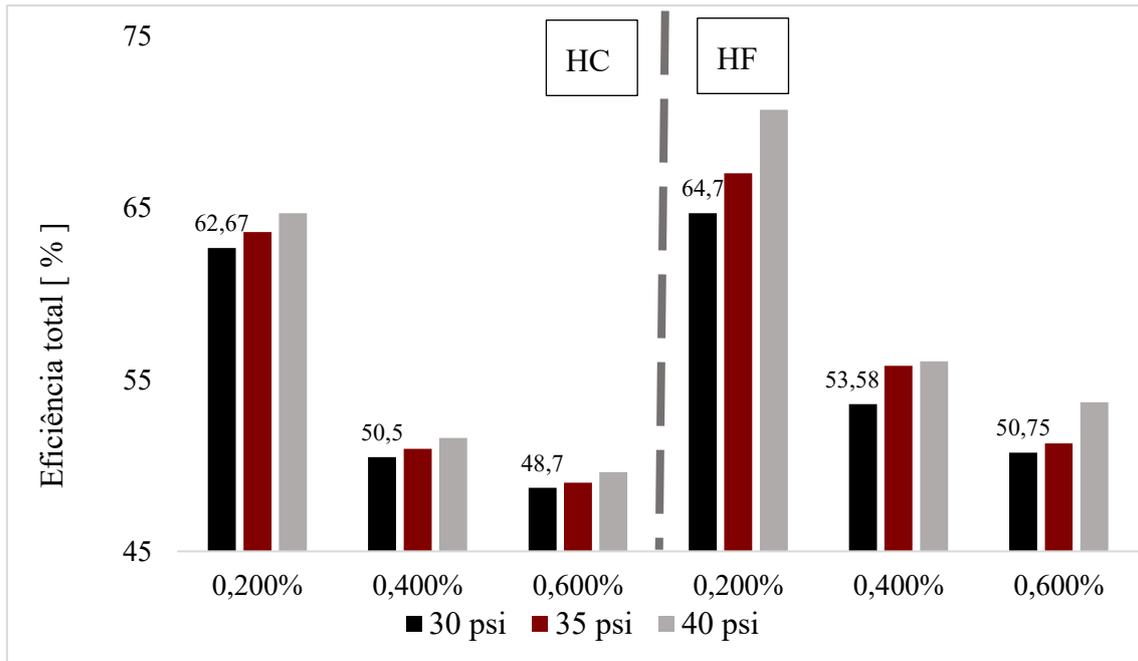


Figura 4.16 – Eficiência total em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

Observando a Figura 4.16 nota-se um comportamento semelhante tanto para o hidrociclone convencional (HC) quanto para o hidrociclone filtrante (HF). Inicialmente, ao se passar de uma concentração mássica de viscosificante de 0,20% para 0,40% existe uma redução considerável da eficiência. Entretanto, ao se passar da concentração mássica de CMC de 0,40% para 0,60%, a redução na eficiência foi mais suave. Tal comportamento também foi observado quando o efeito reológico foi estudado se mantendo a variável  $C_{VA}$  nos níveis 0 e +1.

Assim, foi possível inferir que quando a suspensão passou do comportamento reológico representado pelo nível -1 para o representado no nível 0 da concentração de CMC houve um grande impacto no campo centrífugo o que fez com que a eficiência total caísse bruscamente (YANG *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017). Essa redução na intensidade do campo centrífugo também ocorre quando a concentração de CMC passa do nível 0 para o +1, porém acredita-se que esse impacto é mais brando pelo fato da suspensão já se encontrar numa condição reológica pouco favorável para o sustento dos movimentos espiralados.

O equipamento HGOT1 quando operado com suspensão aquosa de quartzito ( $d_{63,2}=18,39 \mu\text{m}$  e  $N=1,09$ ) com concentração de 1,000% e em 25 psi apresentou uma eficiência total de 91,04% (KYRIAKIDIS, 2018). Na condição menos concentrada

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

( $C_{VA}=1,000\%$ ) e menos viscosa [ $C_{CMC}=0,2\%$ , tendo viscosidade aparente de 7,4 cP (para uma taxa de deformação de  $1250\text{ s}^{-1}$ )], o HC atingiu, neste trabalho, uma eficiência total 45% menor do que o HGOT1 [quando operado nas condições mencionadas por Kyriakidis (2018)]. O HC mesmo operado com um material mais denso e grosso, com uma queda de pressão cerca de 20% maior do que a do HGOT1, atingiu uma eficiência total menor do que o HGOT1. Isso é um grande indicativo de como a viscosidade da suspensão comprometeu a operação de hidrociclonagem, prejudicando o caráter coletor do equipamento.

Assim como mencionado anteriormente, o aumento da viscosidade da suspensão dificulta o movimento espiralado do fluido dentro do equipamento. Como auxílio, na Figura 4.17 mostra-se como o movimento centrífugo foi prejudicado ao revelar como a eficiência total reduzida se comportou frente ao efeito provocado pela mudança da reologia da suspensão.

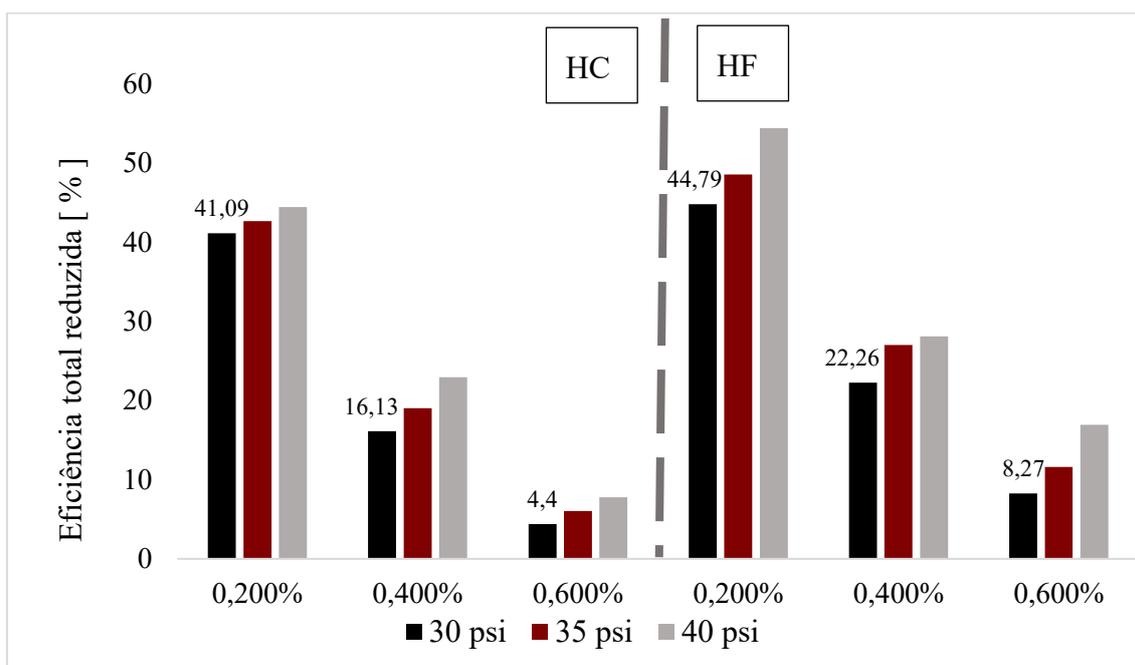


Figura 4.17 – Eficiência total reduzida em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

Na Figura 4.17 mostra-se o comportamento decrescente da eficiência total reduzida com o distanciamento do comportamento newtoniano da suspensão de operação. A eficiência total reduzida leva em consideração apenas os sólidos coletados no *underflow* devido ao campo centrífugo do equipamento. Como discutido anteriormente,

esse campo teve seu desenvolvimento prejudicado quando a viscosidade do meio aumentou (WU *et al.*, 2017; TIANG *et al.*, 2018; GONÇALVES, 2019).

De maneira geral, o equipamento filtrante conseguiu manter maiores valores de eficiência (tanto total quanto reduzida) quando comparado ao equipamento convencional. O motivo dessa diferença pode residir no fato de o HF possui uma componente radial menos intensa (em módulo) (VIEIRA, 2006), o que pode fazer com que o material particulado tenha maior probabilidade de se manter próximo às paredes e assim ser coletado no orifício de *underflow*.

### 4.3.4 Diâmetro de Corte

Por fim, nas figuras 4.18 e 4.19 mostram-se, respectivamente, o comportamento do diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e diâmetro de corte reduzido ( $d_{50}'$ ) quando a concentração de viscosificante é alterada.

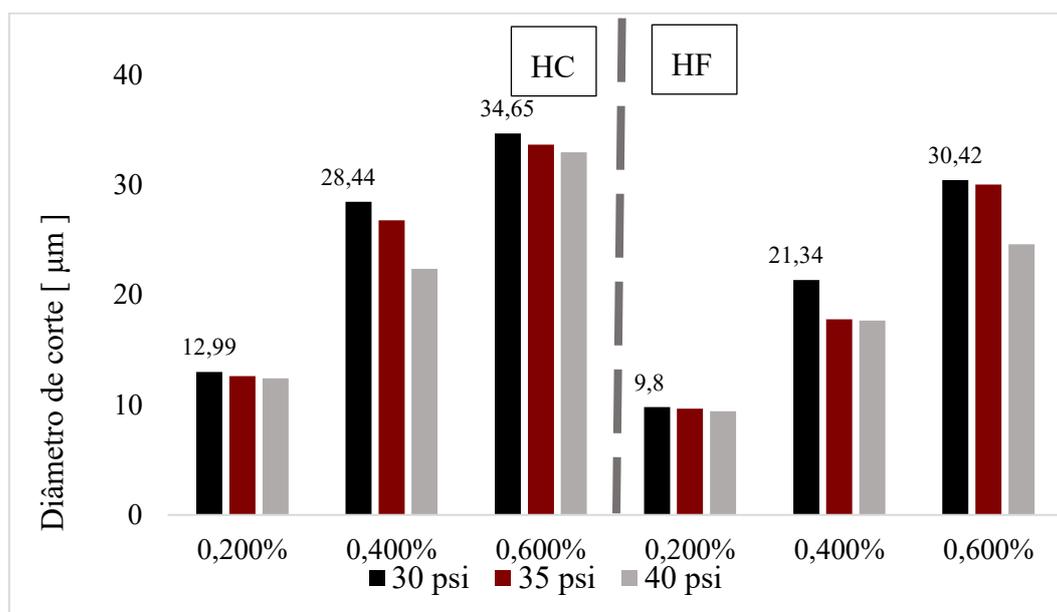


Figura 4.18 – Diâmetro de corte em função da concentração de CMC e da queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

Como esperado, o comportamento do  $d_{50}$  foi inverso ao observado na eficiência total, ou seja, houve um aumento dos diâmetros de corte à medida que a suspensão se tornou mais pseudoplástica e viscosa. O motivo desse comportamento também é um reflexo da perda de intensidade do campo centrífugo do equipamento. O campo centrífugo é responsável pelo direcionamento do material particulado para às paredes do equipamento e, conseqüentemente, ao vórtice externo para ser coletado no *underflow*. Tal

hipótese pode ser estendida para o diâmetro de corte reduzido visto que tanto  $d_{50}$  e  $d_{50}'$  possuem comportamento semelhante.

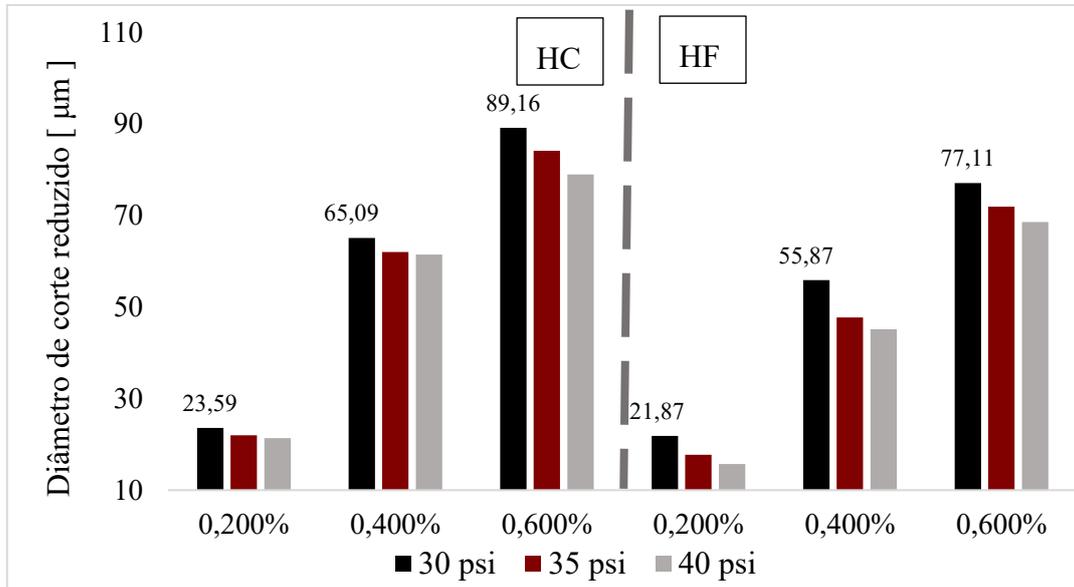


Figura 4.19 – Diâmetro de corte reduzido em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

#### 4.3.5 Vazão de Filtrado

Na Figura 4.20 mostra-se o impacto da reologia da suspensão sobre a operação de filtração no HF. Nota-se que a vazão mássica de filtrado ( $W_F$ ) assume um comportamento descendente à medida que a suspensão se tornou mais viscosa e pseudoplástica. O desenvolvimento matemático para a caracterização do cone filtrante, disponibilizado no Apêndice B, auxilia na compreensão desse fenômeno. Foi mostrado no Apêndice B que incrementos na viscosidade da suspensão tendem a diminuir a vazão de filtrado para uma mesma queda de pressão. A perda da operação de filtração pode fazer com que os equipamentos convencional e filtrante operem de maneira semelhante (como visto no caso das respostas  $Eu$  e  $C_{VU}$ ) por, provavelmente, equalizar os perfis de velocidade da suspensão em seu interior. Entretanto, tal constatação só poderia ser comprovada com técnicas de CFD.

Foi observado que incrementos na queda de pressão não impactaram de maneira significativa a vazão mássica de filtrado. Acredita-se que as quedas de pressão propostas nesse trabalho não foram intensas o suficiente a ponto de superar o efeito supressor que a viscosidade da suspensão impôs sobre a movimentação da suspensão.

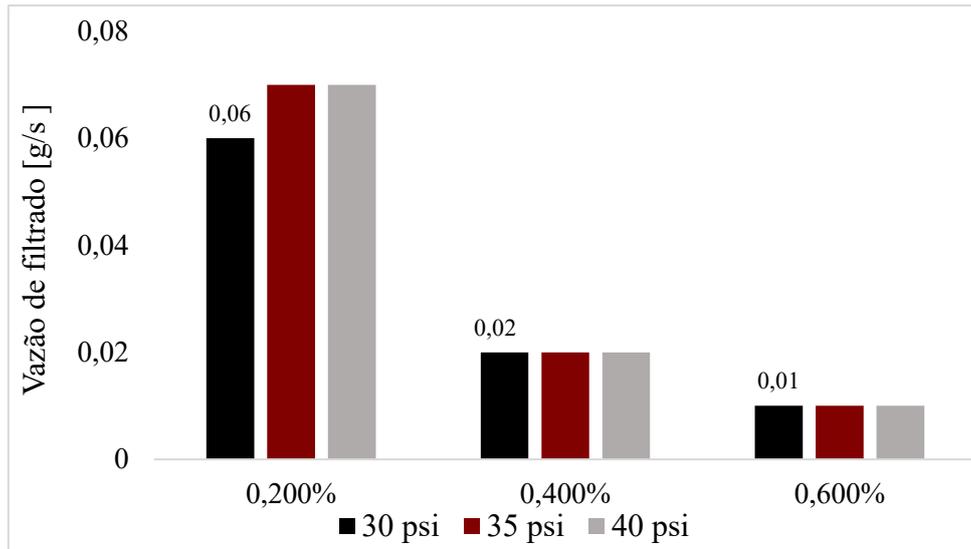


Figura 4.20 – Vazão mássica de filtrado em função da concentração de CMC e queda de pressão para concentração volumétrica de sólidos de 1,000%.

#### 4.4 EQUAÇÕES DE DESEMPENHO E SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

Com o intuito de representar matematicamente os resultados obtidos neste estudo, realizaram-se regressões múltiplas para os dois equipamentos estudados. Foram analisadas as seguintes respostas: Vazão de alimentação ( $Q_A$ ), número de Euler ( $Eu$ ), concentração volumétrica de sólidos no *underflow* ( $C_{VU}$ ), razão de líquido ( $RL$ ), eficiência total ( $\eta$ ), eficiência total reduzida ( $\eta'$ ), diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e diâmetro de corte reduzido ( $d_{50}'$ ).

As regressões estão expressas de forma matricial de acordo com a Equação 4.2. Nessa equação,  $Y$  é a resposta de interesse,  $X$  é a matriz com os fatores estudados ( $X1 = C_{CMC}$ ,  $X2 = C_{CVA}$ ,  $X3 = -AP$ ),  $b_0$  é o coeficiente linear,  $b$  é a matriz com os coeficientes lineares da regressão e  $B$  é a matriz detentora dos coeficientes quadráticos (diagonal principal) e de interação entre as variáveis de estudo (triângulo superior/inferior), destacando-se que a matriz  $B$  é simétrica em relação à diagonal principal. É importante mencionar que as equações de desempenho foram ajustadas com um nível de significância de 10%.

De posse das equações de regressão, serão apresentadas as superfícies de respostas geradas por elas. As superfícies geradas apresentadas mostram a interação do par  $X1$ - $X2$  (efeito provocado pela reologia e efeito provocado pela concentração volumétrica de sólidos) a uma queda de pressão de 30 psi.

$$Y = b_0 + X^T b + X^T B X \quad (4.2)$$

$$\text{Sendo: } X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \text{ e } B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & b_{13}/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & b_{23}/2 \\ b_{31}/2 & b_{32}/2 & b_{33} \end{bmatrix}.$$

#### 4.4.1 Hidrociclone Convencional (HC) e Hidrociclone Filtrante (HF)

As equações 4.3 a 4.18 referem-se a algumas respostas de interesse da operação de hidrociclonagem. Serão apresentadas diversas equações que descrevem a capacidade de processamento, a capacidade espessante, a eficiência e diâmetros de corte dos equipamentos convencional e filtrante utilizados nesta pesquisa.

As equações 4.3 e 4.4 refere-se à vazão de alimentação do equipamento convencional e filtrante, respectivamente.

$$Q_{A\_HC} = 438,98 + X^T \begin{bmatrix} +48,29 \\ +8,69 \\ +25,38 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -10,02 & 0 & 0 \\ 0 & -12,99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,97) \quad (4.3)$$

$$Q_{A\_HF} = 454,25 + X^T \begin{bmatrix} +43,88 \\ +11,36 \\ +26,84 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0,00 & -2,72 & +2,41 \\ -2,72 & -6,34 & 0,00 \\ +2,41 & 0,00 & -3,21 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.4)$$

Pela análise das equações acima, nota-se que a concentração mássica de viscosificante, concentração volumétrica de sólidos na alimentação e queda de pressão, têm efeito positivo sobre a vazão de alimentação para ambos os equipamentos. Entretanto, é importante lembrar que os dois primeiros apesar de aumentarem a vazão de alimentação podem diminuir a sedimentação centrífuga do equipamento, comprometendo o caráter coletor dos hidrociclones. Por outro lado, a queda de pressão favorece a vazão de alimentação e a sedimentação centrífuga, entretanto promove um incremento do consumo energético dos equipamentos. De posse dessas equações de desempenho foi possível obter as superfícies de respostas da vazão de alimentação para ambos os equipamentos (Figura 4.21).

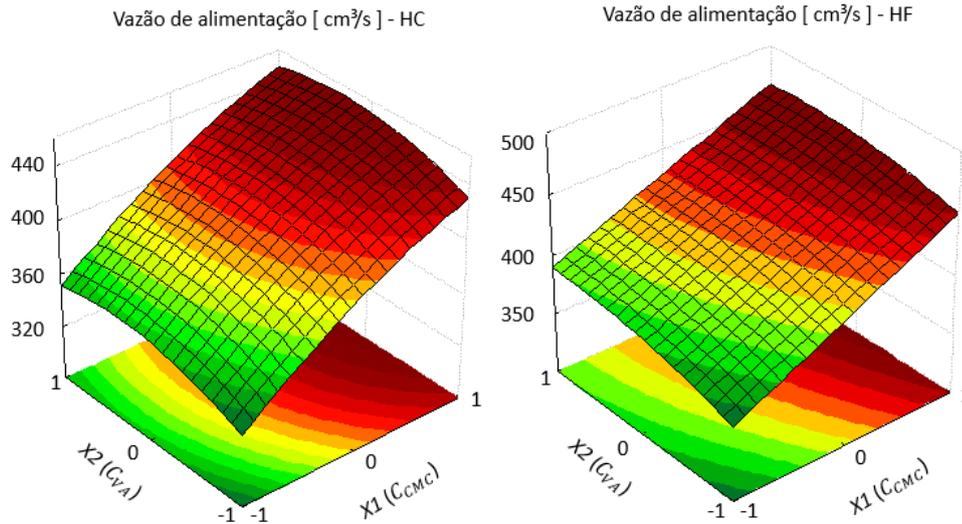


Figura 4.21 – Superfícies de resposta para  $Q_A$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

Em seguida são apresentadas as equações de desempenho para o número de Euler dos equipamentos convencional e filtrante (Equação 4.5 e Equação 4.6, respectivamente). A concentração de viscosificante e de sólidos agiram no sentido de diminuir o número de Euler, o que indica em um menor consumo energético por parte dos equipamentos. Novamente, é de grande importância lembrar que o aumento dessas variáveis ( $X1$  e  $X2$ ) acarretam uma perda da sedimentação centrífuga dos equipamentos. Por fim, na Figura 4.22 mostram-se as superfícies de resposta para o número de Euler dos equipamentos convencional e filtrante.

$$Eu_{HC} = 1245 + X^T \begin{bmatrix} -323 \\ -59 \\ +30 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +111 & 0 & 0 \\ 0 & +95 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,97) \quad (4.5)$$

$$Eu_{HF} = 1176 + X^T \begin{bmatrix} -244 \\ -66 \\ +28 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +46 & +31 & 0 \\ +31 & +34 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.6)$$

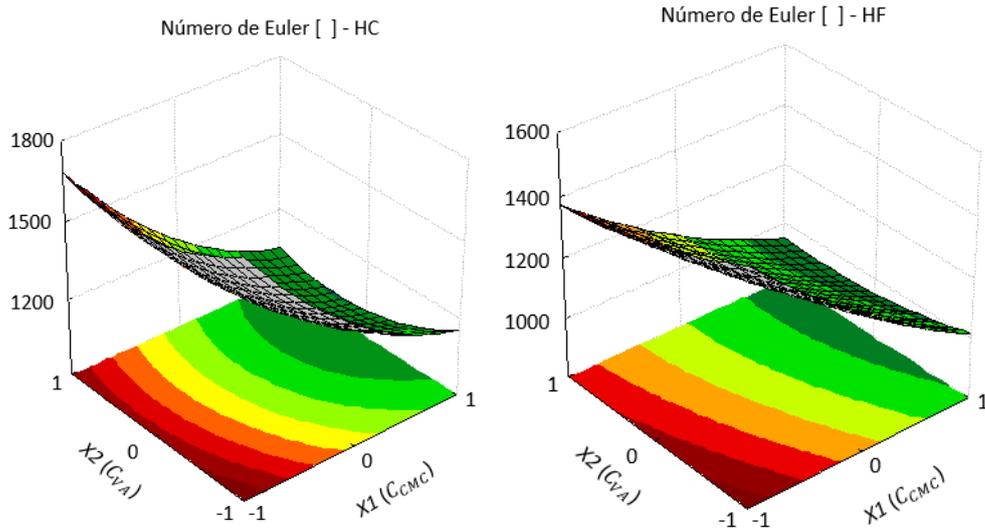


Figura 4.22 – Superfícies de resposta para o número de Euler dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

As equações 4.7 e 4.8 representam a concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* dos equipamentos convencional e filtrante, respectivamente. Nessas equações foi possível notar que a concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* aumentou de maneira significativa com o incremento na queda de pressão, pois houve um favorecimento da sedimentação centrífuga e um incremento no fluxo de material particulado em direção ao orifício de *underflow*. Observou-se que à medida que a suspensão se tornou mais viscosa pela adição do viscosificante a  $C_{VU}$  diminuiu. Como mencionado, a viscosidade da suspensão agiu no sentido de suprimir os movimentos espiralados diminuindo, então, a sedimentação centrífuga dos equipamentos. Na Figura 4.23 ilustram-se as superfícies de resposta para a  $C_{VU}$  dos equipamentos convencional e filtrante.

$$C_{VU\_HC} = 3,19 + X^T \begin{bmatrix} -0,73 \\ +1,55 \\ +0,07 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +0,10 & -0,37 & 0,00 \\ -0,37 & -0,23 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.7)$$

$$C_{VU\_HF} = 3,39 + X^T \begin{bmatrix} -0,79 \\ +1,67 \\ +0,09 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0,00 & -0,36 & 0,00 \\ -0,36 & -0,12 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.8)$$

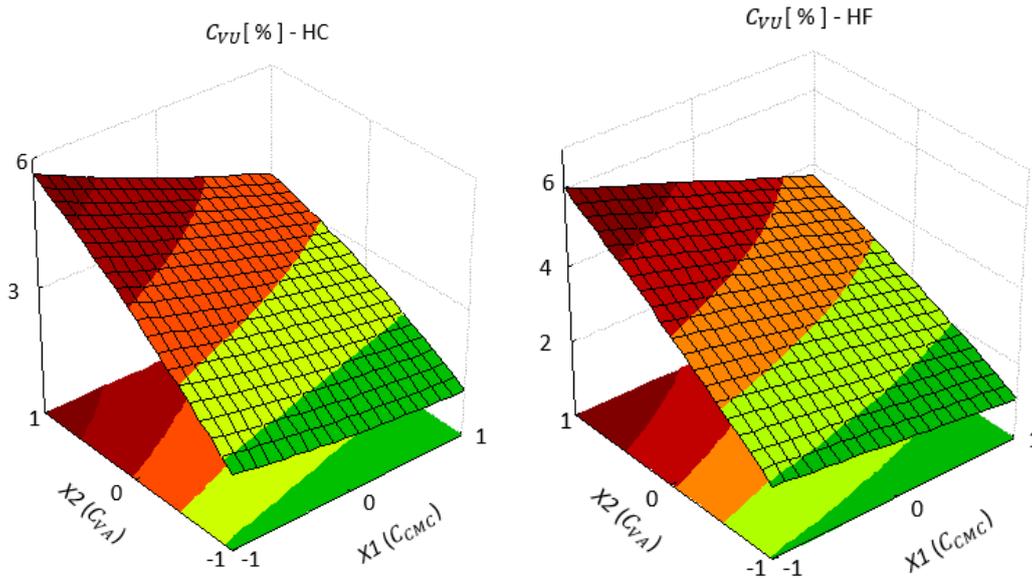


Figura 4.23 – Superfícies de resposta para  $C_{vu}$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

A razão de líquido junto a concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* auxilia na melhor compreensão do poder espessante dos equipamentos. As equações 4.9 e 4.10 representam as equações de desempenho da razão de líquido ( $RL$ ) para os equipamentos convencional e filtrante, respectivamente. O maior efeito que impactou a razão de líquido foi o provocado pela concentração mássica de viscosificante na suspensão, foi observado uma maior coleta de volume de material líquido à medida que a suspensão se tornou mais viscosa e teve seu caráter pseudoplástico mais evidenciado. Como proposto no trabalho de Wu *et al.* (2017) ao passo que a suspensão assumiu essas características a componente de velocidade axial descendente da suspensão se tornou mais pronunciada, o que pode justificar essa maior coleta de líquido. Por fim, na Figura 4.24 representam-se as superfícies de resposta para a razão de líquido dos equipamentos convencional e filtrante.

$$RL_{HC} = 40,04 + X^T \begin{bmatrix} +4,75 \\ 0,00 \\ -0,52 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,94) \quad (4.9)$$

$$RL_{HF} = 39,60 + X^T \begin{bmatrix} +4,38 \\ -0,63 \\ -0,55 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & -0,35 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,35 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,98) \quad (4.10)$$

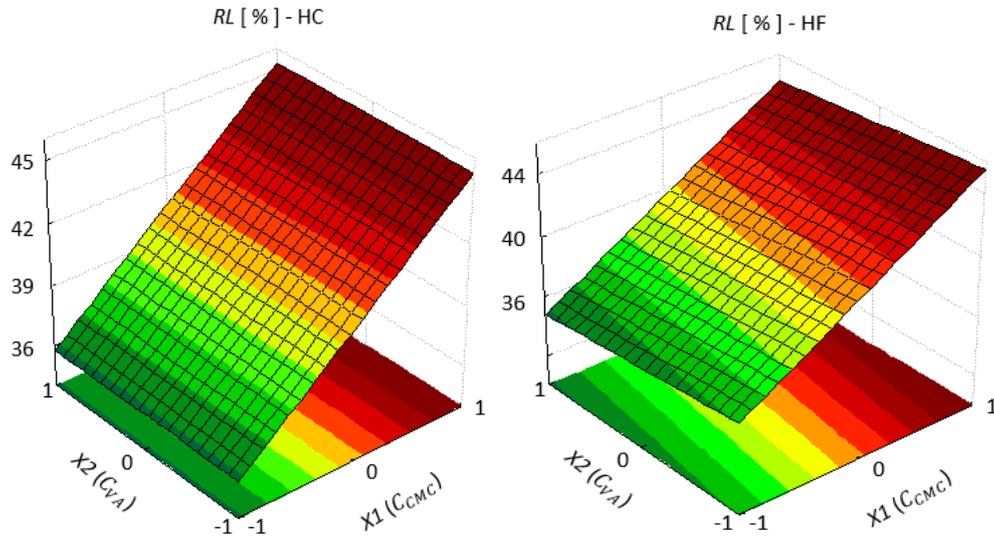


Figura 4.24 – Superfícies de resposta para a  $RL$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

As equações de desempenho para a eficiência total dos equipamentos convencional e filtrante são apresentadas nas equações 4.11 e 4.12, respectivamente. Para ambos os equipamentos, a eficiência total é fortemente impactada pela reologia da suspensão. Wu *et al.* (2017) chegaram a conclusão de que a componente de velocidade tangencial da suspensão diminui de maneira significativa ao passo que a suspensão se torna mais viscosa, fazendo com que a sedimentação centrífuga seja prejudicada, comprometendo a coleta de material particulado. Em adição, o aumento da concentração de sólidos também teve um efeito negativo, pois pôde ter feito com que houvesse uma redução da movimentação diferencial entre as partículas, o que provavelmente comprometeu a eficiência total de coleta dos equipamentos (DAVAILLES *et al.*, 2012). Por fim, na Figura 4.25 representam-se as superfícies de resposta para a eficiência total de coleta dos equipamentos convencional e filtrante.

$$\eta_{_HC} = 50,70 + X^T \begin{bmatrix} -7,43 \\ -0,79 \\ +0,63 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +4,64 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.11)$$

$$\eta_{_HF} = 53,68 + X^T \begin{bmatrix} -8,48 \\ -1,92 \\ +1,28 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +3,61 & 0,00 & -0,69 \\ 0,00 & 0,00 & -0,59 \\ -0,69 & -0,59 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.12)$$

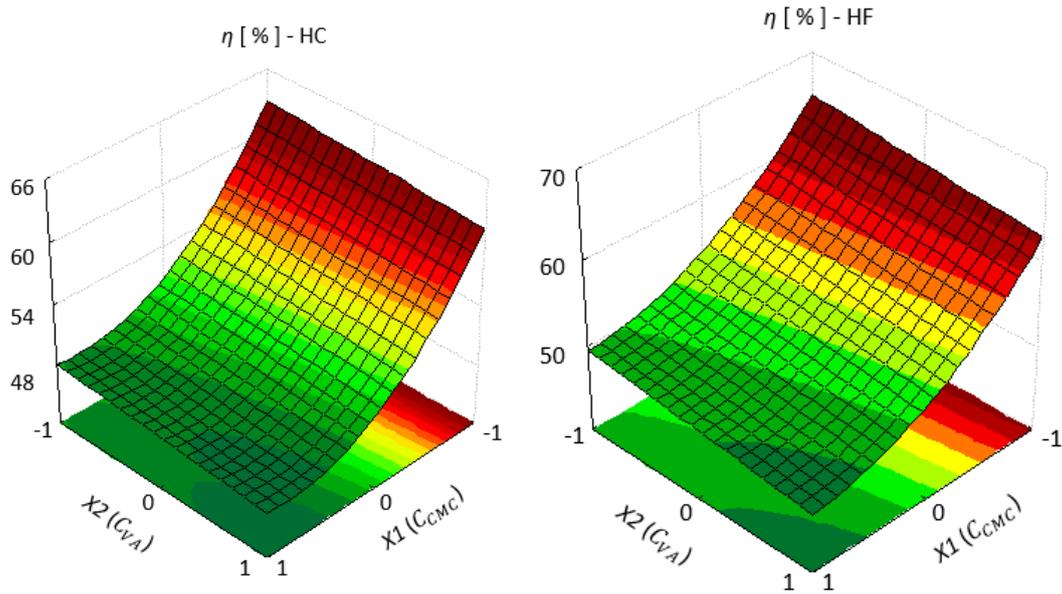


Figura 4.25 – Superfícies de resposta para  $\eta$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

As equações de desempenho da eficiência total reduzida dos equipamentos convencional e filtrante são representadas pelas equações 4.13 e 4.14, respectivamente. A eficiência total reduzida contabiliza apenas o material particulado que é coletado devido a ação centrífuga do hidrociclone. A viscosidade da suspensão e a concentração volumétrica de sólidos na alimentação impactaram de maneira significativa e negativa o desenvolvimento dos movimentos espiralados, o que contribuiu para uma perda da sedimentação centrífuga dos hidrociclones. Por fim, na Figura 4.26 são representadas as superfícies de resposta para as eficiências totais reduzidas para os equipamentos convencional e filtrante.

$$\eta'_{HC} = 18,89 + X^T \begin{bmatrix} -18,56 \\ -1,03 \\ +1,71 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +5,52 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -0,89 & -0,49 \\ 0,00 & -0,49 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.13)$$

$$\eta'_{HF} = 26,62 + X^T \begin{bmatrix} -19,36 \\ -2,40 \\ +2,77 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +4,44 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & +1,11 & -1,11 \\ 0,00 & -1,11 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.14)$$

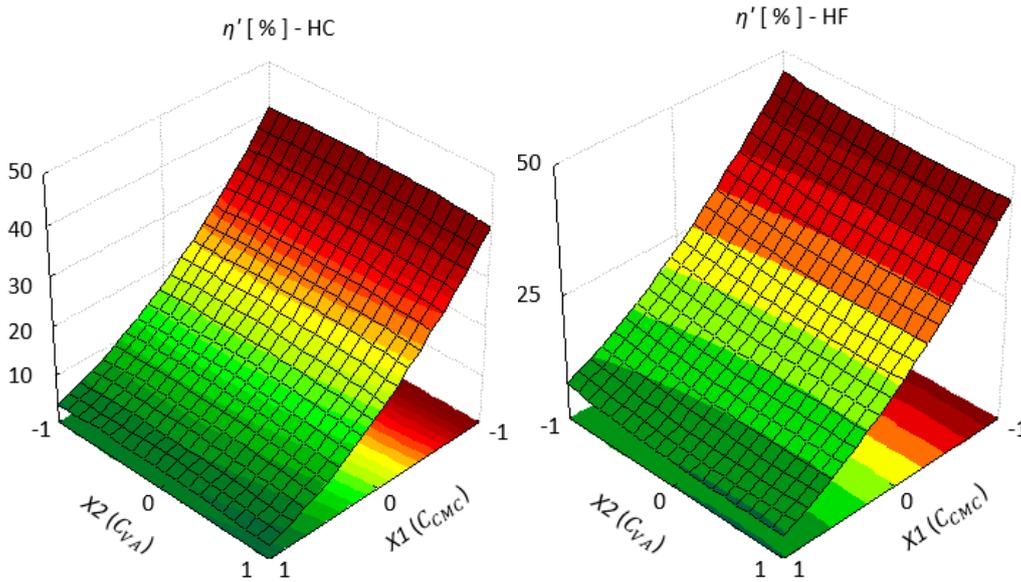


Figura 4.26 – Superfícies de resposta para  $\eta'$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

O diâmetro de corte dos equipamentos convencional e filtrante pôde ser descrito pelas equações 4.15 e 4.16, respectivamente. Assim como na eficiência total, o diâmetro de corte dos equipamentos se mostrou altamente dependente do comportamento reológico da suspensão e da concentração de sólidos. Ambos os efeitos atuaram no sentido de comprometer a sedimentação centrífuga, diminuindo a coleta de material fino (aumentando, então, o valor dessas respostas). Em adição, na Figura 4.27 apresentam-se as superfícies de resposta para o diâmetro de corte dos equipamentos utilizados.

$$d_{50\_HC} = 27,15 + X^T \begin{bmatrix} +12,72 \\ +2,38 \\ -2,09 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} -1,25 & +2,34 & -1,05 \\ +2,34 & 0,00 & 0,00 \\ -1,05 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.15)$$

$$d_{50\_HF} = 21,26 + X^T \begin{bmatrix} +12,45 \\ +3,50 \\ -1,94 \end{bmatrix} + X^T \begin{bmatrix} +2,05 & +2,64 & -0,97 \\ +2,64 & 0,00 & 0,00 \\ -0,97 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} X \quad (R^2 = 0,98) \quad (4.16)$$

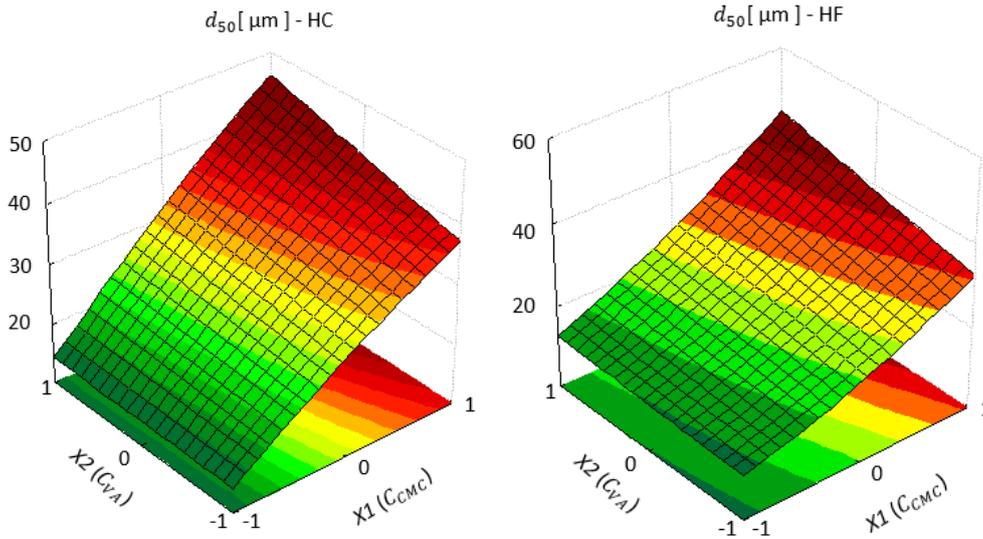


Figura 4.27 – Superfícies de resposta para  $d_{50}$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

Por fim, as equações 4.17 e 4.18 representam o diâmetro de corte reduzido dos equipamentos convencional e filtrante, respectivamente. Em adição, na Figura 4.28 são apresentadas as superfícies de resposta para essa variável resposta. O comportamento do diâmetro de corte reduzido é bastante semelhante ao do diâmetro de corte, desse modo é possível estender as justificativas do comportamento do  $d_{50}$  para o  $d_{50}'$ . Novamente, é importante lembrar que o diâmetro de corte reduzido se refere apenas ao material que tem 50% de chance de ser coletado no orifício de *underflow* devido a ação centrífuga do equipamento.

$$d_{50}'_{HC} = 65,06 + X^T \cdot \begin{bmatrix} +31,79 \\ +4,42 \\ -3,45 \end{bmatrix} + X^T \cdot \begin{bmatrix} -6,96 & +1,93 & -2,12 \\ +1,93 & 0 & 0 \\ -2,12 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.17)$$

$$d_{50}'_{HF} = 53,25 + X^T \cdot \begin{bmatrix} +28,39 \\ +4,40 \\ -3,32 \end{bmatrix} + X^T \cdot \begin{bmatrix} -2,42 & +1,35 & 0,00 \\ +1,35 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \cdot X \quad (R^2 = 0,99) \quad (4.18)$$

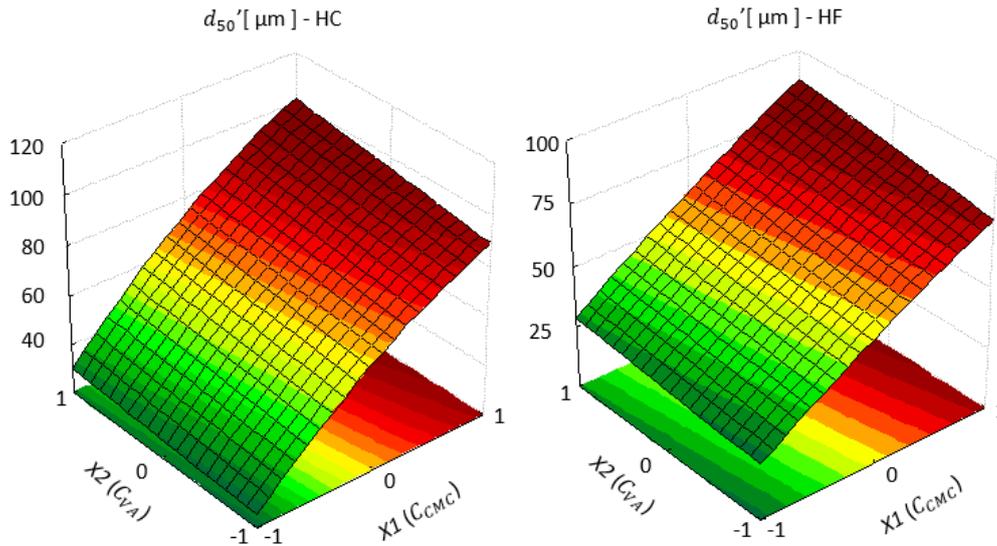


Figura 4.28 – Superfícies de resposta para  $d_{50}'$  dos hidrociclones convencional e filtrante segundo o par  $X1$ - $X2$ , mantendo uma queda de pressão fixa de 30 psi.

#### 4.5 CURVAS DE EFICIÊNCIA

Caso exista o interesse em se trabalhar com outros materiais particulados cuja distribuição granulométrica difira da proposta nesse estudo, mas que possuam uma massa específica semelhante da rocha fosfática usada deste trabalho. Aconselha-se que seja feita a análise das curvas de eficiência apresentadas nessa seção. É importante lembrar que a reologia da suspensão é impactada de maneira significativa pela granulometria do material, desse modo alerta-se que as curvas de eficiência propostas nessa pesquisa devam ser consultadas para se obter estimativas de eficiência. Os eixos das abcissas dessas curvas retratam a relação  $d_{63,2}/d_{50}'$ , sendo  $d_{63,2}$  o parâmetro obtido para ajuste granulométrico do novo material proposto segundo modelo granulométrico RRB, e  $d_{50}'$  o diâmetro de corte reduzido obtido experimentalmente nos experimentos realizados nesta dissertação. A criação dessas curvas de eficiência segue a metodologia apresentada no Apêndice E.

Nas figuras 4.29 e 4.30 são apresentadas curvas de eficiência que se referem aos equipamentos convencional e filtrante, respectivamente. Essas curvas de eficiência são referentes ao experimento de número 1 (como apresentado no planejamento de experimentos). Mais curvas de eficiência são apresentadas no Apêndice E. Em cada uma das figuras são mostradas cinco curvas de eficiência, cada uma delas foi gerada para um valor pressuposto do parâmetro  $N$ , sendo este parâmetro obtido pelo ajuste do modelo granulométrico RRB do novo material hipotético utilizado. Pela análise das curvas de

eficiência observa-se que é possível alcançar maiores valores de eficiência à medida que o material se torna mais grosso.

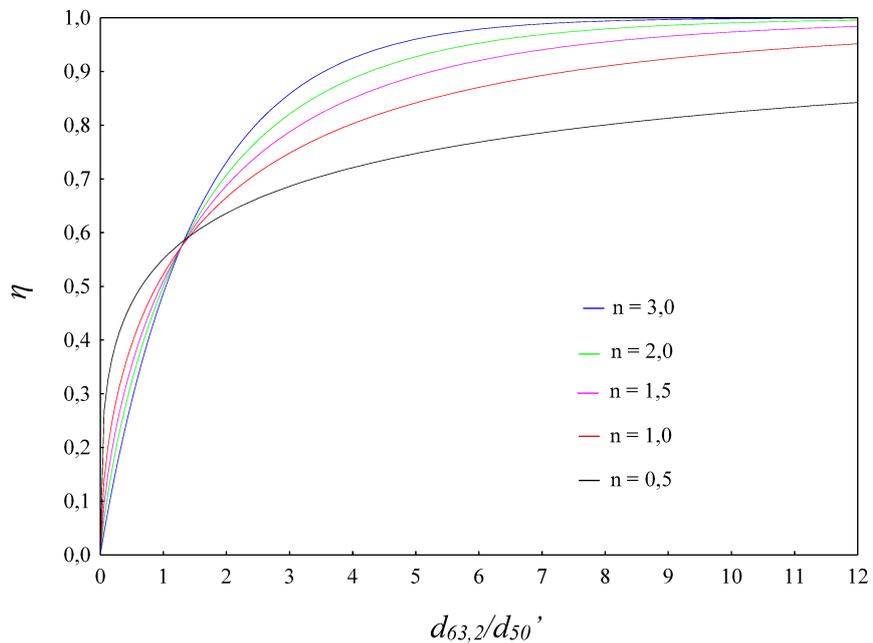


Figura 4.29 – Curva de eficiência do experimento de número 1 do HC.

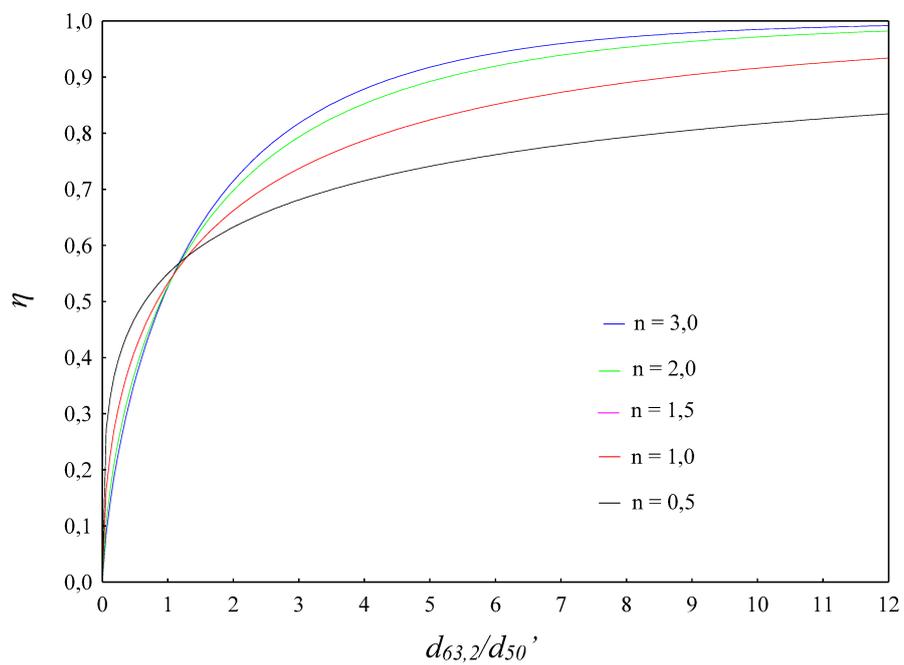


Figura 4.30 – Curva de eficiência do experimento de número 1 do HF.

### 5. CONCLUSÃO

Neste capítulo final são apresentadas as principais conclusões deste estudo. Além disso, apresentam-se sugestões de trabalhos futuros que podem enriquecer as discussões sobre hidrociclonagem envolvendo tanto o equipamento convencional quanto o filtrante utilizando suspensões não-newtonianas e concentradas.

#### 5.1 CONCLUSÕES

Os estudos investigativos sobre o efeito provocado pelo caráter reológico da suspensão e a concentração de sólidos alimentada ao hidrociclone são uma contribuição importante, visto que vários processos industriais que envolvem o hidrociclone trabalham com misturas que se distanciam do caráter newtoniano e diluído. A partir do planejamento experimental proposto, foi possível concluir que a reologia do fluido e a concentração volumétrica de sólidos alimentada exercem influência significativa sobre as respostas de hidrociclonagem. Além disso, foi possível observar vantagens ao associar a filtração com a hidrociclonagem mesmo utilizando uma suspensão não-newtoniana, visto que algumas respostas de interesse mudaram significativamente. Assim, listam-se as conclusões deste trabalho:

- para mesmas condições experimentais, na grande maioria das vezes o hidrociclone filtrante (HF) possuiu maior capacidade de processamento que o hidrociclone convencional (HC), mesmo quando operados com suspensão não-newtoniana e concentrada;
- incrementos em  $C_{VA}$  provocaram um efeito não-linear sobre a vazão de alimentação no HC devido à interação das partículas com as paredes do equipamento. Esse comportamento não-linear não foi observado no HF, o que levantou a possibilidade de o HF ser mais flexível para a operar com maiores concentrações de partículas;
- a adição de viscosificante fez com que a suspensão se tornasse mais viscosa e pseudoplástica, e isso aumentou a vazão de alimentação tanto para o HC quanto para o HF;
- como consequência de o HF ser operado com maiores vazões, esse equipamento atingiu menores números de Euler (em média, cerca de 12% menor), o que

comprovou que o equipamento filtrante tem um consumo energético menor do que o HC mesmo operado com suspensões viscosas e concentradas;

- à medida que a suspensão se tornou mais pseudoplástica e mais viscosa, observou-se uma redução do caráter espessante dos equipamentos, pois a adição do viscosificante fez com que a razão de líquido aumentasse e a concentração de sólidos na corrente de *underflow* diminuísse. Entretanto, vale ressaltar que nem o HC nem o HF são equipamentos espessantes, pois ambos são geometricamente inspirados no HGOT1 (equipamento otimizado para alta eficiência e não para concentrar a corrente de *underflow*);
- na maioria das condições experimentais avaliadas, o HF teve uma corrente de *underflow* mais concentrada de sólidos do que o HC;
- a diferença da  $C_{VU}$  entre o HC e o HF foi menor nas condições de escoamento mais viscoso do que nas condições de menor viscosidade aparente da suspensão;
- diminuindo-se o índice de comportamento do fluido e aumentando a viscosidade da suspensão, a operação de filtração foi prejudicada;
- o equipamento filtrante possuiu, na maioria das situações, valores de eficiência total ( $\eta$ ) superiores ao HC (em média, cerca de 4% maior);
- a adição constante de viscosificante fez com que as eficiências total e total reduzida dos equipamentos fossem diminuídas;
- a constante adição de material particulado à suspensão diminuiu a eficiência total e total reduzida;
- o HF forneceu diâmetros de corte menores do que o HC;
- o efeito da adição do viscosificante sobre o  $d_{50}$  foi no sentido de aumentar esta variável;
- o aumento da concentração volumétrica de material sólido também aumentou o diâmetro de corte.

## 5.2 SUGESTÕES

Com o intuito de enriquecer os estudos sobre a associação da operação de filtração com a hidrociclonagem quando se opera com suspensão não-newtoniana e concentrada, sugerem-se os seguintes trabalhos:

- utilizar técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para compreender melhor os perfis das componentes de velocidade dentro dos equipamentos;

## CONCLUSÕES

---

- levantar estudos comparativos entre o hidrociclone cone filtrante, o hidrociclone cilindro filtrante e o hidrociclone cone cilindro filtrante;
- estudar o efeito da permeabilidade do contorno filtrante;
- avaliar o efeito das variáveis geométricas sobre a operação de hidrociclonagem dos equipamentos convencionais e filtrantes, e realizar um procedimento de otimização para se obter equipamentos geometricamente otimizados.

## REFERÊNCIAS

---

### REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. A. K. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008.

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

ASCENDINO, G. G. **Caracterização de hidrociclones cilíndrico-filtrantes otimizados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

BERGSTRÖM, J.; VOMHOFF, H. Experimental hydrocyclone flow field studies, **Separation and Purification Technology**, v. 53, p. 8-20, 2006. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.09.019>>.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, N. E., **Transport Phenomena**, 2 ed, Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2004.

BOGER, D.V. Demonstration of upper and lower Newtonian fluid Behaviour in a pseudoplastic fluid. **Nature**, v. 265, p. 126-128, 1977. Disponível em: < <https://doi.org/10.1038/265126a0> >.

BRADLEY, D. **The Hydrocyclone**, 1 ed, Londres, Reino Unido: Pergamon Press Ltd, 1965.

BRADLEY, D.; PULLING, D. J. Flow Patterns in the hydraulic cyclone. **Trans. Inst. Chem. Eng.**, v.37, p. 34-45, 1958.

CARREAU, P.J., Rheological equations from molecular network theories. **Journal of Rheology**, v. 16, p. 99-127, 1972. Disponível em: < <https://doi.org/10.1122/1.549276> >.

CARETTO, L. S.; GOSMAN, A. D.; PATANKAR, S. V.; SPALDING, D.B., Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows with Recirculation,

## REFERÊNCIAS

---

**Proceedings 3d Int. Conf. Num. Methods Fluid Dyn.**, v.2, p. 60, 1972. Disponível: <<https://doi.org/10.1007/BFb0112677>>.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow and applied rheology**, 2 ed, Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2008.

CROSS, M. M. Rheology of Non-Newtonian fluids – A new equation for pseudoplastic systems. **Jornal of Colloid Science**, v.20 p. 417-437, 1965. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0095-8522\(65\)90022-X](https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90022-X)>.

CRUZ, O. C. **Desempenho de um hidrociclone de geometria "Rietema" como pré-filtro para sistemas de irrigação**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, SP, 2008.

DARBY, R. **Chemical Engineering Fluid Mechanics**, 2 ed, Nova York, Estados Unidos: Taylor & Francis, 2001.

DAVAILLES, A.; CLIMENT, E.; BOURGEOIS, F.; MAJUNDER, A. K. Analysis of swirling flow in hydrocyclones operating under dense regime. **Minerals Engineering**, v. 31, p. 32-41, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.012>>.

DRIESSEN, M. G. A new process in the washing of Coal. **Rev. Univ. Min.**, v. 5, p. 93-177, 1939.

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

FLUENT INC. **Fluent 2019 R2 User's Guide**, Disponível em <<https://www.ansys.com/academic/free-student-products> acessado em 01/11/2019>.

GHODRAT, M.; QI, Z.; KAUNG, S. B.; JI, L.; YU, A. B. Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flow and performance of hydrocyclone, **Minerals Engineering**, v. 90, p. 55-69, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.03.017>>.

## REFERÊNCIAS

---

GONÇALVES, S. M., **Separação sólido-fluido em hidrociclones otimizados empregando sistemas concentrados e não-newtoniano**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

HE, Y. B.; LASKOWSKI, J. S.; KLEIN, B.; Particle movement in non-Newtonian slurries: the effect of yield stress on dense medium separation, **Chem. Eng. Sci.**, v.56, p. 2991-2998, 2001. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00479-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00479-6) >.

HEISKANEN, K. **Particle Classification**. 1 ed, Londres, Reino Unido: Chapman & Hall, Londres, 1993.

HOFFMAN, A. C.; SKORPEN, A.; CHANG, Y. Positron emission particle tracking and CFD investigation of hydrocyclones acting on liquids of varying viscosity. **Chemical Engineering Science**, v. 200, p. 310-319, 2019. Disponível: < <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.01.061> >.

HSIEH, K. T. **Phenomenological model of the hydrocyclone**, Tese (Doutorado), Universidade de Utah, 1988.

JIANG, L; LIU, P.; YANG, X.; ZHANG, Y.; WANG, H.; XU, C. Numerical analysis of flow field and separation characteristics in hydrocyclone with adjustable apex. **Powder Technology**, v. 356, p. 941-956, 2019. Disponível em:< <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.020> >.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K.; EISELE, T. C. An on-line pressure vessel rheometer for slurries. **Powder Technology**, v. 105, p. 418-423, 1999. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00167-9) >.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K.; RUSESKEY, M. T. Effect of Viscosity on The Cut (d50) Size of Hydrocyclone Classifiers. **Minerals Engineering**, v. 9, n. 8, p. 881–891, 1996. 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. **Int. J. Miner. Process**, 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)>.

## REFERÊNCIAS

---

KELSALL, D. A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone. **Trans.Inst. Chem. Eng.**, v. 30, p. 87-108, 1952.

KNOWLES, S. R.; WOODS, D. R.; FEUERSTEIN, I. A. The velocity distribution within a hydrocyclone operating without an air-core. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 51, p. 263-271, 1973. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/cjce.5450510301>>.

KYRIAKIDIS, Y. N.; VIEIRA, L. G. M. **Comportamento Fluidodinâmico de um Hidrociclone em face do Movimento Angular do Fluido no Duto de Alimentação**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2010, Foz do Iguaçu, Paraná, p.8337-8346, 2010.

KYRIAKIDIS, Y. N. **Análise do Efeito de Variáveis Geométricas sobre o Desempenho de Hidrociclones Otimizados**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

KYRIAKIDIS, Y. N. **Otimização Geométrica de Hidrociclones a partir de um histórico em hidrociclonação na FEQUI/UFU**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2018.

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

LI, S.; LIU, Z.; CHANG, Y.; LI, J.; HU, J.; S, Q.; WANG, H. Removal of coke powders in coking wastewater using a hydrocyclone optimized by n-value. **Science of the Total Environment**, v. 752, 141887, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141887>>.

LI, S.; ZHANG, H.; YANG, H.; YANG, S.; LU, J.; YUE, G. Determining Cyclone Particle Holdup by Pressure Drop for a CFB Boiler. **Chemical Engineering Technology**, v. 30, p. 1726-1731, 2007. Disponível em: <10.1002/ceat.200700270>.

MA, J. M. *Sc Thesis*, ECUST China, 2009.

## REFERÊNCIAS

---

MACHACA, Y. Y. C. **Modelagem da classificação de polpas de bauxita e de fosfato em hidrociclones**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2 ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. In: **Anais do XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos**, São Carlos, p 125-136, 1989.

MEIER, H.F. **Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.

MOGNON, J. L.; SILVA J. M.; BICALHO, I. C.; ATAÍDE, C. H., Mini-hydrocyclones applied to the removal of solids from non-Newtonian fluids and analysis of scale-up effect. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v.146, p. 255-263, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.04.034> >.

MOGNON, J. L.; SILVA, J., M. DA; BICALHO, I. C.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R. Modular mini-hydrocyclone destiler type of 30mm: 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>>.

MORGAN, M. C. **Drilling Fluids Processing Handbook**. 1 ed. Houston, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2004.

MOREIRA, B. A. **Estudo da sedimentação em suspensões de fluido com características reológicas pseudoplásticas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

MURPHY, S.; DELFOS, R.; POURQUIÉ, M. J. B. M.; OLUJIC, Ž.; JANSSENS, P. J.; NIEUWSTADT, F. T. M. Prediction of strongly swirling flow within an axial

## REFERÊNCIAS

---

hydrocyclone using two commercial CFD codes. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 6, p. 1619-1635, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.10.031> >.

ORTEGA-RIVAS E., SVAROVSKY, L., Generalized Stokes Number for modeling settling of non-Newtonian slurries in dynamic separators. **Advanced Powder Technology**, v. 9, 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) >.

PADHI, M.; MANGADODDY, N.; SREENIVAS, T.; VAKAMALLA, T. R.; MAINZA, A. N.; Study on multi-component particle behaviour in a hydrocyclone classifier using experimental and computational fluid dynamics techniques. **Separation and Purification Technology**, v. 229, 115698, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115698>>.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Nova York, Estados Unidos: Ed. Hemisphere Pub. Co., 1980.

PEREIRA, F. A. R. **Escoamento laminar de líquidos Não-Newtonianos em seções anulares: Estudos de CFD e abordagem experimental**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2010.

ROCHA, S. M. S.; VIEIRA, L. G. M. Experimental Determination of the Permeability of Non-Porous Planar Structures during Operation of Equipment in Own Industrial Unit. **Materials Science Forum**, v. 727-728, p. 1836–1841, 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.1836> >.

SALVADOR, F. F. **Estudo Experimental do Comportamento de um Hidrociclone com Cone e Cilindro Filtrantes**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2013.

## REFERÊNCIAS

---

SALVADOR, F. F. **Otimização Geométrica de Hidrociclones com Cilindros e cones Permeáveis**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.

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: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322013000400010>>.

SILVA, D. O. **Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

SILVA, N. K. G. **Estudo de Otimização da Configuração do Hidrociclone Filtrante**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

SOUZA, F. J. **Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1999.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclone**. Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, Reino Unido, 1984.

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

SZORCSIK, A.; NAGY, L.; SCOPELLITI, M.; PELLERITO, L.; SIPOS, P. Characterization of complexes formed between  $[\text{Me}_2\text{Sn}(\text{IV})]^{2+}$  and carboxymethylcelluloses. **Carbohydrate Research**, v. 341, p. 2083-2089, 2006. Disponível em: <[doi:10.1016/j.carres.2006.05.012](https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.05.012)>.

ULLMANN, G. **Efeito de múltiplas entradas no desempenho do hidrociclone HGOT1**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

## REFERÊNCIAS

---

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

VAKAMALLA, T. R.; KORUPROLU, V. B.; ARUGONDA, R.; MANGADODDY, N. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model. **Separation and Purification Technology**, v. 175, p. 281-497, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.026> >.

VAKAMALLA, T. T.; MANGADODDY, N., Rheology-based CFD modeling of magnetite medium segregation in a dense medium cyclone. **Powder Technology**, v. 277, p. 275-286, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.025> >.

VEGA-GARCIA, D., BRITO-PARADA, P. R., CILLIERS, J. J., Optimising small hydrocyclone desing using 3D printing and CFD simulations. **Chemical Engineering Journal**, v. 350, p. 653-659, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.016> >.

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

VIEIRA, L. G. M. **Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2001.

VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.

VIEIRA, L. G. M.; SILVA, D. O.; BARROZO, M. A. S. Study of the Performance of a Novel Hydrocyclone Built in the Configurations of the Classical Families. **Separation**

## REFERÊNCIAS

---

Science and Technology, v. 48, p. 2700-2706, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.803485>>.

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.; 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: < [://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.016](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. **Chem. Eng. J.**, v. 135, p. 33-42, 2008. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.009> >.

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, Y. X.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; YANG, X.; WANG, H. Effect of shear stress on deoiling of oil-contaminated catalysis in a hydrocyclone. **Chemical Engineering Technology**, v. 39, No. 3, p. 567-575, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/ceat.201500378> >.

YANG, L.; TIAN, J.; YANG, Z.; 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> >.

YE, J.; XU, Y.; SONG, X.; YU, J. Novel conical section design for ultra-fine particles classification by a hydrocyclone. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 144, p. 135-149, 2019a. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.02.006> >.

YE, J.; XU, Y.; SONG, X.; YU, J. Numerical modelling and multi-objective optimization of novel hydrocyclone for ultra-fine particles classification. **Chemical Engineering**

## REFERÊNCIAS

---

**Science**, v. 207, p. 1072-1084, 2019b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.031>>.

YOSHIOKA, N.; HOTTA, Y., Liquid cyclone as a hydraulic classifier. **Chemical Engineering Japan**, Vol. 19, p. 633-641, 1955. Disponível em: <<https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu1953.19.632>>.

ZHOU, C.; WANG, S.; YANG, C.; XU, L. Study on particle-size control of hydrocyclone for slurry recycles. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 151, conference 1, 2018. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/151/1/012024/meta>>.

## APÊNDICE A: FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Como mencionado, o intuito da simulação computacional deste trabalho foi, unicamente, a simulação 3D do hidrociclone filtrante (HF). Foi ignorado o caráter não-newtoniano da suspensão e a concentração de sólidos alimentada. Portanto, a simulação foi conduzida utilizando apenas uma fase, ou seja, apenas água foi utilizada como fluido de trabalho. Os resultados apresentados são promissores, ressaltando-se que são os primeiros dados obtidos envolvendo o hidrociclone filtrante de forma 3D. Esses dados podem auxiliar futuras pesquisas a investigar esse equipamento desenvolvido pela FEQUI/UFU. Nessa simulação foi utilizado o *software Fluent* 2019 R2, em versão acadêmica. O computador utilizado nesse trabalho contou com: sistema operacional Windows 10 Pro 64 bits com processador Intel® Xeon®, 2 processadores 2.10 GHz e memória RAM de 32 GB.

As Equações de Transporte foram resolvidas numericamente pelo método dos volumes finitos empregando uma abordagem Euleriana. A malha computacional do equipamento HF é apresentada na Figura A.1, essa malha foi criada com o auxílio do *software Gambit* 2.3.16 e foi construída totalmente com elementos hexaédricos, tendo num total 94830 unidades desses elementos.

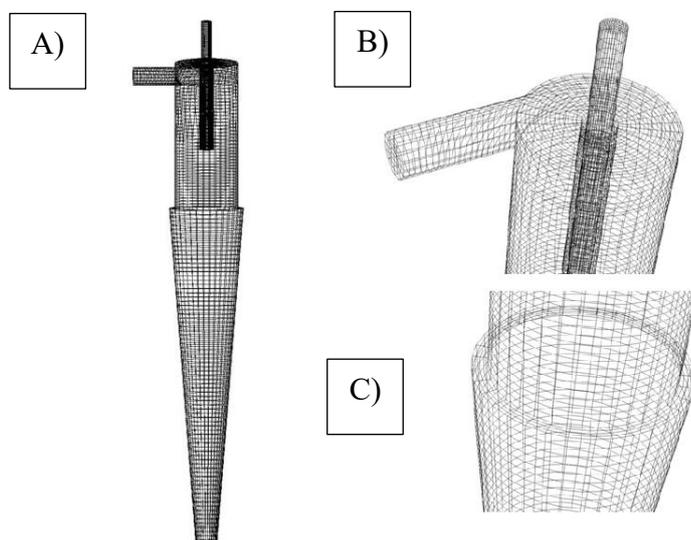


Figura A.1 – Detalhes da malha computacional. A) malha do equipamento; B) detalhe da região superior do equipamento e C) detalhe do filtro.

Optou-se por caracterizar o contorno da alimentação do equipamento como “*Velocity inlet*”. Por outro lado, todas as condições de saída (filtro, *underflow* e *overflow*) foram selecionadas como “*Pressure outlet*” tendo uma pressão relativa de 0 Pa. Por fim,

## APÊNDICE A

foi selecionado a condição de não deslizamento (*no slip*) para a caracterização das paredes do equipamento.

Inicialmente a simulação foi conduzida com um *time step* de  $1.10^{-10}$  s e com critério de convergência de  $1.10^{-5}$ . Uma vez que os resíduos atingiram um comportamento estável, o *time step* foi aumentado em 10 vezes. Esse procedimento foi feito até o *time step* atingir o valor de  $1.10^{-6}$  s. Em resumo, na Tabela A.1 apresentam-se as condições de contorno e a abordagem computacional utilizada.

Tabela A.1 – Resumo da estratégia computacional utilizada para a simulação do HF.

Dado	Condição
Condições de contorno	Entrada: <i>Velocity inlet</i> Velocidade: 6,75 m/s
	<i>Underflow: Pressure outlet</i> Pressão relativa: 0 Pa
	<i>Overflow: Pressure outlet</i> Pressão relativa: 0 Pa
	Filtro: <i>Pressure outlet</i> Pressão relativa: 0 Pa
	Parede: Não deslizamento ( <i>no slip</i> )
Gravidade	9,81 m/s <sup>2</sup>
Modelo de turbulência	LES: WMLES-OMEGA
Resistência viscosa do filtro	$6,2204.10^{15}$ m <sup>-2</sup>
Resistencia inercial do filtro	$3,3963.10^9$
Porosidade do filtro	3,52%
Acoplamento da pressão com a velocidade	SIMPLE
Discretização espacial	Gradiente: <i>Least Squares Cell Based</i>
	Pressão: PRESTO!
	Momento: <i>Bounded Central Differential</i>
Formulação transiente	<i>Bounded second order implicit</i>
Fatores de relaxamento	Pressão e Momento: 0,3 Densidade e Body forces: 1,0

## APÊNDICE A

O meio poroso pode ser caracterizado computacionalmente seguindo duas metodologias. A primeira delas, chamada de *porous jump*, consiste em considerar que todo o filtro é uma fina membrana (ANSYS INC, 2012). Essa metodologia considera que um aglomerado de faces de arestas adjacentes faz o papel do filtro. Essa abordagem requer que existam volumes de células tanto a montante quanto a jusante da matriz porosa. A segunda abordagem (usada nesta pesquisa), consiste em caracterizar um volume de células como uma matriz porosa, tendo como vantagem não haver a necessidade da existência de células a jusante do filtro.

Mesmo que a simulação tenha sido feita somente com água como fluido de operação, a abordagem computacional apresenta resultados relevantes. São apresentados os primeiros resultados que envolvem a simulação tridimensional e em estado transiente de um hidrociclone filtrante. Apesar de não apresentar o estudo referente à independência de malha (devido ao limitado recurso computacional e ao fato de que o tempo de simulação extrapolou o tempo disponível para a defesa), esses resultados podem vir a contribuir para futuros trabalhos que envolvam o hidrociclone filtrante.

A seguir são apresentados resultados da simulação envolvendo o hidrociclone filtrante. A condição simulada foi o ensaio hidrodinâmico proposto na seção 4.1.2. Foi simulado um tempo de processo de 1,2 s, que durou cerca de 45 dias. Na Figura A.2 mostra-se o desenvolvimento da queda de pressão ao decorrer da simulação. É possível observar que a queda de pressão se estabilizou por volta dos 0,8 s computacionais. Optou-se por estender a simulação além desse tempo para observar o comportamento da queda de pressão e, como não houve grande mudança no valor, julgou-se que a resposta tinha atingido o estado estacionário. Por sua vez, a Figura A.3 indica o desenvolvimento da razão de líquido destacando-se que, como a simulação foi conduzida com uma única fase, a razão de líquido é resumida à divisão da corrente mássica de *underflow* com a de alimentação.

## APÊNDICE A

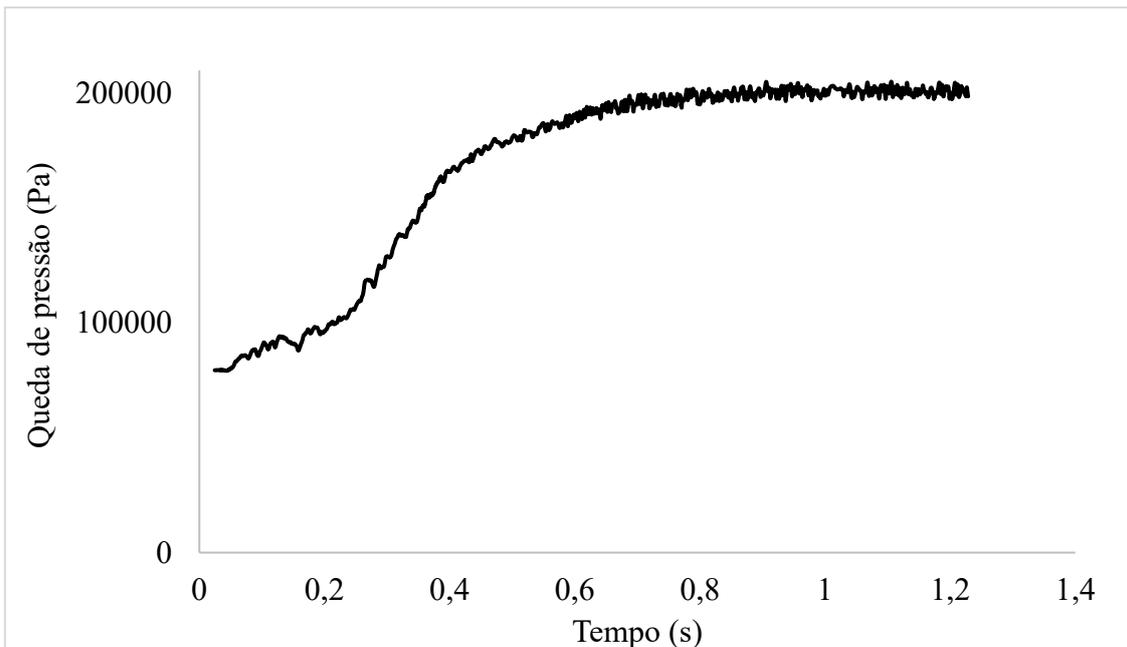


Figura A.2 – Comportamento da queda de pressão em função do tempo de simulação.

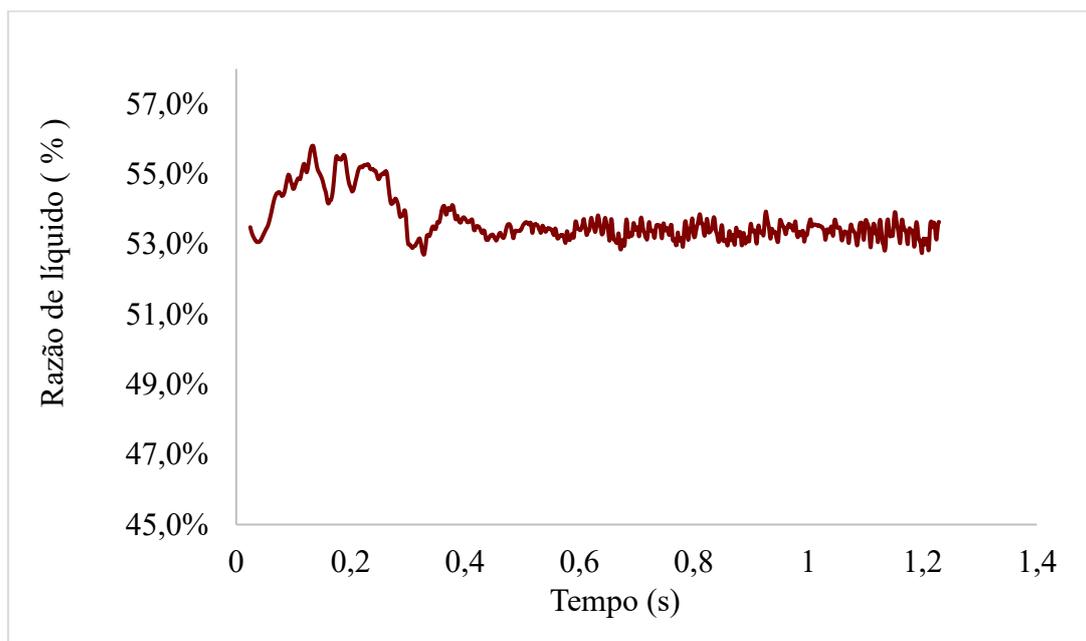


Figura A.3 – Comportamento da razão de líquido em função do tempo de simulação.

Assim como para o comportamento da queda de pressão, observou-se que a razão de líquido também teve um comportamento considerado estacionário entre o intervalo de 0,8 s e 1,2 s. Pela análise das figuras acima, acreditou-se que a simulação atingiu o estado estacionário, o que fez com que as respostas estimadas ao final da simulação se encontrassem independentes do tempo. Na Tabela A.2 relacionam-se os dados experimentais hidrodinâmicos e os resultados obtidos na simulação para o hidrociclone filtrante (utilizando somente água como suspensão de trabalho), bem como a diferença

## APÊNDICE A

percentual entre eles em relação aos dados experimentais. A análise da Tabela A.2 indica valores significativos de diferença entre dados experimentais e simulados, o que indica que a abordagem computacional possa ser aprimorada.

Tabela A.2 - Relação de variáveis obtidas experimentalmente e simuladas.

Variável	Experimento	Simulação	Diferença (%)
Vazão de alimentação	390,41 g/s	389,60 g/s	0,21
Vazão de <i>underflow</i>	163,21 g/s	225,44 g/s	-27,60
Vazão de <i>overflow</i>	229,22 g/s	164,03 g/s	39,74
Vazão de filtrado	0,1561 g/s	0,1245 g/s	25,38
Queda de pressão	206 kPa	198 kPa	4,04
Temperatura	25 °C	25 °C	0

Na Figura A.4 mostra-se o comportamento da pressão manométrica dentro do equipamento através do perfil de pressão (contendo os valores positivos e negativos dessa variável) e o perfil de pressão somente com as pressões positivas. Comparando as duas partes da Figura A.4 é possível constatar que as pressões negativas são situadas no interior do tubo do *vortex finder* e próximas ao orifício de *underflow*. Essa pressão negativa faz com que haja um fluxo reverso às saídas no sentido de adentrar o equipamento. É possível observar que essas regiões com pressão negativa não se conectam o que leva a acreditar que não há a existência de *air core* no hidrociclone filtrante para as condições de simulação propostas. Na Figura A.4 ainda mostra-se o perfil de pressão em seção circular imediatamente anterior ao cone permeável, em que é possível constatar a existência de um gradiente de pressão que parte da região central em direção às paredes do equipamento; isso pode ser explicado devido aos movimentos espiralados assumidos pelo fluido dentro do equipamento.

## APÊNDICE A

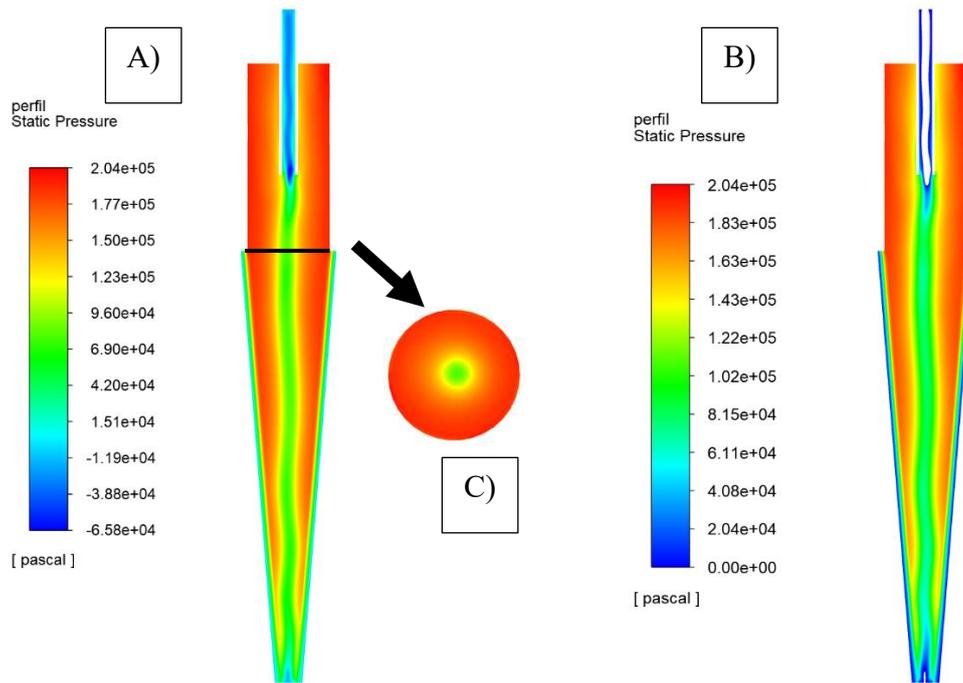


Figura A.4 – Perfis de pressão manométrica para o hidrociclone filtrante. A) o perfil que contém as pressões positivas e negativas; B) o perfil apenas com as pressões positivas e C) o perfil de pressão em seção circular anterior à região cônica.

Na Figura A.5 mostram-se dois perfis de velocidade axial: o perfil de velocidade axial ascendente e o perfil de velocidade axial descendente. Essa componente da velocidade pode auxiliar a identificar os vórtices externo e interno.

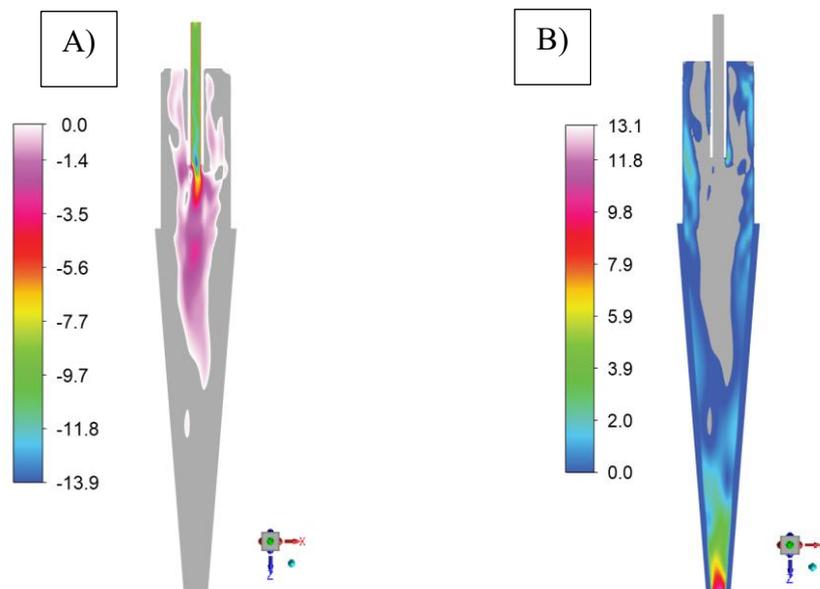


Figura A.5 – Perfis de velocidade axial. A) o perfil de velocidade axial ascendente indicando o vórtice interno e B) o perfil de velocidade axial descendente indicando o vórtice externo.

## APÊNDICE A

Observando a Figura A.5 pode-se supor que existem zonas de recirculação de fluido e curtos-circuitos. Na Figura A.6 mostra-se um corte ampliado do hidrociclone, explicitando correntes de fluxo que apresentam, com melhor clareza, as zonas de recirculação, as quais podem ocorrer nas interfaces entre os vórtices externo e interno. São também apresentados curtos-circuitos que ocorrem quando o fluido escoa por um caminho de menor resistência, fazendo com que seja coletado no tubo de *overflow* sem experimentar o efeito do campo centrífugo.

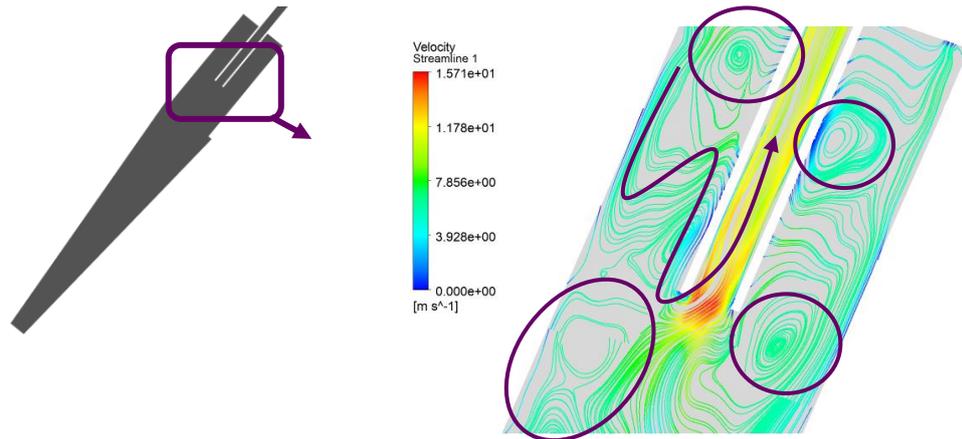


Figura A.6 – Correntes de fluxo com destaque no curto-circuito e na recirculação.

Na Figura A.7 são mostrados dois perfis; no perfil “A”, mostra-se um contorno de velocidade de fluido sobre a superfície do filtro em contato com a atmosfera. Nota-se que as velocidades assumem um valor maior na região cônica próxima ao cilindro. Isso pode ser explicado com auxílio do perfil “B”, que mostra que na superfície do filtro em contato com o interior do hidrociclone existe um gradiente de pressão no mesmo sentido do da velocidade, e como ilustrado no Apêndice B, a vazão de filtrado é proporcional à queda de pressão.

## APÊNDICE A

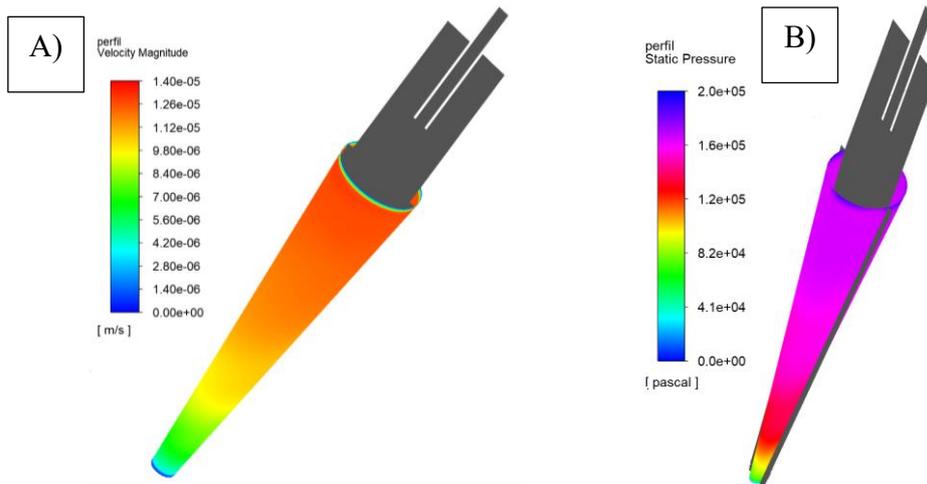


Figura A.7 – Perfil de velocidade na saída do contorno filtrante e perfil de pressão na superfície do filtro em contato com o interior do equipamento.

Na Figura A.8 mostra-se o perfil de velocidade tangencial ao longo do equipamento filtrante, e em diferentes cotas do equipamento.

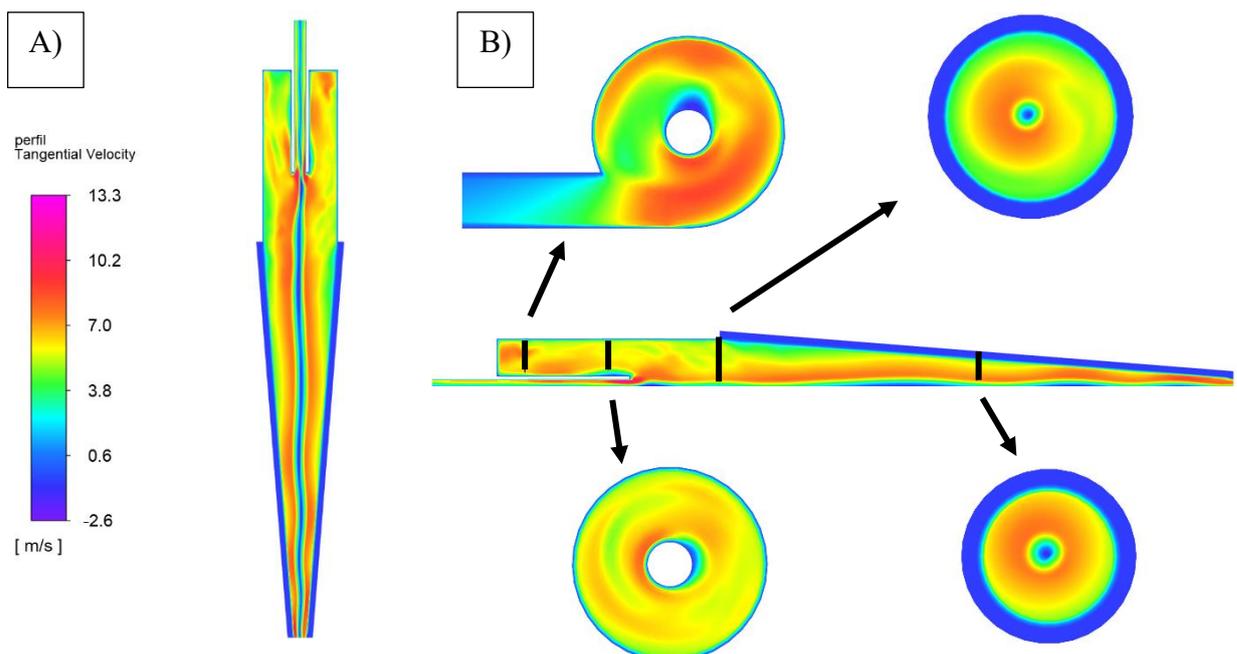


Figura A.8 – Velocidade tangencial do equipamento filtrante. A) Perfil em um corte axial do equipamento e B) Velocidade tangencial em diversas seções circulares.

A velocidade tangencial é a responsável pela criação do campo centrífugo, relacionado à separação das partículas (ULLMANN, 2020). Observa-se que a velocidade tangencial é intensa na alimentação e decresce à medida que a suspensão adentra o hidrociclone.

## APÊNDICE A

Em suma, a abordagem computacional se mostrou satisfatória para a descrição do equipamento filtrante. Espera-se que essa abordagem norteie futuras pesquisas que tenham como objetivo simular o hidrociclone filtrante.

## APÊNDICE B: DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE E DA POROSIDADE DO CONE UTILIZADO

A permeabilidade ( $k_m$ ) e porosidade ( $\Phi$ ) do cone utilizado nessa pesquisa foram aferidas seguindo metodologia proposta por Rocha e Vieira (2012). Foi utilizado a água para a caracterização do material permeável, considerada newtoniana e incompressível. No hidrociclone filtrante, pode-se assumir que o escoamento através da matriz porosa obedece a Lei de Darcy (SALVADOR, 2017), descrita pela Equação B.1 (em que  $k_m$  representa a permeabilidade do material e  $Q_F$  a vazão volumétrica de filtrado).

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

Sendo a área lateral do cone descrita pela Equação B.2.

$$A_{lateral} = 2\pi Hr + \frac{\pi}{2} H(Dc - Du) \quad (\text{B.2})$$

Substituindo B.2 em B.1 e integrando, obtém-se a Equação B.3. Essa equação é capaz de relacionar a queda de pressão com a vazão de filtrado.

$$\Delta P = \frac{\mu}{2\pi k_m H} \ln\left(\frac{Du + Dc + 4\varepsilon}{Du + Dc}\right) Q_F \quad (\text{B.3})$$

Reorganizando a Equação B.3 é possível relacionar a vazão de filtrado com a queda de pressão por meio de uma constante ( $\psi$ ), obtendo-se então a Equação B.4.

$$Q_F = \psi(-\Delta P) \quad (\text{B.4})$$

A constante  $\psi$  é representada na Equação B.5, e nada mais é do que um agrupamento de variáveis da Equação B.3.

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\mu}{2\pi k_m H} \ln\left(\frac{D_u + D_c + 4\varepsilon}{D_u + D_c}\right) \quad (\text{B.5})$$

Assim, usando as equações mencionadas e os resultados obtidos experimentalmente (Tabela B.1), pôde-se estimar o valor da constante  $\psi$  e em seguida obter o valor da permeabilidade do cone.

## APÊNDICE B

Tabela B.1 – Resultados experimentais para a caracterização do filtro.

Pressão (psi)	Pressão (Pa)	Vazão volumétrica de filtrado (m <sup>3</sup> /s)
15	103421	7,23·10 <sup>-8</sup>
		7,53·10 <sup>-8</sup>
		7,59·10 <sup>-8</sup>
		7,26·10 <sup>-8</sup>
20	137895	9,87·10 <sup>-8</sup>
		9,88·10 <sup>-8</sup>
		9,85·10 <sup>-8</sup>
		1,05·10 <sup>-7</sup>
25	172369	1,25·10 <sup>-7</sup>
		1,24·10 <sup>-7</sup>
		1,16·10 <sup>-7</sup>
		1,22·10 <sup>-7</sup>
30	206843	1,49·10 <sup>-7</sup>
		1,48·10 <sup>-7</sup>
		1,46·10 <sup>-7</sup>
		1,40·10 <sup>-7</sup>
35	241317	1,69·10 <sup>-7</sup>
		1,72·10 <sup>-7</sup>
		1,76·10 <sup>-7</sup>
		1,70·10 <sup>-7</sup>
40	275790	1,91·10 <sup>-7</sup>
		2,03·10 <sup>-7</sup>
		2,02·10 <sup>-7</sup>
		2,08·10 <sup>-7</sup>
45	310264	2,23·10 <sup>-7</sup>
		2,24·10 <sup>-7</sup>
		2,15·10 <sup>-7</sup>
		2,13·10 <sup>-7</sup>

A partir dos dados experimentais apresentados foi possível aferir que a constante  $\psi$  teve valor de  $7,13 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ . Dessa forma, a permeabilidade do meio poroso foi avaliada em  $1,61 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Segundo Darby (2001), a permeabilidade do meio filtrante está relacionada com a porosidade do meio de acordo com a Equação B.6, o que levou a um valor de 3,52% de porosidade.

$$k_m = \frac{d_{pa}^2 \Phi^3}{180(1-\Phi)^2} \quad (\text{B.6})$$

## APÊNDICE C

### APÊNDICE C: DADOS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE CONVENCIONAL E FILTRANTE

Apresentam-se na Tabela C.1 os dados experimentais do hidrociclone convencional e na Tabela C.2 os dados para o hidrociclone filtrante, em que, a viscosidade aparente ( $\mu'$ ) é avaliada em uma taxa de deformação de  $1250 \text{ s}^{-1}$  e  $R^2$  é o coeficiente de determinação obtido quando se ajustaram os dados reológicos da suspensão ao modelo *Power-Law*.

Tabela C.1 – Dados experimentais do hidrociclone convencional.

Exp.	$X1$ [ $C_{CMC}$ ]	$X2$ [ $C_{VA}$ ]	$X3$ [ $-\Delta P$ ]	$C_{VA}$ [%v.]	$C_{VU}$ [%v.]	$Q_A$ [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	$RL$ [%]	$Eu$	$\eta$ [%]	$\eta'$ [%]	$d_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{50}'$ [ $\mu\text{m}$ ]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$K$ [ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ]	$n$	$\mu'$ [ $\text{cP}$ ]	$R^2$
1	-1	-1	-1	1,05	1,76	337,80	36,63	1817	62,67	41,09	12,99	23,59	23	0,0116	0,9370	7,4	0,9992
2	-1	-1	0	1,05	1,81	363,32	36,57	1831	63,61	42,62	12,61	22,00	24				
3	-1	-1	1	1,07	1,84	386,21	36,53	1851	64,70	44,39	12,40	21,34	25				
4	-1	0	-1	2,27	3,88	357,63	36,04	1623	62,10	40,74	13,64	30,11	29	0,0122	0,9479	8,4	0,9990
5	-1	0	0	2,28	3,99	383,81	35,50	1643	62,99	43,40	12,80	26,16	29				
6	-1	0	1	2,30	4,07	405,33	34,99	1683	63,40	43,70	12,54	24,96	26				
7	-1	1	-1	3,30	5,70	347,64	34,68	1717	61,15	40,52	14,96	31,69	27	0,0158	0,9161	7,6	0,9985
8	-1	1	0	3,31	5,84	371,87	34,29	1749	61,95	42,10	14,14	29,07	26				
9	-1	1	1	3,32	5,89	394,52	34,21	1775	62,42	42,89	12,61	27,90	25				
10	0	-1	-1	1,21	1,48	379,25	40,97	1443	50,50	16,13	28,44	65,09	27	0,0843	0,7767	17,1	0,9999
11	0	-1	0	1,20	1,55	405,41	39,44	1472	50,97	19,03	26,77	62,05	27				
12	0	-1	1	1,20	1,66	426,66	37,22	1518	51,60	22,91	22,37	61,49	28				
13	0	0	-1	2,49	3,13	415,85	39,41	1201	49,96	17,42	29,56	66,69	30	0,0831	0,7817	17,6	0,9998
14	0	0	0	2,49	3,25	445,99	38,27	1217	50,39	19,64	27,98	65,55	29				
15	0	0	1	2,49	3,33	474,12	38,12	1230	51,54	21,69	24,28	63,11	28				
16	0	1	-1	3,52	4,17	424,58	41,52	1151	49,45	13,56	30,85	70,89	27	0,1034	0,7575	18,4	0,9998
17	0	1	0	3,54	4,33	438,94	41,24	1256	50,88	16,41	28,85	67,00	27				
18	0	1	1	3,52	4,42	462,12	40,38	1294	51,03	17,87	25,28	63,71	27				

(Continua)

# APÊNDICE C

Continuação da Tabela C.1.

Exp.	$X1$ [ $C_{CMC}$ ]	$X2$ [ $C_{VA}$ ]	$X3$ [- $\Delta P$ ]	$C_{VA}$ [%v.]	$C_{VU}$ [%v.]	$Q_A$ [cm <sup>3</sup> /s]	$RL$ [%]	$Eu$	$\eta$ [%]	$\eta'$ [%]	$d_{50}$ [ $\mu$ m]	$d_{50}'$ [ $\mu$ m]	T [°C]	$K$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	$n$	$\mu'$ [cP]	R <sup>2</sup>
19	1	-1	-1	0,98	1,05	438,19	46,34	1081	48,70	4,40	34,65	89,16	30	0,3780	0,6509	31,5	0,9998
20	1	-1	0	1,02	1,07	466,44	45,73	1112	49,01	6,04	33,64	84,14	29				
21	1	-1	1	1,00	1,09	492,28	45,36	1141	49,61	7,78	32,96	78,95	26				
22	1	0	-1	2,39	2,51	439,14	45,03	1076	47,32	4,17	43,40	92,38	27	0,3198	0,6766	32,0	0,9996
23	1	0	0	2,40	2,56	471,18	44,78	1089	47,95	5,75	36,36	87,25	27				
24	1	0	1	2,39	2,58	497,67	44,69	1116	48,37	6,65	33,63	80,08	26				
25	1	1	-1	3,43	3,58	441,40	44,47	1065	46,51	3,67	46,67	105,01	28	0,3766	0,6535	31,9	0,9998
26	1	1	0	3,42	3,61	471,60	44,36	1088	46,76	4,31	44,80	101,25	28				
27	1	1	1	3,44	3,62	499,38	44,24	1108	46,98	4,53	41,55	90,89	26				

Tabela C.2 – Dados experimentais do Hidrociclone Filtrante.

Exp.	$X1$ [ $C_{CMC}$ ]	$X2$ [ $C_{VA}$ ]	$X3$ [- $\Delta P$ ]	$C_{VA}$ [%v.]	$C_{VU}$ [%v.]	$Q_A$ [cm <sup>3</sup> /s]	$RL$ [%]	$Eu$	$\eta$ [%]	$\eta'$ [%]	$d_{50}$ [ $\mu$ m]	$d_{50}'$ [ $\mu$ m]	T [°C]	$K$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	$n$	$\mu'$ [cP]	$W_F$ [g/s]	R <sup>2</sup>
1	-1	-1	-1	1,09	1,92	364,31	36,06	1563	64,70	44,79	9,80	21,87	23	0,0116	0,9370	7,4	0,06	0,9992
2	-1	-1	0	1,08	1,99	389,17	35,97	1597	67,02	48,50	9,64	17,76	25				0,07	
3	-1	-1	1	1,08	2,10	413,53	35,90	1616	70,73	54,35	9,43	15,70	26				0,07	
4	-1	0	-1	2,22	3,92	384,86	35,98	1415	64,49	44,53	10,85	24,98	30	0,0124	0,9361	7,9	0,02	0,9992
5	-1	0	0	2,23	3,99	411,05	35,95	1433	65,51	46,15	10,56	23,46	29				0,02	
6	-1	0	1	2,24	4,14	424,40	35,92	1554	68,06	50,16	10,06	21,85	28				0,02	
7	-1	1	-1	3,41	6,15	385,59	33,91	1396	62,43	43,15	13,55	28,13	27	0,0158	0,9161	8,6	0,01	0,9985
8	-1	1	0	3,43	6,30	416,39	33,80	1405	64,22	45,93	12,84	24,47	27				0,01	
9	-1	1	1	3,42	6,36	441,60	33,77	1417	64,81	46,87	10,98	23,67	26				0,02	

(Continua)

# APÊNDICE C

Continuação da Tabela C.2.

Exp.	$X1$ [ $C_{CMC}$ ]	$X2$ [ $C_{VA}$ ]	$X3$ [- $\Delta P$ ]	$C_{VA}$ [%v.]	$C_{VU}$ [%v.]	$Q_A$ [cm <sup>3</sup> /s]	$RL$ [%]	$Eu$	$\eta$ [%]	$\eta'$ [%]	$d_{50}$ [ $\mu$ m]	$d_{50}'$ [ $\mu$ m]	T [°C]	$K$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	$n$	$\mu'$ [cP]	$W_F$ [g/s]	R <sup>2</sup>
10	0	-1	-1	1,26	1,67	405,41	40,28	1264	53,58	22,26	21,34	55,87	32	0,0849	0,7769	17,3	0,02	0,9998
11	0	-1	0	1,25	1,77	434,20	39,47	1284	55,81	26,99	17,79	47,72	30				0,02	
12	0	-1	1	1,26	1,80	459,22	38,90	1312	56,07	28,10	17,65	45,15	27				0,02	
13	0	0	-1	2,57	3,29	424,59	40,20	1152	51,82	19,42	25,60	57,93	30	0,07471	0,8002	18,0	0,01	0,9998
14	0	0	0	2,59	3,45	454,23	39,77	1173	53,71	23,14	19,18	55,63	29				0,01	
15	0	0	1	2,57	3,63	480,77	38,52	1196	54,95	26,72	18,75	47,12	28				0,02	
16	0	1	-1	3,62	4,54	433,41	40,40	1106	51,36	18,38	25,96	59,92	30	0,1025	0,7586	18,4	0,01	0,9978
17	0	1	0	3,61	4,72	461,25	39,88	1138	52,82	21,53	24,36	56,65	29				0,01	
18	0	1	1	3,60	4,79	488,06	38,44	1161	53,03	23,70	20,73	53,24	28				0,02	
19	1	-1	-1	0,77	0,97	451,00	46,31	1021	50,75	8,27	30,42	77,11	29	0,3623	0,6606	32,3	0,01	0,9998
20	1	-1	0	0,97	1,01	486,70	44,90	1022	51,29	11,60	30,01	71,97	29				0,01	
21	1	-1	1	0,95	1,07	506,17	43,27	1079	53,69	16,91	24,58	68,56	27				0,01	
22	1	0	-1	2,48	2,65	467,07	44,53	952	47,61	5,56	41,48	80,96	29	0,3169	0,6776	31,9	0,01	0,9997
23	1	0	0	2,49	2,69	499,85	43,88	969	47,66	6,73	36,76	79,80	29				0,01	
24	1	0	1	2,48	2,73	522,12	43,63	1014	48,02	7,78	33,39	79,80	27				0,01	
25	1	1	-1	3,58	3,82	463,51	43,59	966	46,64	5,41	42,56	88,92	30	0,3567	0,6618	32,0	0,01	0,9998
26	1	1	0	3,58	3,86	497,37	42,96	979	46,69	6,54	41,57	85,06	29				0,01	
27	1	1	1	3,58	3,90	526,94	42,96	996	47,00	7,08	41,08	80,79	28				0,02	

## APÊNDICE D

### APÊNDICE D: TESTES DE HIPÓTESE

Nas Tabelas D.1 a D.9 mostram-se os resultados dos testes de hipótese (com nível de significância de 5%). Esses testes têm como objetivo comparar respostas de interesse entre o HC e o HF, experimento a experimento. Assim, têm-se as seguintes hipóteses:

H<sub>0</sub>: Os valores das médias para uma determinada resposta dos equipamentos convencional e filtrante são estatisticamente iguais.

H<sub>1</sub>: Os valores das médias para uma determinada resposta dos equipamentos não são estatisticamente iguais.

Observa-se que os valores sob a coluna “*p value*” apresentam cores diferentes. Caso a cor seja **vermelha** significa que os hidrociclones apresentam respostas diferentes, caso seja **verde** significa que as médias são estatisticamente semelhantes.

Tabela D.1 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 1 a 3.

		Experimento 01				Experimento 02				Experimento 03			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	343,3333	3,51188	3	<b>0,002</b>	370,333	3,21455	3	<b>0,0004</b>	395	4,5825	3	<b>0,0058</b>
	HF	371,3333	1,1547	3		397	2,6457	3		422,333	7,5055	3	
$Eu$	HC	1828,333	35,5011	3	<b>0,0048</b>	1834	30,2654	3	<b>0,0003</b>	1840	41,2431	3	<b>0,0047</b>
	HF	1563	7,8102	3		1595,67	19,6553	3		1612	56,0029	3	
$C_{VU}$	HC	1,79	0,0264	3	<b>0,0018</b>	1,8167	0,0057	3	<b>0,0001</b>	1,8433	0,0057	3	<b>0</b>
	HF	1,9133	0,01154	3		1,9867	0,01527	3		2,1	0,01	3	
$RL$	HC	36,73	0,3659	3	<b>0,0735</b>	36,5967	0,2987	3	<b>0,0282</b>	36,4167	0,408	3	<b>0,2733</b>
	HF	36,1766	0,1556	3		35,9633	0,13051	3		35,8667	0,6301	3	
$\eta$	HC	63,2067	0,91	3	<b>0,064</b>	63,69	0,42974	3	<b>0,0025</b>	64,42	0,61506	3	<b>0,0004</b>
	HF	64,7033	0,46231	3		66,78	0,6702	3		70,5867	0,77175	3	
$\eta'$	HC	41,85	1,3261	3	<b>0,0292</b>	42,7267	0,51	3	<b>0,001</b>	44,04	0,6161	3	<b>0,0002</b>
	HF	44,7	0,6656	3		48,1233	0,9455	3		54,14	1,1852	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.2 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 4 a 6.

		Experimento 04				Experimento 05				Experimento 06			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	374	5,1961	3	<b>0,0011</b>	401,333	16,289	3	<b>0,0531</b>	423,667	6,6583	3	<b>0,0076</b>
	HF	401,667	2,3094	3		427,333	3,055	3		443	1	3	
$Eu$	HC	1623,67	46,188	3	<b>0,0015</b>	1646,67	128,4302	3	<b>0,0541</b>	1683,67	54,2432	3	<b>0,0093</b>
	HF	1401,67	18,5831	3		1444	20,2977	3		1535	7,5498	3	
$C_{VU}$	HC	3,8766	0,0208	3	<b>0,0349</b>	3,9966	0,0251	3	<b>0,0937</b>	4,0767	0,01527	3	<b>0,0031</b>
	HF	3,9233	0,0152	3		3,9466	0,03055	3		4,1367	0,0057	3	
$RL$	HC	35,9467	0,488	3	<b>0,8749</b>	35,51	1,3765	3	<b>0,4781</b>	34,6566	0,7762	3	<b>0,0818</b>
	HF	36,0367	0,7905	3		36,1333	0,1153	3		35,7	0,0901	3	
$\eta$	HC	61,9366	1,1883	3	<b>0,0835</b>	63,2	2,8931	3	<b>0,3055</b>	63,5167	1,25	3	<b>0,0049</b>
	HF	64,6033	1,6257	3		65,1667	0,2236	3		67,64	0,2078	3	
$\eta'$	HC	40,5833	1,4164	3	<b>0,039</b>	42,99	3,1312	3	<b>0,247</b>	43,8933	1,4495	3	<b>0,0024</b>
	HF	44,67	1,8624	3		45,4566	0,37529	3		49,68	0,26153	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.3 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 7 a 9.

		Experimento 07				Experimento 08				Experimento 09			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	373,333	1,5275	3	<b>0</b>	395	1	3	<b>0,0001</b>	420,667	8,1445	3	<b>0,0004</b>
	HF	412,667	2,5166	3		445	5,2915	3		471,667	0,5773	3	
$Eu$	HC	1699	11,7898	3	<b>0</b>	1768,33	6,4291	3	<b>0</b>	1780,67	67,7962	3	<b>0,0008</b>
	HF	1394,33	16,6232	3		1398	33,4514	3		1421	3,461	3	
$C_{VU}$	HC	5,72	0,02645	3	<b>0,0004</b>	5,87	0,02645	3	<b>0,0001</b>	5,9533	0,05686	3	<b>0,0003</b>
	HF	6,1166	0,0577	3		6,29	0,03464	3		6,3633	0,0152	3	
$RL$	HC	34,4833	0,0986	3	<b>0,0061</b>	34,4433	0,03055	3	<b>0,0019</b>	34,05	0,593	3	<b>0,4706</b>
	HF	33,9733	0,1644	3		33,7866	0,1527	3		33,7766	0,04725	3	
$\eta$	HC	60,9866	0,4483	3	<b>0,05</b>	62,6033	0,48135	3	<b>0,0261</b>	62,8533	1,735	3	<b>0,1208</b>
	HF	62,54	0,8593	3		64,0366	0,5353	3		64,8267	0,1234	3	
$\eta'$	HC	40,4567	0,615	3	<b>0,0209</b>	42,96	0,5458	3	<b>0,0066</b>	43,69	2,1071	3	<b>0,0588</b>
	HF	43,27	1,166	3		45,69	0,7332	3		46,89	0,19	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.4 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 10 a 12.

		Experimento 10				Experimento 11				Experimento 12			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	387,667	3,5118	3	<b>0,0036</b>	414,333	8,0829	3	<b>0,005</b>	438,333	5,5075	3	<b>0,0007</b>
	HF	414	6,5574	3		443	3,6055	3		470,667	2,0816	3	
$Eu$	HC	1443,33	24,1729	3	<b>0,003</b>	1474	61,4898	3	<b>0,0082</b>	1502,67	37,581	3	<b>0,001</b>
	HF	1268,67	40,2036	3		1289,67	22,8108	3		1304,67	12,3423	3	
$C_{VU}$	HC	1,48	0,01732	3	<b>0,0004</b>	1,5567	0,0115	3	<b>0</b>	1,66	0,01	3	<b>0,0006</b>
	HF	1,6633	0,02309	3		1,77	0,01	3		1,80333	0,0231	3	
$RL$	HC	40,9767	0,3265	3	<b>0,1985</b>	39,4433	0,8057	3	<b>0,8471</b>	37,03	0,4596	3	<b>0,0023</b>
	HF	40,36	0,6122	3		39,5467	0,3295	3		38,8933	0,06658	3	
$\eta$	HC	50,5033	0,9525	3	<b>0,0368</b>	51,26	1,4215	3	<b>0,0079</b>	51,3333	0,6908	3	<b>0,0009</b>
	HF	53,6833	1,5101	3		55,92	0,8118	3		56,06	0,6345	3	
$\eta'$	HC	16,4667	1,1631	3	<b>0,0087</b>	19,5233	1,2913	3	<b>0,0012</b>	22,72	0,5377	3	<b>0,0015</b>
	HF	22,3533	1,7815	3		27,0867	0,9411	3		28,09	1,0828	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.5 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 13 a 15.

		Experimento 13				Experimento 14				Experimento 15			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	438,667	4,0414	3	<b>0,0723</b>	470	10,21436	3	<b>0,3137</b>	497,253	0,57735	3	<b>0,0125</b>
	HF	445,333	2,5166	3		477,333	4,1633	3		506	3,4641	3	
$Eu$	HC	1188,67	21,0792	3	<b>0,0891</b>	1205	52,5737	3	<b>0,3805</b>	1230	11,7898	3	<b>0,0346</b>
	HF	1156,67	13,0511	3		1173	20,108	3		1192,33	17,0391	3	
$C_{VU}$	HC	3,18	0,0458	3	<b>0,0153</b>	3,2433	0,01154	3	<b>0,0002</b>	3,33	0,01	2	<b>0,0182</b>
	HF	3,29	0,01	3		3,47	0,0264	3		3,5567	0,06429	3	
$RL$	HC	38,9167	0,3937	3	<b>0,007</b>	38,8533	0,8562	3	<b>0,161</b>	37,88	0,1276	3	<b>0,042</b>
	HF	40,2366	0,2159	3		39,77	0,3482	3		38,86	0,561	3	
$\eta$	HC	50,08	0,2351	3	<b>0,0044</b>	51,0467	0,9449	3	<b>0,0096</b>	51,2	0,1599	3	<b>0,0003</b>
	HF	51,7566	0,4427	3		53,79	0,3835	3		54,2	0,41	3	
$\eta'$	HC	18,2667	0,8381	3	<b>0,1425</b>	19,9467	0,4315	3	<b>0,0003</b>	21,4466	0,0802	3	<b>0,0062</b>
	HF	19,2767	0,468	3		23,2767	0,2074	3		25,0833	1,1924	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.6 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 16 a 18.

		Experimento 16				Experimento 17				Experimento 18			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	455	7,8102	3	<b>0,1883</b>	471,667	7,3711	3	<b>0,0265</b>	494,667	2,5166	3	<b>0,0017</b>
	HF	464,99	5,9862	3		494,667	8,9628	3		525,333	6,6583	3	
$Eu$	HC	1152	41,6173	3	<b>0,1861</b>	1250,33	38,37709	3	<b>0,0274</b>	1298,33	11,506	3	<b>0,0013</b>
	HF	1105,67	28,3078	3		1139,67	41,4286	3		1153,67	29,2631	3	
$C_{VU}$	HC	4,2167	0,0404	3	<b>0,0002</b>	4,3366	0,0152	3	<b>0</b>	4,4266	0,0115	3	<b>0,2507</b>
	HF	4,54333	0,0057	3		4,72	0,01	3		4,855	0,0777	2	
$RL$	HC	41,47	0,7275	3	<b>0,1055</b>	41,1233	0,6143	3	<b>0,0854</b>	40,3333	0,0971	3	<b>0,007</b>
	HF	40,4	0,51097	3		39,88	0,7209	3		38,6667	0,5589	3	
$\eta$	HC	49,9767	1,2124	3	<b>0,1516</b>	50,97	0,9638	3	<b>0,0844</b>	51,11	0,14	3	<b>0,0002</b>
	HF	51,403	0,6929	3		52,83	1,0301	3		52,9233	0,2013	3	
$\eta'$	HC	14,5467	1,1548	3	<b>0,0056</b>	16,7333	0,7635	3	<b>0,0015</b>	18,0633	0,2311	3	<b>0,0002</b>
	HF	18,4567	0,4801	3		21,54	0,7672	3		23,24	0,6655	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.7 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 19 a 21.

		Experimento 19				Experimento 20				Experimento 21			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	445,667	1,1547	3	<b>0,123</b>	474,667	4,7258	3	<b>0,0273</b>	500	13,5277	3	<b>0,3451</b>
	HF	457	10	3		489	5,5677	3		514	18,193	3	
$Eu$	HC	1081,33	6,6583	3	<b>0,1023</b>	1112,67	20,2566	3	<b>0,0174</b>	1145,33	63,0423	3	<b>0,337</b>
	HF	1024,67	46,0036	3		1043	23,2594	3		1081,67	79,1226	3	
$C_{VU}$	HC	1,05	0,0141	2	<b>0,0297</b>	1,075	0,007	2	<b>0,0001</b>	1,1	0,0141	3	<b>0,0376</b>
	HF	0,97	0,0141	2		1,01	0	2		1,055	0,02121	3	
$RL$	HC	46,5833	0,1457	3	<b>0,7735</b>	45,6233	0,4219	3	<b>0,5316</b>	45,4533	1,2513	3	<b>0,392</b>
	HF	46,3966	1,04	3		45,3633	0,5056	3		44,3267	1,6055	3	
$\eta$	HC	48,9433	0,1553	3	<b>0,0457</b>	49,1133	0,4579	3	<b>0,0033</b>	49,62	1,3663	3	<b>0,0665</b>
	HF	50,8466	1,14	3		51,78	0,5765	3		53,03	1,9232	3	
$\eta'$	HC	4,42	0,0264	3	<b>0</b>	6,42	0,1081	3	<b>0</b>	7,6433	0,3852	3	<b>0,0001</b>
	HF	8,3067	0,35	3		11,7433	0,2371	3		16,6466	1,0336	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.8 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 22 a 24.

		Experimento 22				Experimento 23				Experimento 24			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	460,333	6,6583	3	<b>0,0068</b>	493,667	3,7859	3	<b>0,0059</b>	521,333	8,9628	3	<b>0,0347</b>
	HF	490,333	7,6376	3		524,5	6,3639	2		548	5,2915	3	
$Eu$	HC	1075	31,1769	3	<b>0,0073</b>	1088,67	17,3877	3	<b>0,0062</b>	1118	39	3	<b>0,0145</b>
	HF	951,333	29,0229	3		968,5	21,9203	2		1014,33	19,1398	3	
$C_{VU}$	HC	2,515	0,0071	3	<b>0</b>	2,5567	0,01527	3	<b>0,0018</b>	2,5833	0,01154	3	<b>0,0006</b>
	HF	2,65	0,01	2		2,69	0,01	2		2,725	0,0071	2	
$RL$	HC	44,9933	0,6524	3	<b>0,4284</b>	44,7833	0,3647	3	<b>0,0984</b>	44,7266	0,7827	3	<b>0,1006</b>
	HF	44,5167	0,6721	3		43,89	0,4949	2		43,64	0,41327	3	
$\eta$	HC	47,3333	0,687	3	<b>0,741</b>	47,9567	0,3855	3	<b>0,5024</b>	48,4066	0,8519	3	<b>0,4558</b>
	HF	47,5366	0,7179	3		47,65	0,5374	2		47,9467	0,4548	3	
$\eta'$	HC	4,2567	0,1096	3	<b>0,0004</b>	5,7467	0,085	3	<b>0,0021</b>	6,66	0,2165	3	<b>0,0025</b>
	HF	5,4466	0,1484	3		6,705	0,1343	2		7,6367	0,1234	3	

## APÊNDICE D

Tabela D.9 – Teste de hipótese comparando os equipamentos filtrante e convencional para os experimentos 25 a 27.

		Experimento 25				Experimento 26				Experimento 27			
		Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>	Média	Desvio padrão	n	<i>p value</i>
$Q_A$	HC	472	3,6055	3	<b>0,001</b>	503	1	3	<b>0,0107</b>	535	2,6457	3	<b>0,0064</b>
	HF	497	3,4641	3		535,667	12,5033	3		565,333	9,7125	3	
$Eu$	HC	1065,67	17,2433	3	<b>0,0062</b>	1093	3,5118	3	<b>0,0102</b>	1105	11,5902	3	<b>0,006</b>
	HF	966,667	11,8462	2		972,333	45,5448	3		996,333	33,5012	3	
$C_{vU}$	HC	3,59	0,0141	2	<b>0,0003</b>	3,61	0,01	3	<b>0</b>	3,63	0,0141	2	<b>0</b>
	HF	3,82	0	2		3,88	0,01	2		3,91	0,0141	2	
$RL$	HC	44,4667	0,369	3	<b>0,0282</b>	44,28	0,1664	3	<b>0,0669</b>	44,1833	0,2318	3	<b>0,0312</b>
	HF	43,59	0,26	3		42,81	1,0053	3		42,7566	0,7223	3	
$\eta$	HC	46,6267	0,3852	3	<b>0,9363</b>	46,6766	0,1721	3	<b>0,8561</b>	46,82	0,24331	3	<b>0,9527</b>
	HF	46,65	0,2773	3		46,5533	1,0909	3		46,85	0,7858	3	
$\eta'$	HC	3,89	0,0557	3	<b>0</b>	4,3	0,0264	3	<b>0,0001</b>	4,72	0,0435	3	<b>0</b>
	HF	5,4267	0,05773	3		6,5533	0,2702	3		7,1667	0,2084	3	

## APÊNDICE E: DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE EFICIÊNCIA

As curvas de eficiência podem ser obtidas seguindo metodologia apresentada neste apêndice. A Equação E.1 é uma forma da Equação 2.9, isolando-se a eficiência total reduzida.

$$\eta = (1 - RL)\eta' + RL \quad (E.1)$$

A eficiência total reduzida pode ser calculada pela integral da eficiência granulométrica reduzida ( $G'$ ) do material particulado (Equação E.2).

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

Segundo Massarani (1989), a eficiência granulométrica reduzida também pode ser calculada pela Equação E.3. Nessa equação  $d_p$  é o diâmetro de uma determinada partícula,  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros referentes ao hidrociclone e podem ser obtidos no por meio de regressões não-lineares.

$$G' = \frac{\left(\frac{d_p}{d_{50}'}\right)^\alpha}{\beta + \left(\frac{d_p}{d_{50}'}\right)^\alpha} \quad (E.3)$$

O diâmetro de uma determinada partícula ( $d_p$ ) pode ser obtido através do modelo de distribuição granulométrico RRB (Equação D.4).

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

Substituindo a Equação E.4 na Equação E.3 tem-se a Equação E.5.

$$G' = \frac{\left( \frac{d_{63,2}}{d_{50}'} \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - X_d} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right)^\alpha}{\beta + \left( \frac{d_{63,2}}{d_{50}'} \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - X_d} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right)^\alpha} \quad (E.5)$$

## APÊNDICE E

Substituindo a equação E.5 na E.2 obtêm-se uma equação que pode ser integrada tendo  $N$  e  $d_{63,2}$  como variáveis aleatórias. Supondo valores de  $N$  e  $d_{63,2}$ , é possível resolver a integral proposta pela junção das equações E.5 e E.2, tendo então um valor de eficiência total reduzida. Com esse valor de eficiência total reduzida encontrado é possível determinar um valor de eficiência ( $\eta$ ) utilizando a Equação E.1. Assim, fixando um valor  $N$  e supondo diferentes valores de  $d_{63,2}$  é possível formar uma série de dados sobre  $\eta$ , possibilitando a construção das curvas de eficiência. Em seguida são apresentadas curvas de eficiência referentes ao equipamento convencional (figuras E.1 a E.8) e ao equipamento filtrante (figuras E.9 a E.16).

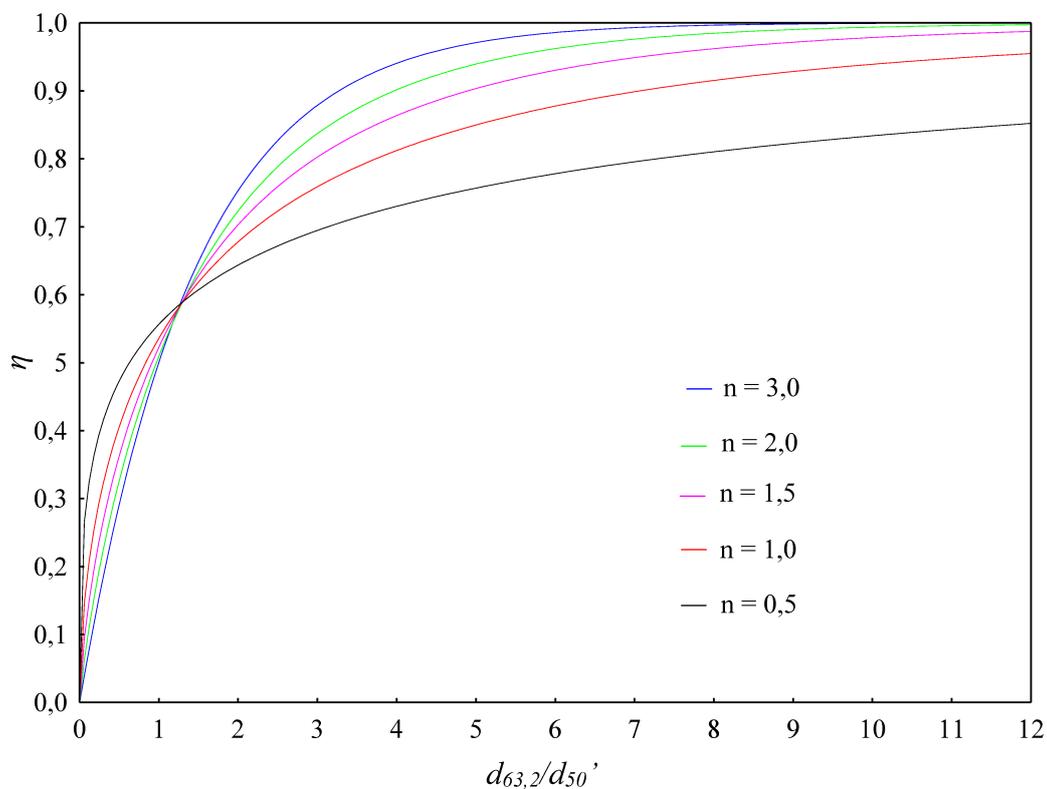


Figura E.1 – Curva de eficiência do experimento de número 4 do HC.

## APÊNDICE E

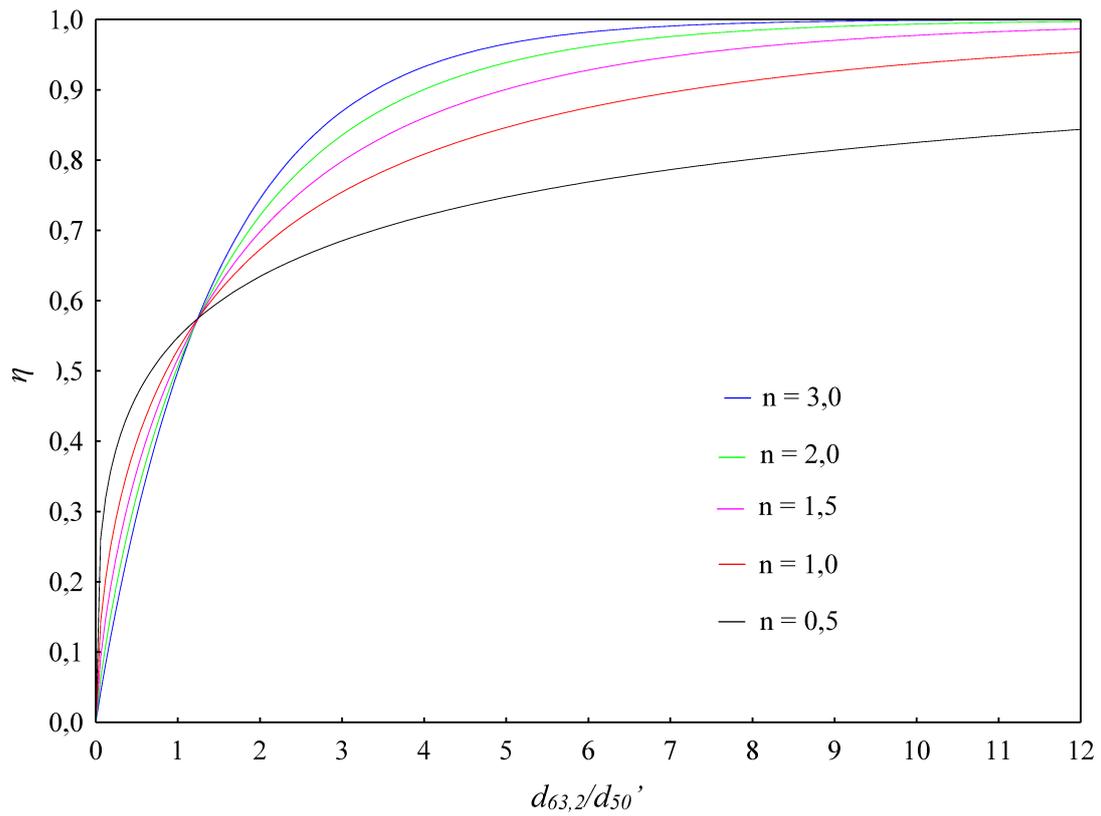


Figura E.2 – Curva de eficiência do experimento de número 7 do HC.

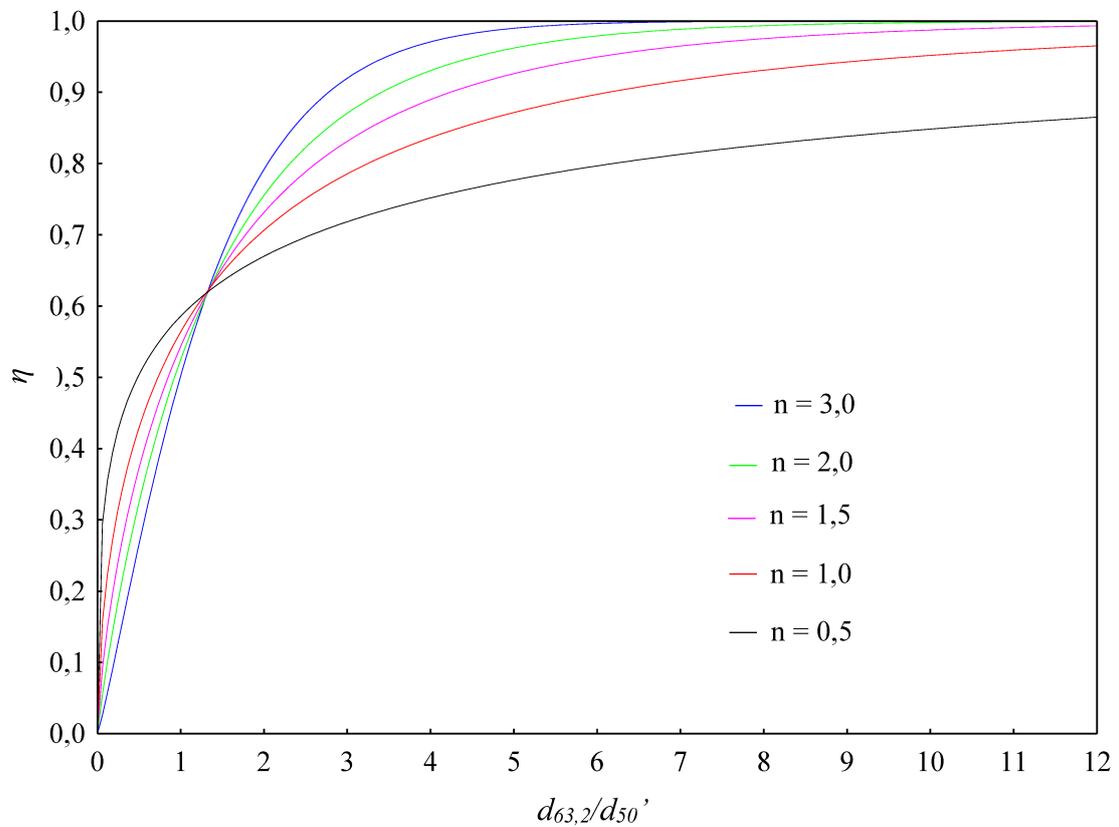


Figura E.3 – Curva de eficiência do experimento de número 10 do HC.

## APÊNDICE E

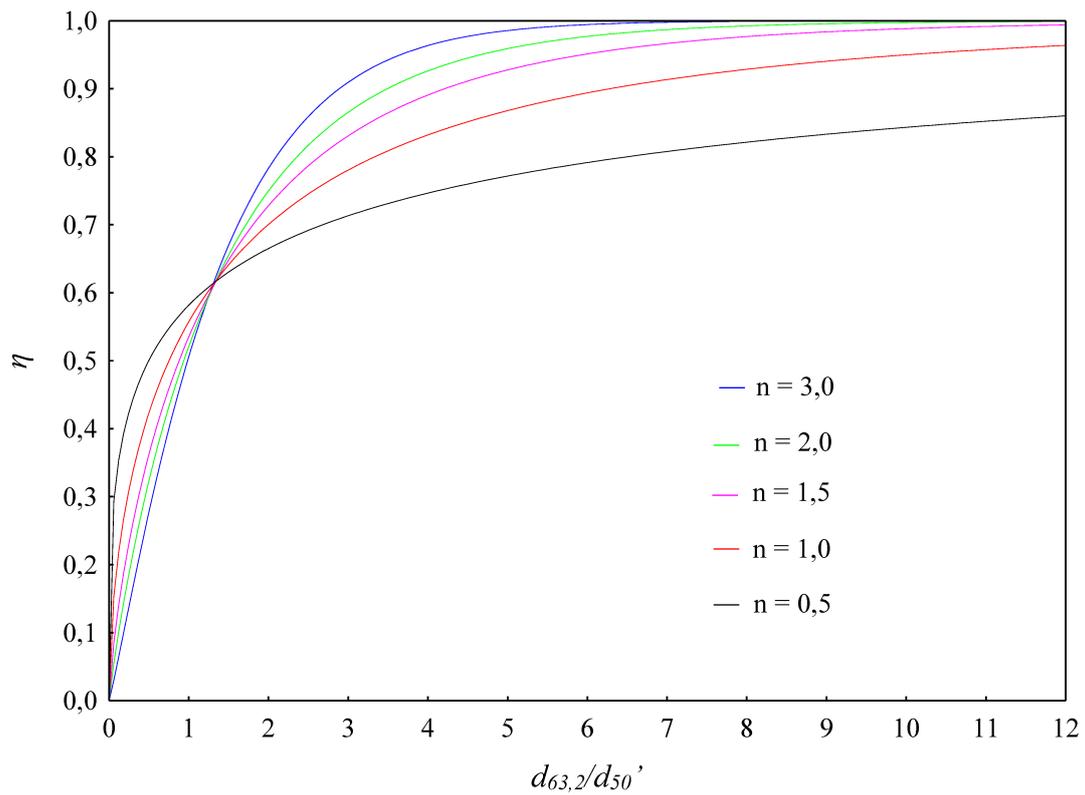


Figura E.4 – Curva de eficiência do experimento de número 13 do HC.

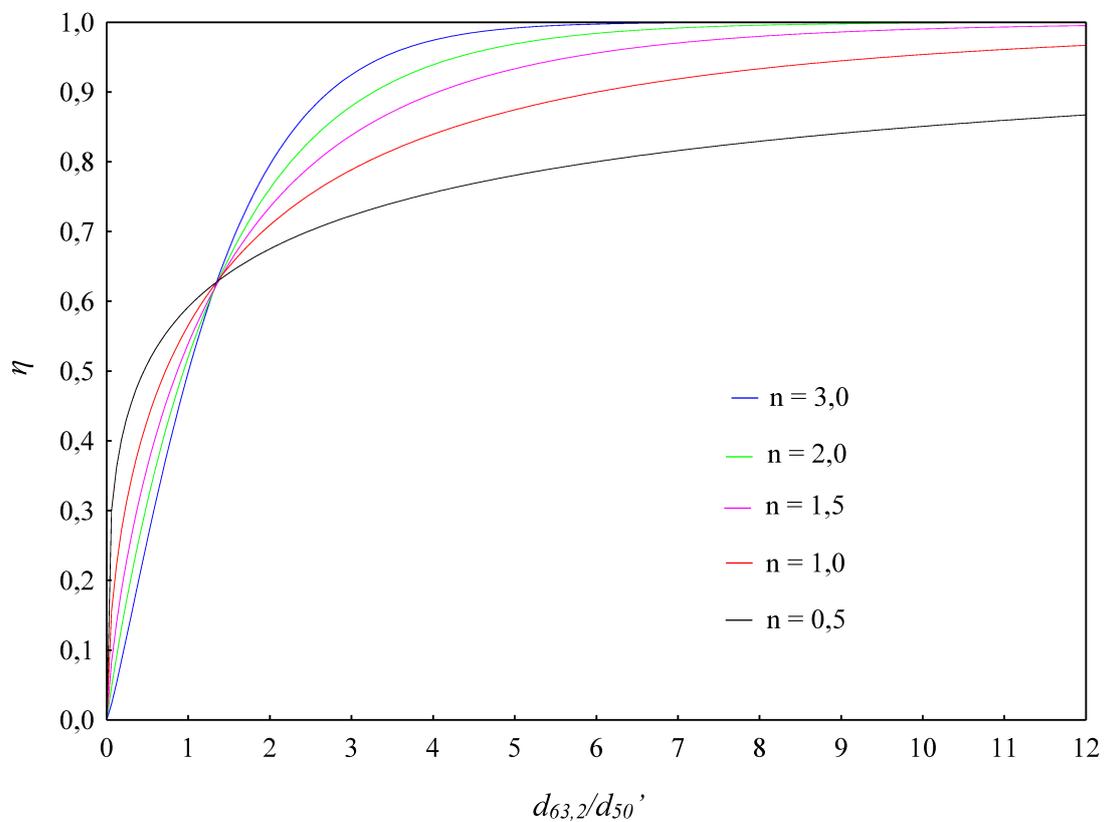


Figura E.5 – Curva de eficiência do experimento de número 16 do HC.

## APÊNDICE E

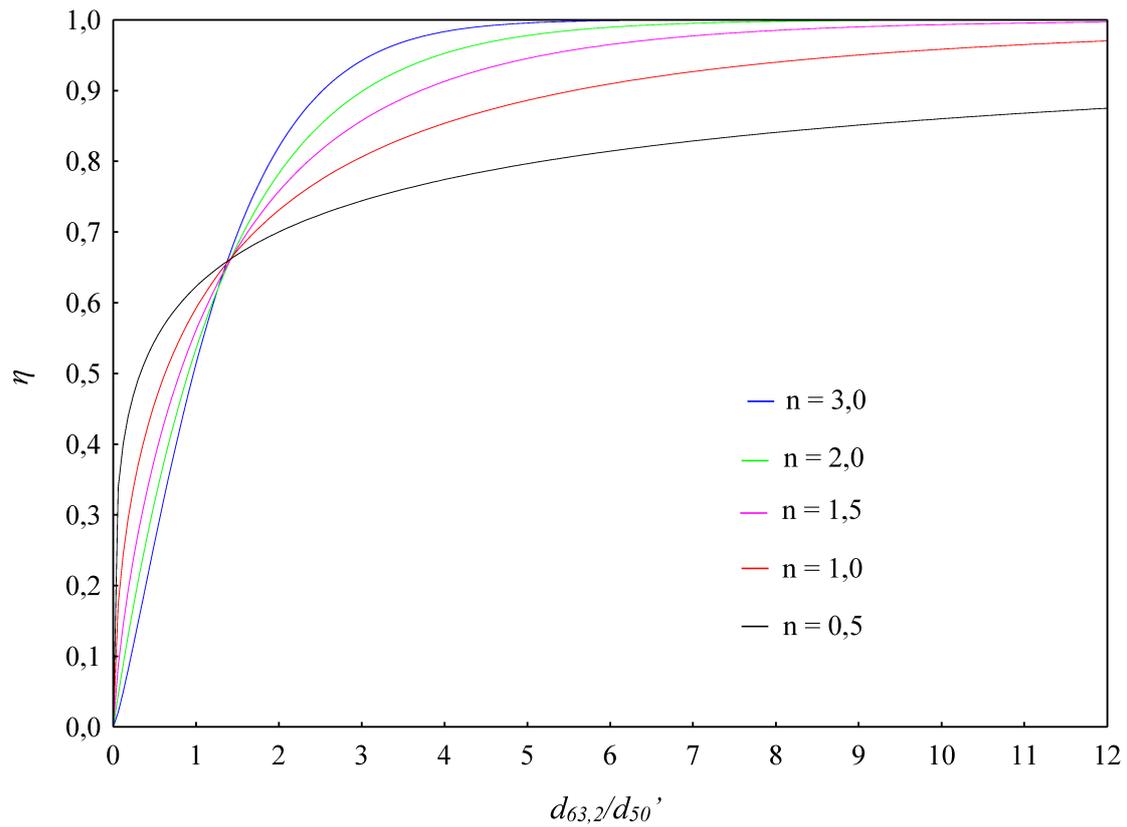


Figura E.6 – Curva de eficiência do experimento de número 19 do HC.

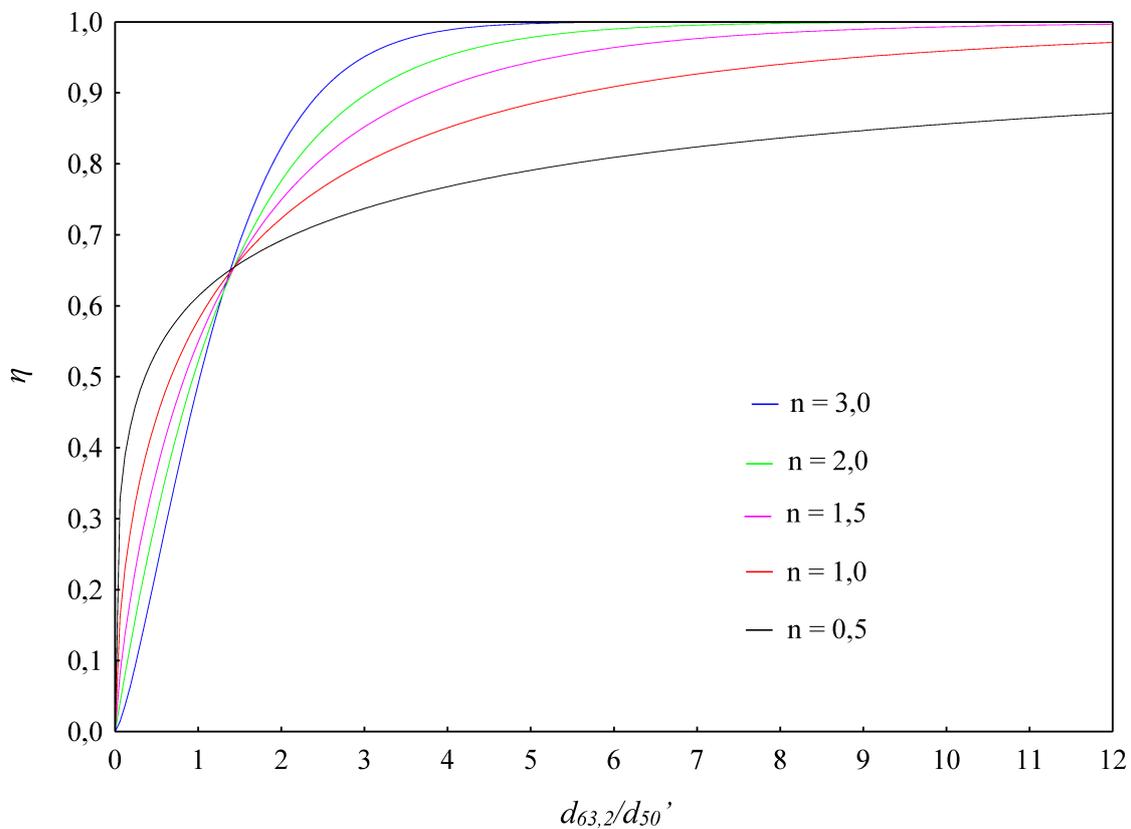


Figura E.7 – Curva de eficiência do experimento de número 22 do HC.

## APÊNDICE E

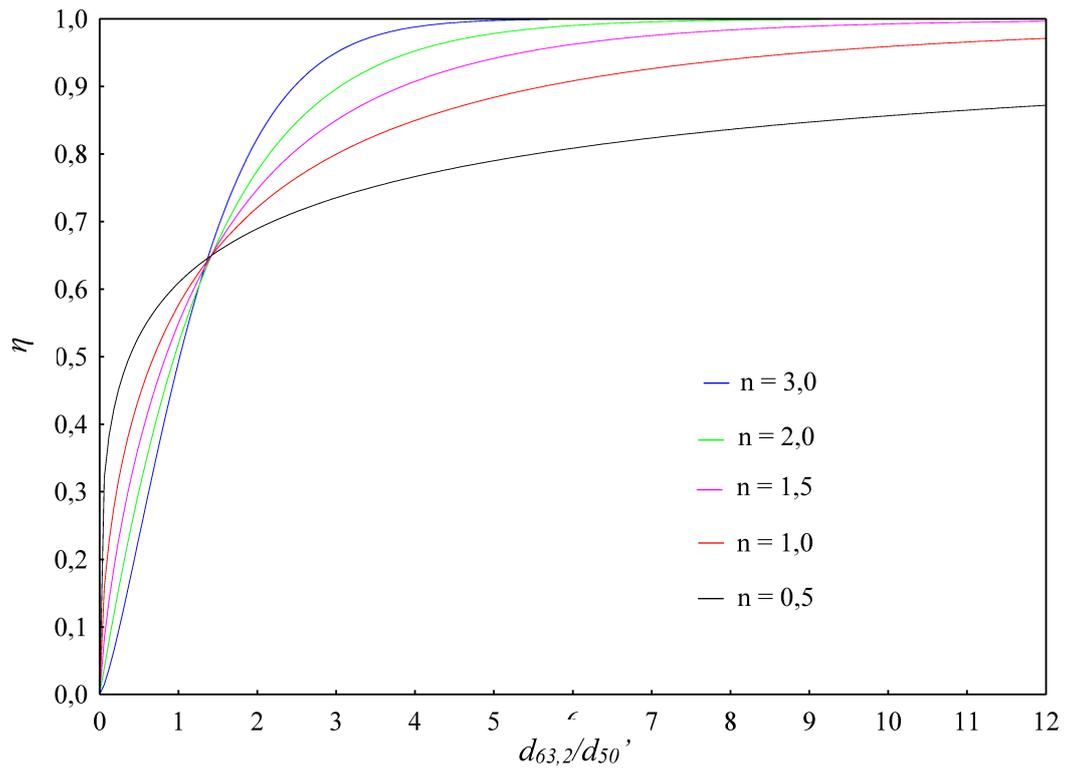


Figura E.8 – Curva de eficiência do experimento de número 25 do HC.

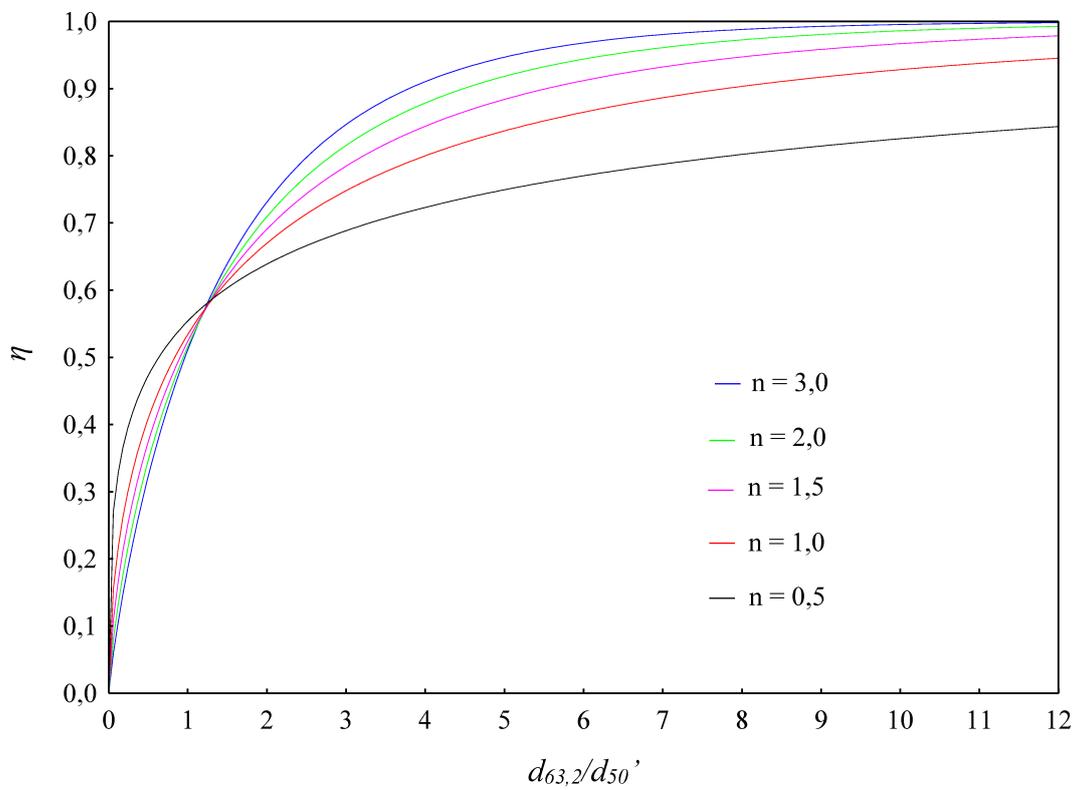


Figura E.9 – Curva de eficiência do experimento de número 4 do HF.

## APÊNDICE E

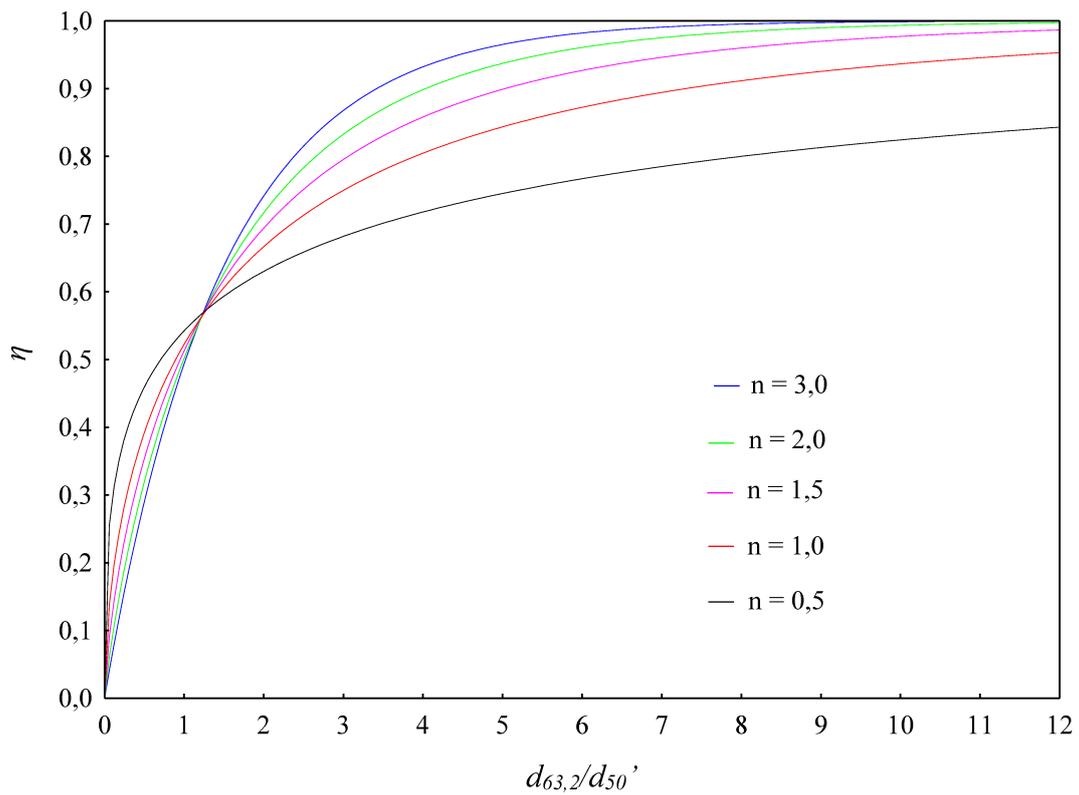


Figura E.10 – Curva de eficiência do experimento de número 7 do HF.

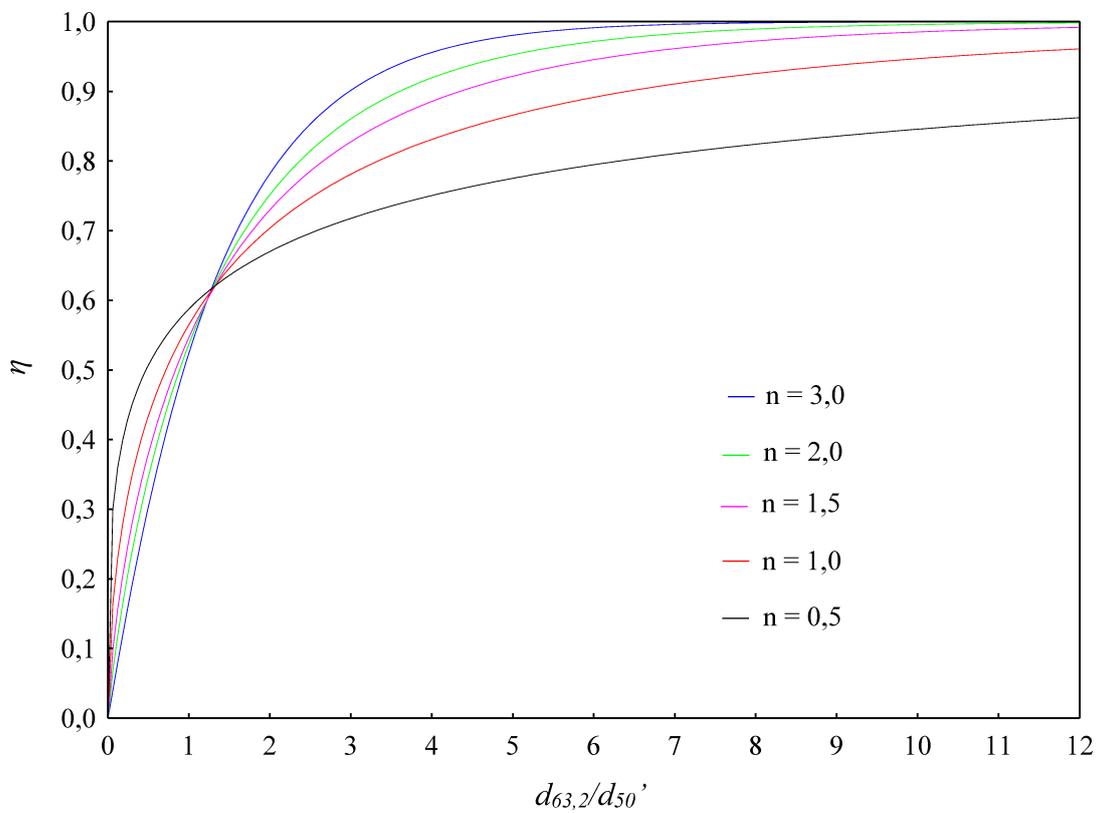


Figura E.11 – Curva de eficiência do experimento de número 10 do HF.

## APÊNDICE E

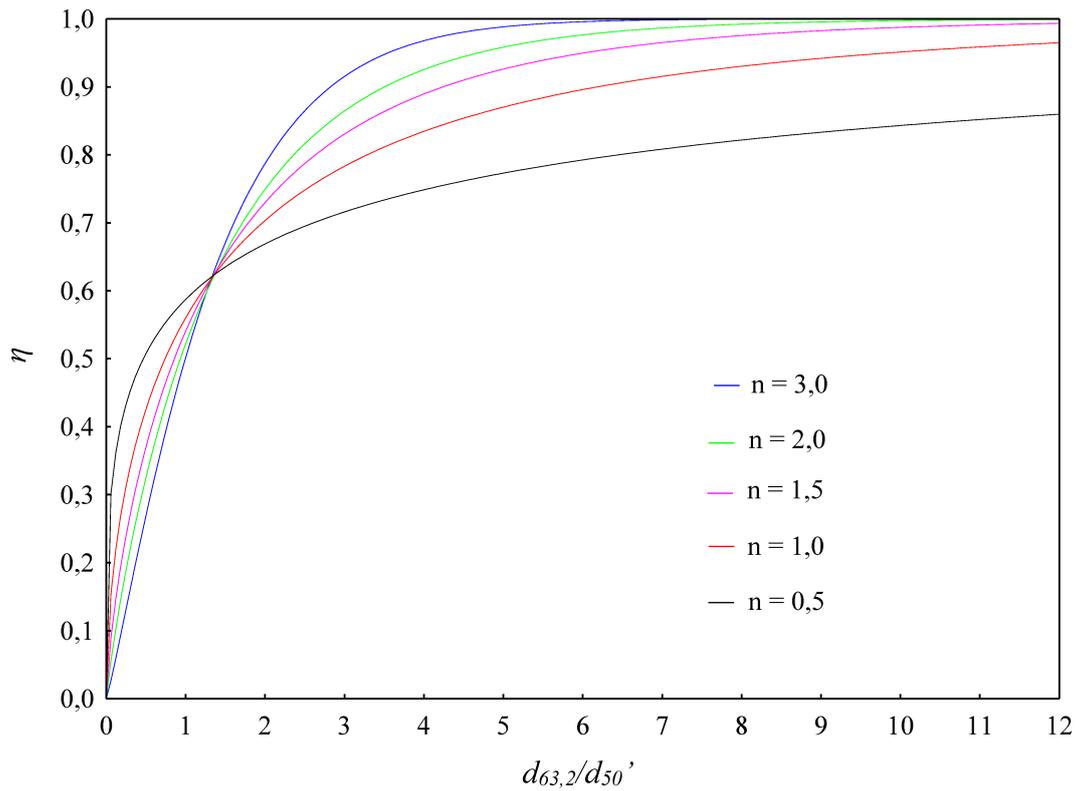


Figura E.12 – Curva de eficiência do experimento de número 13 do HF.

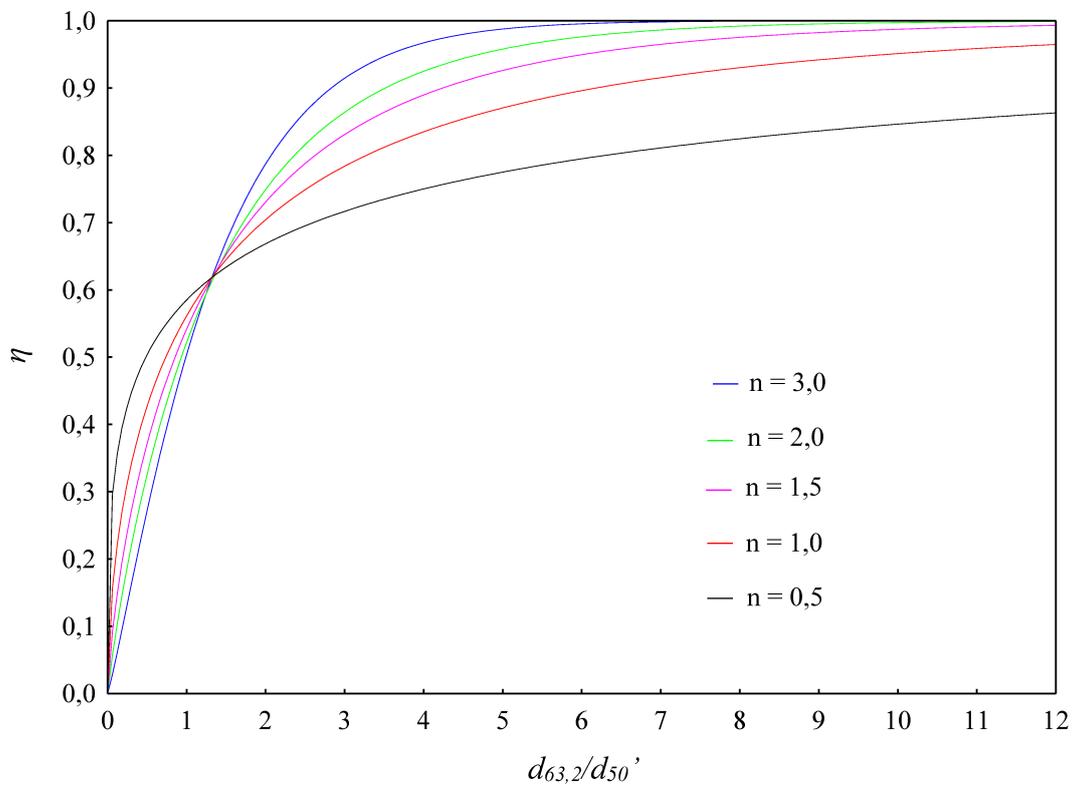


Figura E.13 – Curva de eficiência do experimento de número 16 do HF.

## APÊNDICE E

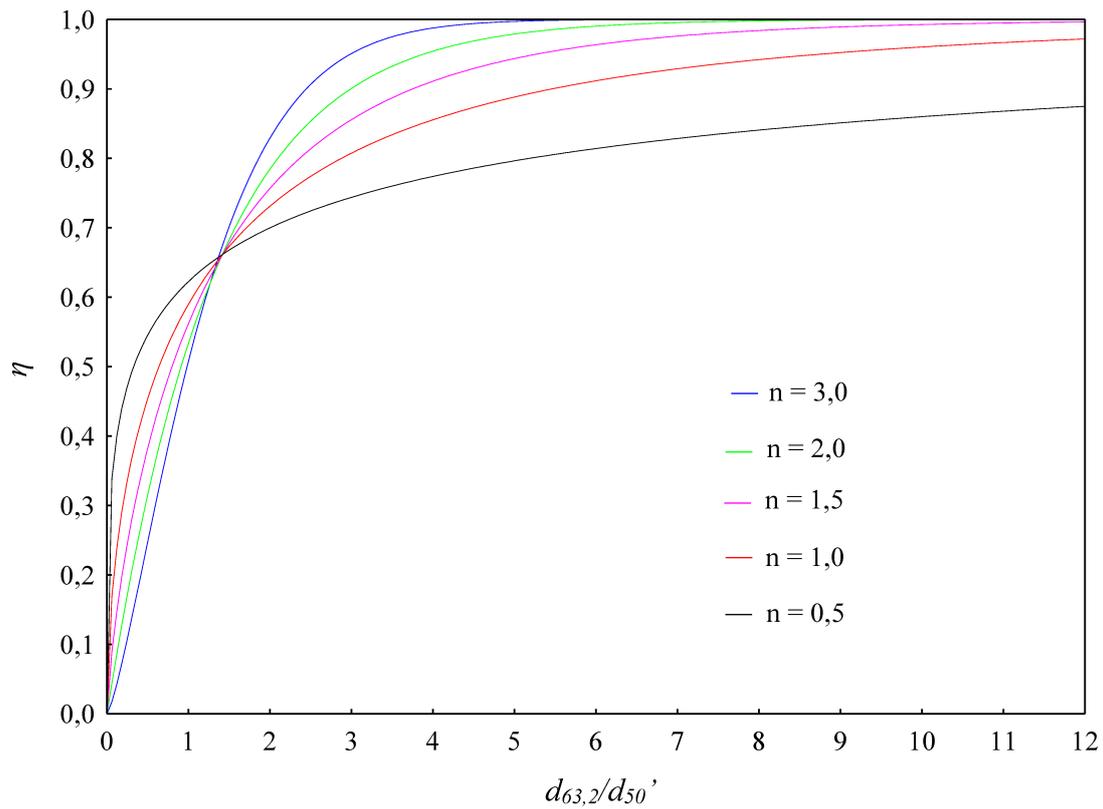


Figura E.14 – Curva de eficiência do experimento de número 19 do HF.

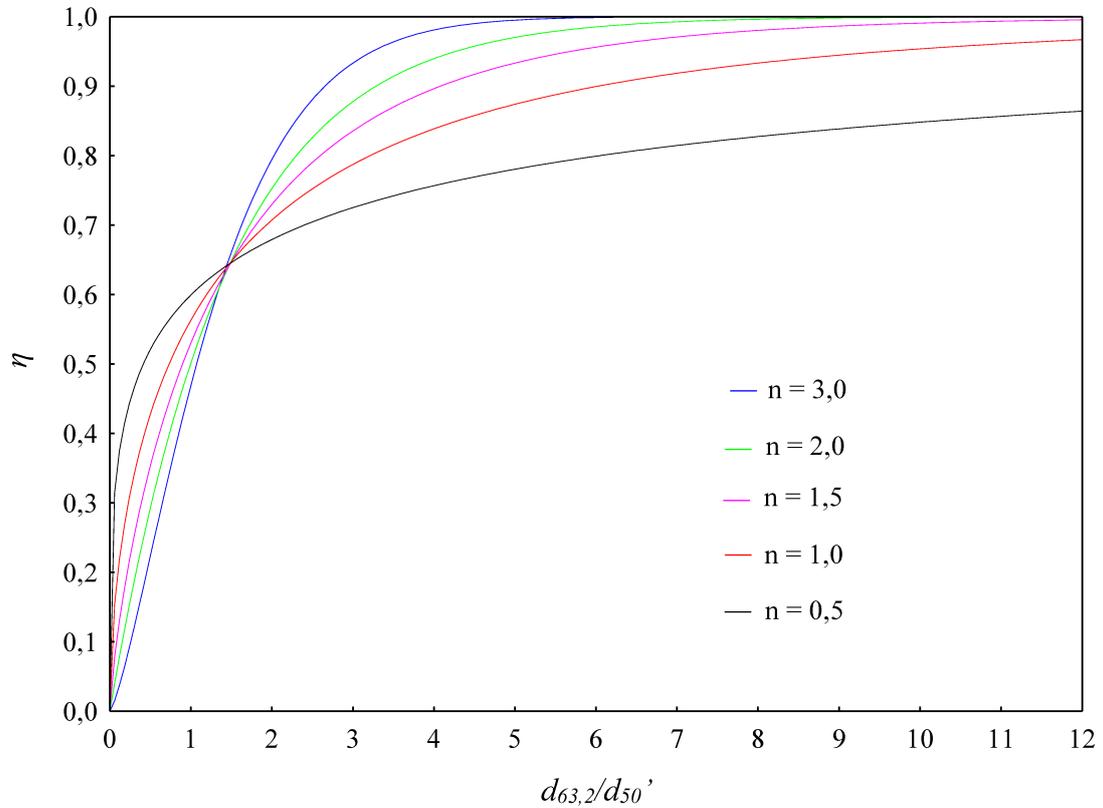


Figura E.15 – Curva de eficiência do experimento de número 22 do HF.

## APÊNDICE E

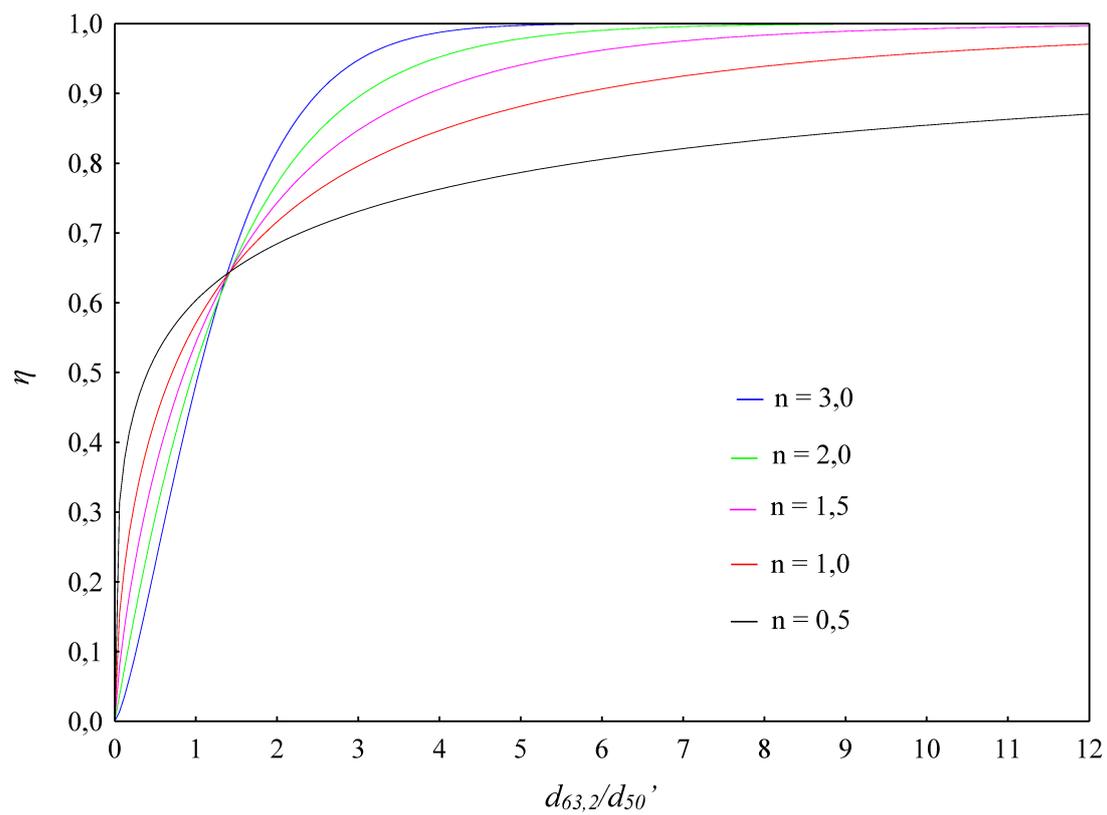


Figura E.16 – Curva de eficiência do experimento de número 25 do HF.