



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química



***ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM
DISPOSITIVO PARA PREVENÇÃO DE
ENTUPIMENTO EM HIDROCICLONES***

Joaquim Moroni da Silva

Uberlândia – MG

2021

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química

***ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM
DISPOSITIVO PARA PREVENÇÃO DE
ENTUPIMENTO EM HIDROCICLONES***

Joaquim Moroni da Silva

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte

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

Uberlândia – MG

2021

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

S586 2021	Silva, Joaquim Moroni da, 1991- Análise e desenvolvimento de um dispositivo para prevenção de entupimento em hidrociclones [recurso eletrônico] / Joaquim Moroni da Silva. - 2021. Orientador: Claudio Roberto Duarte. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.113 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Engenharia química. I. Duarte, Claudio Roberto, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. III. Título. CDU: 66.0
--------------	---

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, 05/2021, PPGEQ				
Data:	22 de fevereiro 2021	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	11:20
Matrícula do Discente:	11822EQU011				
Nome do Discente:	Joaquim Moroni da Silva				
Título do Trabalho:	Análise e desenvolvimento de um dispositivo para prevenção de entupimento em hidrociclones				
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: Lucas Meili - CTEC/UFAL; Neiton Carlos da Silva - FEQUI/UFU; Sergio Mauro da Silva Neiro - PPGEQ/UFU e Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte 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 **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/02/2021, às 11:22, 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 **Neiton Carlos da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/02/2021, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Mauro da Silva Neiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/02/2021, às 11:58, 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 **Lucas Meili, Usuário Externo**, em 22/02/2021, às 12:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2579327** e o código CRC **EF4A5A81**.

*“O passado é história. O futuro é mistério.
Mas o hoje é uma dádiva, e por isso se chama presente.”*

Oogway

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por sempre me apoiarem e me incentivarem na busca por meus objetivos.

Ao professor Claudio Roberto Duarte pela orientação, incentivo e paciência, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Carlos Henrique Ataíde por todos os ensinamentos, amizade e principalmente pela confiança dada a mim e às minhas ideias.

À Jéssika por ter estado sempre ao meu lado, me auxiliando em todas as etapas deste trabalho, se tornando fundamental para sua conclusão.

Aos amigos de laboratório, por toda ajuda e companheirismo.

À Petrobras pelos recursos financeiros disponibilizados para a execução desta pesquisa.

Enfim, a todos os meus amigos e familiares, que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste mestrado.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas	x
Lista de Símbolos	xi
Resumo	xiii
Abstract	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 HIDROCICLONES	4
2.1.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE HIDROCICLONES	7
2.1.2 HIDROCICLONES CONCENTRADORES E CLARIFICADORES	8
2.1.3 ESCOAMENTO E SEPARAÇÃO EM HIDROCICLONES	10
2.1.4 REGIMES DE OPERAÇÃO	12
2.2 HIDROCICLONES NO SISTEMA DE CONTROLE DE SÓLIDOS	14
2.3 ENTUPIMENTOS EM HIDROCICLONES.....	18
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	25
3.2 UNIDADE EXPERIMENTAL.....	26
3.3 HIDROCICLONE	27
3.4 DISPOSITIVO DESOBSTRUDOR.....	29
3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	30
3.5.1 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS	31

3.5.2	ENSAIOS DE VARREDURA ESPACIAL	34
3.5.3	ENSAIOS DE VARREDURA TEMPORAL	35
3.5.4	EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS	36
3.5.5	AÇÃO DO UCD NA PREVENÇÃO E REMEDIÇÃO DE ENTUPIMENTOS.....	36
3.6	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	38
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO		41
4.1	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	41
4.1.1	PCC EXPLORÁTORIO	41
4.1.2	VARREDURA ESPACIAL E TEMPORAL POR ENTUPIMENTOS...	47
4.1.3	EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS	50
4.1.4	AÇÃO DO UCD NA PREVENÇÃO E REMEDIAÇÃO DE ENTUPIMENTOS	53
4.2	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	55
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES		58
5.1	CONCLUSÕES	58
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - UCD	2
Figura 2.1 - Hidrociclone de construção cone-cilíndrica.	4
Figura 2.2 - Trajetória simplificada do escoamento no interior de um hidrociclone..	5
Figura 2.3 - Principais dimensões características de hidrociclones.	7
Figura 2.4 - Geometria simplificada de hidrociclones clarificadores (esquerda) e concentradores (direita)	9
Figura 2.5 - Representação das componentes de velocidade em hidrociclones.	10
Figura 2.6 - Dinâmica das forças atuantes sobre as partículas.	11
Figura 2.7 - Regimes de operação em hidrociclones.....	13
Figura 2.8 - Esquema de uma planta típica de controle de sólidos.	14
Figura 2.9 - Faixa típica de operação dos equipamentos que constituem o sistema de controle de sólidos.....	15
Figura 2.10 - Baterias de hidrociclones no sistema de controle de sólidos	17
Figura 2.11 - Hidrociclone com diluidor de <i>underflow</i>	19
Figura 2.12 - Injeção axial de líquido para limpeza de hidrociclones.	20
Figura 2.13 - Hidrociclone com injetor de fluido e duto de saída adicional.	21
Figura 2.14 - Hidrociclone com dispositivo de diluição bidirecional.	22
Figura 2.15 - Ajuste mecânico do diâmetro de abertura do <i>underflow</i>	23
Figura 2.16 - Supressão do <i>air core</i> causada pela presença do UCD.....	24
Figura 3.1 - Distribuição granulométrica da rocha fosfática.	25
Figura 3.2 - Comparação entre o material utilizado nos ensaios e o material real do campo.	26
Figura 3.3 - Bancada de hidrociclonagem.	27
Figura 3.4 - Geometria do hidrociclone otimizado por Mognon et al. (2015).	28
Figura 3.5 - Hidrociclone modular.	28
Figura 3.6 - Vistas em corte do UCD.	29
Figura 3.7 - Modelos de acionamentos mecânicos do UCD.	30
Figura 3.8 - Ajuste manual da posição do UCD utilizado nos ensaios.	30
Figura 3.9 - Cronologia dos ensaios experimentais.....	31

Figura 3.10 - Rotinas para o acionamento do UCD: a) na remediação e b) na prevenção de entupimentos.....	38
Figura 3.11 – Exemplo de malha computacional.	40
Figura 4.1 - Resultados do PCC Exploratório.	41
Figura 4.2 - Superfícies de Resposta.	44
Figura 4.3 - Número de Euler.....	46
Figura 4.4 - Obstruções causadas pelo deslocamento do UCD.....	48
Figura 4.5 - Efeito da porcentagem de área obstruída na concentração de sólidos.	48
Figura 4.6 - Varredura Temporal por Entupimentos	49
Figura 4.7 - Efeito da porcentagem de obstrução no Número de Euler.	50
Figura 4.8 - Efeito da concentração da alimentação na ocorrência de entupimentos....	51
Figura 4.9 - Ação do UCD na prevenção e na remediação de entupimentos.	53
Figura 4.10 - Perfis de distribuição de pressão ao longo do hidrociclone para diferentes posições do UCD.	56
Figura 4.11 - Perfis de distribuição de fases (ar/água) no interior do hidrociclone na ausência (à esquerda) e na presença do UCD com $Z = 68\%$ (à direita).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relações geométricas das principais famílias de hidrociclones.....	8
Tabela 3.1 - Matriz do Planejamento de Experimentos.....	33
Tabela 3.2 - Posicionamento do UCD nos ensaios de Varredura Espacial.....	35
Tabela 3.3 - Condições de contorno e modelo adotados nas simulações.....	39
Tabela 4.1 - Resultados do PCC Exploratório.....	42
Tabela 4.2 - Comparação dos ensaios 12 e 12'	47

LISTA DE ABREVIATURAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
PCC	Planejamento Composto Central
UCD	<i>Unclog Conical Device</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Ângulo de abertura do UCD	[-]
ΔP	Queda de Pressão	[ML ⁻¹ T ⁻²]
η	Eficiência Total de Separação	[%]
η'	Eficiência Reduzida de Separação	[%]
θ	Ângulo da sessão cônica do hidrociclone	[-]
ρ	Densidade do fluido	[ML ⁻³]
A_D	Área do dispositivo obstruindo o escoamento	[L ²]
A_U	Área do duto de <i>underflow</i>	[L ²]
C_A	Concentração mássica de sólidos na alimentação	[-]
CC	Capacidade Concentradora	[-]
C_U	Concentração mássica de sólidos no <i>underflow</i>	[-]
D_C	Diâmetro da seção cilíndrica	[L]
D_i	Diâmetro do orifício de alimentação	[L]
D_o	Diâmetro do orifício de <i>overflow</i>	[L]
D_u	Diâmetro do orifício de <i>underflow</i>	[L]
Eu	Número de Euler	[-]
H	Comprimento do tronco de cone	[L]
ℓ	Comprimento de <i>vortex finder</i>	[L]
L	Comprimento total do hidrociclone	[L]
L'	Distância entre o UCD e o orifício do <i>underflow</i>	[L]
L_C	Comprimento da seção cilíndrica	[L]
L_V	Distância característica do <i>vortex finder</i>	[L]
P	Pressão	[ML ⁻¹ T ⁻²]

R_L	Razão de Líquido	[%]
v_c	Velocidade na seção cilíndrica	[LT ⁻¹]
V_θ	Componente tangencial da velocidade	[LT ⁻¹]
V_A	Componente axial da velocidade	[LT ⁻¹]
V_R	Componente radial da velocidade	[LT ⁻¹]
W_A	Vazão mássica do corrente de alimentação	[MT ⁻¹]
W_U	Vazão mássica do <i>underflow</i>	[MT ⁻¹]
Z	Porcentagem obstruída da área do orifício de <i>underflow</i>	[%]

RESUMO

O entupimento dos hidrociclones que fazem parte do sistema de controle de sólidos da indústria do petróleo é um problema operacional recorrente. Isso ocorre, principalmente, devido à aglomeração de sólidos finos no duto de *underflow* e também devido à incidência de partículas com tamanhos superiores aos especificados para o equipamento. Outro problema comum e que resulta na redução do desempenho de separação é a formação de um núcleo de ar na zona de baixa pressão do separador. Para minimizar esses problemas, foi desenvolvido neste estudo um dispositivo inovador para ser utilizado acoplado à saída do *underflow* do hidrociclone. O objetivo de tal dispositivo, denominado UCD (*Unclog Conical Device*), é de ajustar mecanicamente a área do duto de *underflow*, de forma rápida e precisa, e assim criar oscilações nos fluxos internos de modo a evitar e/ou remediar entupimentos, além de impedir a formação de núcleo de ar. Para alcançar tais objetivos, foram realizados ensaios que visaram a obtenção de um maior entendimento do processo de entupimento, através dos quais se chegou a condições nas quais o dispositivo foi capaz não só de prevenir entupimentos como de aumentar a capacidade concentradora do separador de 2,5 para 11,2, ao atuar no que foi chamado de situações de pré-entupimento. Em paralelo foram conduzidas simulações numéricas que provaram a tendência de supressão do *air core* devido a presença do UCD nas condições estudadas.

Palavras-chave: *Unclog conical device*, sistema de controle de sólidos, obstrução, separação sólido-líquido, simulações numéricas.

ABSTRACT

The clogging of hydrocyclones that are part of the solids control system in the oil industry is a recurrent operational problem. This occurs, mainly, due to the agglomeration of fine solids in the underflow duct and also due to the incidence of particles with a higher size range than those specified for the equipment. Another common issue, which results in a poor performance, is the formation of an air core in the low-pressure zone of the separator. In this study, an innovative device, attached to the underflow output of the hydrocyclone, was developed in order to minimize those problems. Named UCD (Unclog Conical Device), the device intends to mechanically adjust the apex area, in a fast and accurate manner, and thus create oscillations in inlet pressure and flows, constituting a safety system to prevent and remedy clogging and air core formation. To achieve such objectives, tests were conducted to comprehend the clogging process, through which were found conditions which the device was able not only to prevent cloggings but also increase the concentration capacity of the separator of 2,5 to 11,2, while acting in what was labeled “pre-clogging situation”. In parallel, numerical simulations were also conducted, proving a tendency of air core suppression due to the presence of the UCD in the studied conditions.

Keywords: Unclog conical device, solids control system, obstruction, solid-liquid separation, numerical simulation.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Na perfuração de poços de petróleo e gás ocorre a geração de uma suspensão formada pelos detritos de rochas gerados pela ação da broca ao perfurar o poço e pelo fluido de perfuração responsável por carrear esses cascalhos até a superfície, onde esta mistura sólido-líquido deve ser então submetida a processos de separação. O conjunto de equipamentos responsáveis por promover essa separação é denominado sistema de controle de sólidos e seu principal objetivo é permitir que o fluido recuperado possa ser injetado novamente ao poço, reduzindo assim os custos da operação (SANTOS, 2018).

Dentre os equipamentos comumente utilizados no sistema de controle de sólidos se destacam as peneiras vibratórias nas quais são removidos os sólidos mais grosseiros, as baterias de hidrociclones responsáveis por remover as partículas na faixa da areia e do silte e as centrífugas decantadoras que retiram os sólidos ultrafinos (MOGNON, 2015; PETRI, 2017).

Devido aos problemas operacionais relacionados ao uso das centrífugas decantadoras em sondas *offshore*, tais como baixa capacidade de processamento, alto custo de instalação, operação e manutenção e necessidade de grande espaço para sua instalação, trabalhos antecessores a este propuseram a utilização de baterias de mini-hidrociclones (microcones) otimizados em apoio às centrífugas decantadoras. O objetivo desta nova bateria seria promover uma maior remoção de material fino do fluido sem a necessidade de aumentar o número de centrífugas presentes no sistema (MOGNON et al, 2015; MOGNON et al, 2016).

Entretanto, de acordo com Panisset (2014) a ocorrência de entupimentos é um problema recorrente dos hidrociclones que compõem o sistema de controle de sólidos devido principalmente à aglomeração de sólidos finos no duto de *underflow* e à incidência de partículas com tamanhos superiores aos especificados para o equipamento. Sendo assim, apesar de altamente eficientes, a geometria dos novos mini-hidrociclones os deixa ainda mais suscetíveis a apresentarem problemas de entupimento, devido, principalmente à alta concentração das suspensões que os alimentam em paralelo ao seu reduzido diâmetro de *underflow* (SILVA et al., 2020).

Apesar da ocorrência de entupimentos se tratar de um problema recorrente nas linhas industriais de hidrociclonagem, atualmente não há praticamente nenhuma solução comercial visando sua prevenção e/ou remediação. A maioria das empresas, geralmente, recorre a operações manuais de limpeza para promover o desentupimento dos hidrociclones comprometidos, enquanto que na literatura são encontradas algumas patentes propondo a injeção de um líquido diluente no interior dos hidrociclones utilizados, principalmente, na indústria de papel e celulose (FRYKHULT, 1974; HARTMANN, 2001; CALDELMAN, 2006; KUCHER et al., 2018).

Apesar de se mostrarem eficientes, os métodos de desentupimento que envolvem diluição interna não são indicados para serem utilizados nos hidrociclones do sistema de controle de sólidos, uma vez que suas baterias possuem restrição em relação à quantidade de suspensão concentrada que é descarregada pelo *underflow*, já que esta suspensão segue para outros processos de separação, que seriam sobrecarregados, e talvez até perdessem em eficiência, devido ao excesso de líquido presente em caso de diluição.

Visando minimizar os problemas relacionados aos entupimentos de hidrociclones, especialmente dos hidrociclones utilizados no sistema de controle de sólidos, foi desenvolvido e testado ao longo deste trabalho, um dispositivo que ao ser acoplado a saída do duto de *underflow* fosse capaz de ajustar mecanicamente a área do seu duto de *underflow*, criando oscilações nos fluxos internos do hidrociclone de modo a evitar e/ou remediar entupimentos sem a necessidade de promover a diluição interna. Tal dispositivo foi denominado UCD (*Unclog Conical Device*) e pode ser visualizado na Figura 1.1.

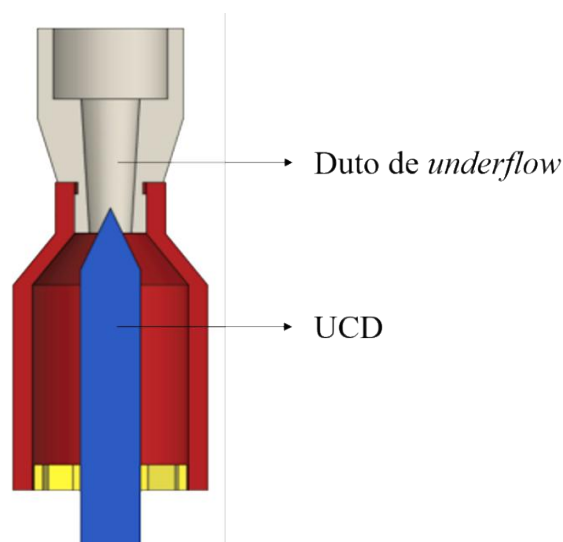


Figura 1.1 – UCD (SILVA, 2021)

1.1 OBJETIVOS

Diante do exposto até aqui, este trabalho teve como objetivo geral projetar, instalar e avaliar o desempenho de um dispositivo mecânico desenvolvido para prevenir e/ou remediar o entupimento de hidrociclones sem a necessidade de técnicas de diluição interna.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- Analisar a estabilidade e usabilidade do dispositivo proposto;
- Avaliar o efeito da obstrução gerada pela inserção do dispositivo nas correntes do hidrociclone e na formação do *air core*;
- Mapear zonas de entupimento e analisar o efeito da concentração da alimentação durante o processo de entupimento;
- Avaliar a capacidade do dispositivo proposto de prevenir e remediar entupimentos;
- Analisar a fluidodinâmica do processo na presença do dispositivo através de simulações numéricas.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos e fundamentos teóricos sobre a separação sólido-líquido utilizando hidrociclones. Serão mostrados os principais tipos e famílias de hidrociclones, como é sua dinâmica de escoamento e como se dá sua utilização no sistema de controle de sólidos da indústria petrolífera. Já ao final do capítulo, será abordado um dos principais problemas operacionais relacionado a sua utilização: a ocorrência de entupimentos e o que vem sendo feito visando sua prevenção e/ou remediação.

2.1 HIDROCICLONES

Também denominados ciclones hidráulicos, os hidrociclones consistem em dispositivos versáteis de separação (sólido-líquido e líquido-líquido) amplamente utilizados na indústria há mais de 100 anos. Apresentando altas eficiências de separação quando aplicados a materiais particulados na faixa de 5 a 400 μm , podem ser encontrados em diversos setores industriais, como por exemplo no setor de mineração, têxtil, alimentício, petroquímico e metalúrgico (ALMEIDA, 2008; BICALHO, 2011).

Os hidrociclones são classificados como separadores centrífugos e possuem, geralmente, construção cone-cilíndrica, ausência de partes móveis, uma entrada lateral e duas saídas orientadas no eixo central do equipamento, como é mostrado na Figura 2.1.

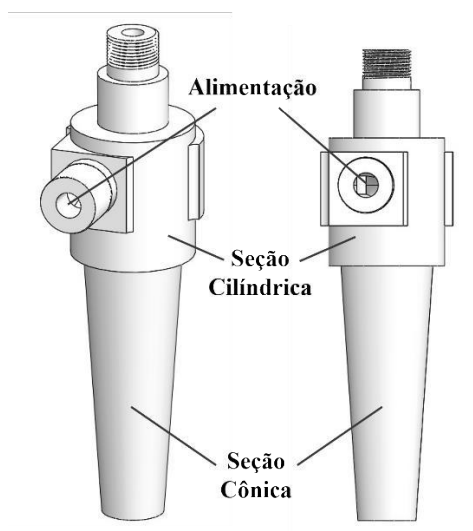


Figura 2.1 - Hidrociclone de construção cone-cilíndrica. (SILVA, 2021)

O princípio básico de separação de um hidrociclone é a decantação centrífuga. A mistura é alimentada na lateral da parte cilíndrica, geralmente, de forma tangencial e adquire movimento rotacional ao longo de sua trajetória (Figura 2.2). Este movimento rotacional gera um campo centrífugo no interior do separador que força as partículas a se moverem em direção à parede do equipamento. Devido ao diâmetro reduzido do orifício da parte cônica (diâmetro do *underflow*), grande parte da mistura que foi alimentada não consegue ser descarregada ali e ascende, invertendo seu sentido de rotação, através de um vórtice interno que circunda o eixo central do equipamento até o duto de saída superior (*overflow*) (VIEIRA, 2006).

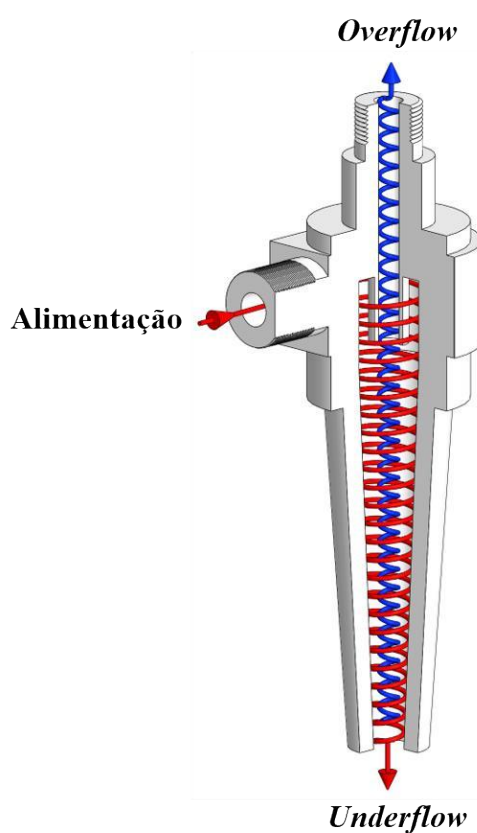


Figura 2.2 - Trajetória simplificada do escoamento no interior de um separador ciclônico (SILVA, 2021)

As partículas maiores e mais densas irão, devido à ação da força centrífuga, se direcionar à parede do equipamento, por onde irão escoar, em movimento helicoidal até a saída inferior (*underflow*). Este movimento das partículas irá ocorrer em função do arraste pela gravidade e do atrito com a parede. Já as partículas menores e menos densas, tenderão a migrar em direção ao centro do equipamento, por onde irão ascender pela saída superior juntamente com a maior parte do fluido alimentado ao separador (CREMASCO, 2014).

Além das partículas separadas das correntes de fluido pelo campo centrífugo, outra parcela também será arrastada para o *underflow* devido à divisão natural de fluxo que ocorre nos separadores ciclônicos. Como estes tipos de equipamentos possuem uma entrada e duas saídas, eles agem como se fosse uma conexão T, e por esse motivo, tal efeito é conhecido como “Efeito T” (SILVA, 2012).

Uma das grandes vantagens da utilização de hidrociclones frente a outros separadores centrífugos é a sua simplicidade de construção e o fato de não apresentarem partes móveis. Outras vantagens de sua aplicação são apresentadas por Svarovsky (2000):

- Possuem grande versatilidade podendo ser utilizados para clarificar líquidos, concentrar suspensões, classificar sólidos, separar líquidos imiscíveis, entre outros;
- São equipamentos simples, de baixo custo de aquisição, instalação e operação, e requererem pouca manutenção;
- Apresentam tamanho reduzido quando comparado a outros equipamentos de separação, característica importante para quando a disponibilidade de espaço é limitada;
- As grandes tensões cisalhantes existentes em seu interior durante seu funcionamento é uma vantagem quando o interesse é a classificação de sólidos, uma vez que provocam a quebra de aglomerados.

Svarovsky (2000) também destaca as principais desvantagens da aplicação de hidrociclones:

- Após a sua instalação e operação, é um equipamento de certa forma inflexível devido a sua grande sensibilidade às variações na vazão e concentração de sólidos da alimentação;
- Existem limitações quanto a sua capacidade de concentração e clarificação. Essas limitações podem ser superadas com o uso de operações multiestágios, porém com um maior custo e espaço requerido;
- São suscetíveis à abrasão e à entupimentos.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE HIDROCICLONES

Como já citado, um hidrociclone típico é constituído por uma seção cônica, com uma abertura na sua parte mais estreita denominada *underflow*, unida a uma seção cilíndrica, que tem uma entrada de alimentação tangencial. O topo da seção cilíndrica é fechado com uma placa através da qual passa, axialmente, um tubo de descarga (*overflow*). O tubo é prolongado para dentro do corpo do hidrociclone por uma seção curta conhecida como *vortex finder* (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

As principais dimensões características de um hidrociclone convencional são mostradas na Figura 2.3. São elas: comprimento total do hidrociclone (L), comprimento da parte cilíndrica (L_c), comprimento do tronco de cone (H), comprimento de *vortex finder* (ℓ), diâmetro da parte cilíndrica (D_c), diâmetro da alimentação (D_i), diâmetro de *overflow* (D_o), diâmetro de *underflow* (D_u), e o ângulo do tronco de cone (θ).

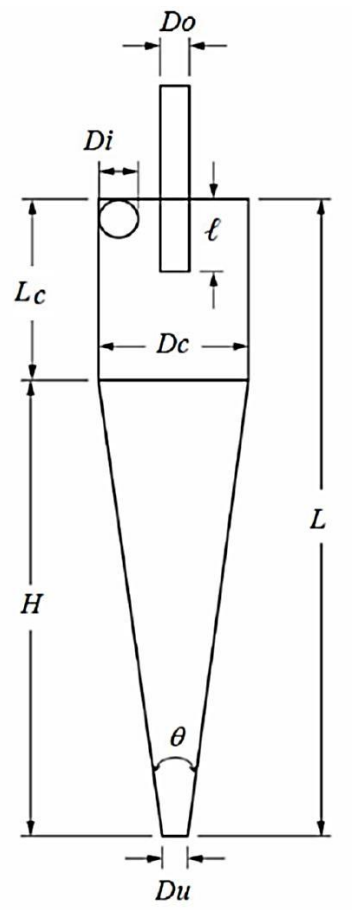


Figura 2.3 - Principais dimensões características de hidrociclones.
(Adaptada de VIEIRA, 2006).

Os hidrociclones são agrupados em famílias. Cada família possui como característica a manutenção da proporção entre suas principais dimensões geométricas em relação ao diâmetro da parte cilíndrica (D_c). Tal proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é importante no processo de separação, pois está diretamente relacionada com a capacidade de separação destes equipamentos (CREMASCO, 2018).

Na Tabela 2.1 são apresentadas as proporções geométricas das principais famílias de hidrociclones.

Tabela 2.1 - Relações geométricas das principais famílias de hidrociclones.
(Adaptada de VIEIRA, 2006; CRUZ, 2008; SILVA, 2012)

Família	D_i/D_c	D_o/D_c	ℓ/D_c	L/D_c	θ
AKW	0,200	0,320	0,800	6,240	15°
BRADLEY	0,133	0,200	0,330	6,850	9°
DEMCO I	0,217	0,500	1,000	4,700	25°
DEMCO II	0,244	0,313	0,833	3,900	20°
HI-KLONE	0,175	0,250	0,920	5,600	10°
KREBS	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
MOSLEY I	0,154	0,214	0,570	7,430	6°
MOSLEY II	0,160	0,250	0,570	7,710	6°
RIETEMA	0,280	0,340	0,400	5,000	20°
RW 2515	0,200	0,320	0,800	6,240	15°
WARMAN	0,290	0,200	0,310	4,000	15°

2.1.2 HIDROCICLONES CONCENTRADORES E CLARIFICADORES

Dada a grande versatilidade dos hidrociclones, sua construção pode ser realizada objetivando uma série de diferentes funções dependendo de sua aplicação final. Quando utilizados para separação sólido-líquido, os hidrociclones podem ser divididos em duas categorias: hidrociclones concentradores (espessadores) ou hidrociclones clarificadores (SVAROVSKY, 2000).

Os hidrociclones concentradores são equipamentos desenvolvidos com o objetivo de gerar uma corrente de *underflow* com a menor quantidade de líquido possível e altas concentrações de sólidos. Dessa forma, são equipamentos que apresentam eficiências de

separação total não tão altas, o que consequentemente traz uma maior quantidade de sólidos na corrente clarificada (*overflow*) (SVAROVSKY, 2000; ALVES, 2019).

Geralmente, os hidrociclones concentradores apresentam região cônica larga, isto é, grandes ângulos de inclinação (superiores a 25°). Segundo Svarovsky (2000), hidrociclones com uma região cônica mais larga apresentam uma zona de recirculação de partículas em seu interior que permite uma melhor classificação do material, pois os finos são mais facilmente suspensos pelos fluxos radiais e axiais e assim removidos da corrente do *underflow*. Além disso, os choques do fluido com as paredes em grande inclinação propiciam um acúmulo rápido de sólidos nas paredes, o que favorece o processo de concentração (MOGNON, 2015; SILVA, 2019).

Já os hidrociclones clarificadores são construídos de modo a produzir correntes de *overflow* o mais límpidas possível, sendo projetados para garantir uma alta eficiência de separação. Como é necessário um maior redirecionamento de fluxo para a corrente de *underflow*, a capacidade concentradora desse equipamento é baixa, sendo a corrente de *underflow* diluída. Por possuírem ângulos estreitos de tronco de cone, os fluxos de circulação são suprimidos e isso os tornam eficientes para a separação de partículas finas. São hidrociclones utilizados sempre que o diâmetro de corte necessário é relativamente baixo, como em processos de clarificação, no espessamento e na classificação de materiais finos (MOGNON, 2015; ALVES, 2019).

A Figura 2.4 apresenta uma ilustração das geometrias clássicas de hidrociclones clarificadores e concentradores.

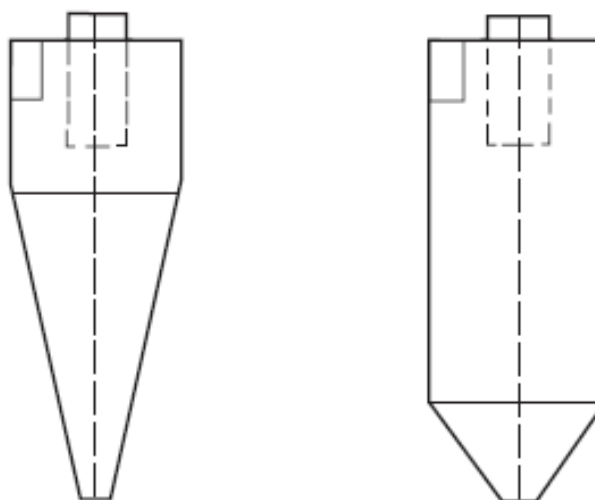


Figura 2.4 - Geometria simplificada de hidrociclones clarificadores (esquerda) e concentradores (direita) (SVAROVSKY, 2000).

2.1.3 ESCOAMENTO E SEPARAÇÃO EM HIDROCICLONES

A eficiência de separação de um hidrociclone está intimamente relacionada ao escoamento da suspensão em seu interior, sendo este, complexo, altamente turbulento e tridimensional (SRIPRIYA et al., 2007). Para sua descrição, é comum utilizar três componentes de velocidade no sistema de coordenadas cilíndricas, centrado geometricamente no eixo do hidrociclone, como ilustra a Figura 2.5.

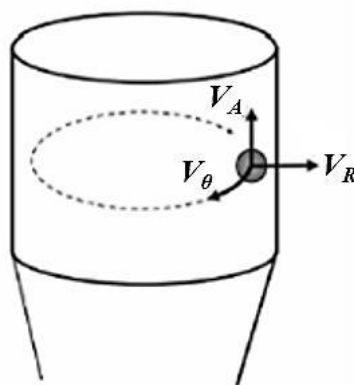


Figura 2.5 - Representação das componentes de velocidade em hidrociclones.
(Adaptada de BERGSTROM, 2007)

A mais significativa das três componentes da velocidade é a tangencial (V_θ) (BRADLEY, 1965). Essa componente é responsável por gerar as forças centrífugas e de cisalhamento que atuam em um hidrociclone, sendo essas forças responsáveis por manter a parede livre do acúmulo de sólidos. Já as componentes axial (V_A) e radial (V_R), dependendo da posição no interior do equipamento, são diretamente responsáveis pela coleta de partícula (SCHAPEL & CHASE, 1998).

A coleta das partículas ocorre devido à atuação de forças decorrentes do movimento rotacional do fluido: força centrífuga e força de arraste (inerente ao escoamento envolvendo mais de uma fase). Quando uma partícula a ser separada tem densidade diferente daquela da fase líquida dispersa, ela adquire uma velocidade radial em relação ao líquido devido às forças centrífugas. Para partículas maiores, ou que possuam densidades mais elevadas que o fluido, esta velocidade radial é dirigida para fora, e, quando as forças centrífugas são fortes o bastante, as partículas atingem a parede do hidrociclone em seu caminho descendente a partir da entrada, sendo então separadas e recolhidas no *underflow*. Já as partículas menores, não terão tempo para alcançar a parede, e serão arrastadas para o vórtice interno e descarregadas no *overflow* (SILVA, 2012).

A Figura 2.6 mostra uma representação esquemática do escoamento e das forças atuantes sobre as partículas no interior de um hidrociclone.

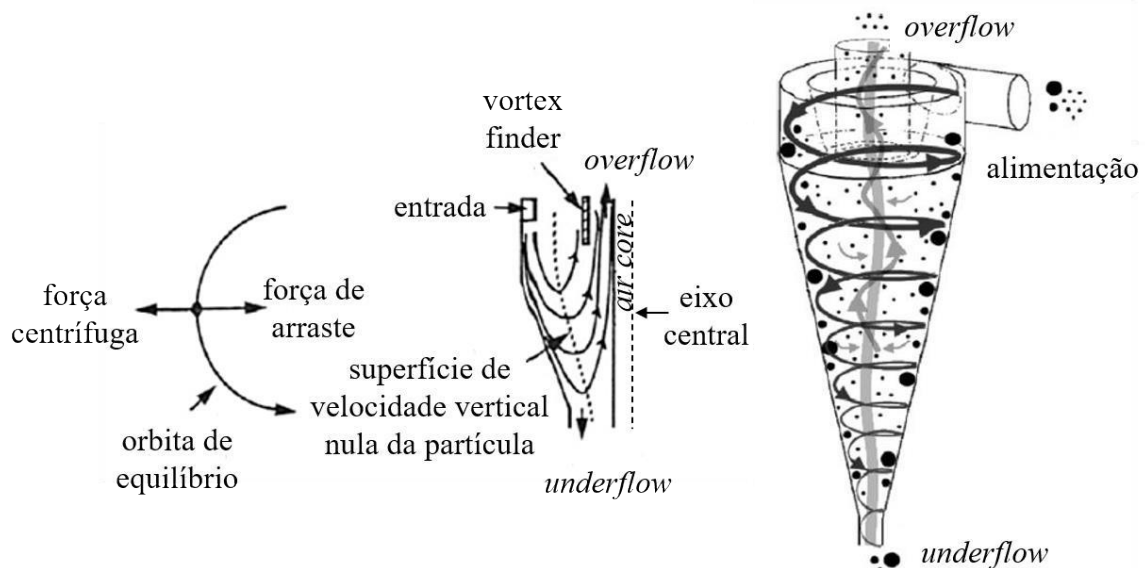


Figura 2.6 - Dinâmica das forças atuantes sobre as partículas.
(Adaptada de BICALHO, 2011; DAVAILLES, 2012)

Segundo Dwari et al. (2004), há quatro motivos principais pelos quais uma partícula pode não atingir a parede do hidrociclone:

- Alta velocidade radial do líquido, que por ser dirigida para dentro, pode arrastar as partículas para o centro;
- Entrada da partícula no hidrociclone a uma distância muito grande da parede;
- Curto tempo de residência;
- Difusão das partículas devido à turbulência.

Além dos vórtices helicoidais externo e interno, há ainda algumas particularidades sobre o escoamento de fluidos no interior de hidrociclones. Dentre estas particularidades, destacam-se o chamado curto-circuito e o vórtice de ar central (*air core*).

O fluxo de curto-circuito em um hidrociclone ocorre, principalmente, devido a colisão entre a corrente que acabara de percorrer um circuito e a corrente que acabara de entrar no separador. Como resultado da colisão, uma parte do líquido da corrente de alimentação passa diretamente através da parte superior do hidrociclone e desce através

da parede externa do *vortex finder* para se juntar à corrente de *overflow*, o que compromete a eficiência de separação do hidrociclone (SVAROVSKY, 1984).

Outra característica importante do escoamento no hidrociclone é a possibilidade de formação do núcleo central de ar. O escoamento turbilhonar intenso cria uma área de baixa pressão no centro que normalmente resulta na formação de uma superfície líquida rotativa livre, de forma aproximadamente cilíndrica que ocorre em todo o comprimento do hidrociclone. Se uma ou ambas as saídas estiverem conectadas diretamente com a atmosfera, o núcleo será preenchido com ar (*air core*). Neste caso, a pressão na interface ar-líquido é equivalente à pressão atmosférica, desconsiderando tensão de superfície e forças viscosas (NOWAKOWSKI et al., 2004; SRIPRIYA et al., 2007).

Quaisquer gases dispersos ou dissolvidos no fluido alimentado também serão conduzidos a esse núcleo central. A constante entrada de ar provoca um fluxo contínuo de ar no centro em direção ao *overflow*. Como na tubulação do *overflow*, a força centrífuga é reduzida, o *air core* perde estabilidade e se desintegra em bolhas que são então, descarregadas juntamente com o *overflow* (NEESSE & DUECK, 2007).

Gupta et al. (2008) afirmam que a presença do *air core* aumenta a queda de pressão, pois causa mais turbulência dentro do hidrociclone. Segundo Vieira (2006), o *air core* pode ser destruído pela adição de contrapressão ou pela faixa de operação na qual o hidrociclone é manuseado.

2.1.4 REGIMES DE OPERAÇÃO

De acordo com Neesse et al. (2004), as características do *underflow* do hidrociclone são influenciadas pelos fenômenos físicos que ocorrem em seu interior. Em geral existem três regimes de operação distintos: o regime de fluxo diluído, regime de transição e o regime denso. Tais regimes influenciam em propriedades típicas de hidrociclonagem, tais como massa de sedimentos depositada na seção cônica, formação do núcleo de ar e formato da descarga no *underflow*. A Figura 2.7 ilustra os três regimes de operação.

Para baixas concentrações de sólidos (regime de fluxo diluído) é observada uma descarga em forma de *spray*. Nesse tipo de regime, é formada uma fina camada de sedimento ao longo da seção cônica, o que permite a formação estável da coluna de ar no centro do equipamento (*air core*), a qual se estende por todo o comprimento do hidrociclone. Quanto a separação, esse regime proporciona uma alta recuperação de

sólidos no *underflow*, porém com alta presença de finos (NEESSE et al., 2004; DUBEY et al., 2017).

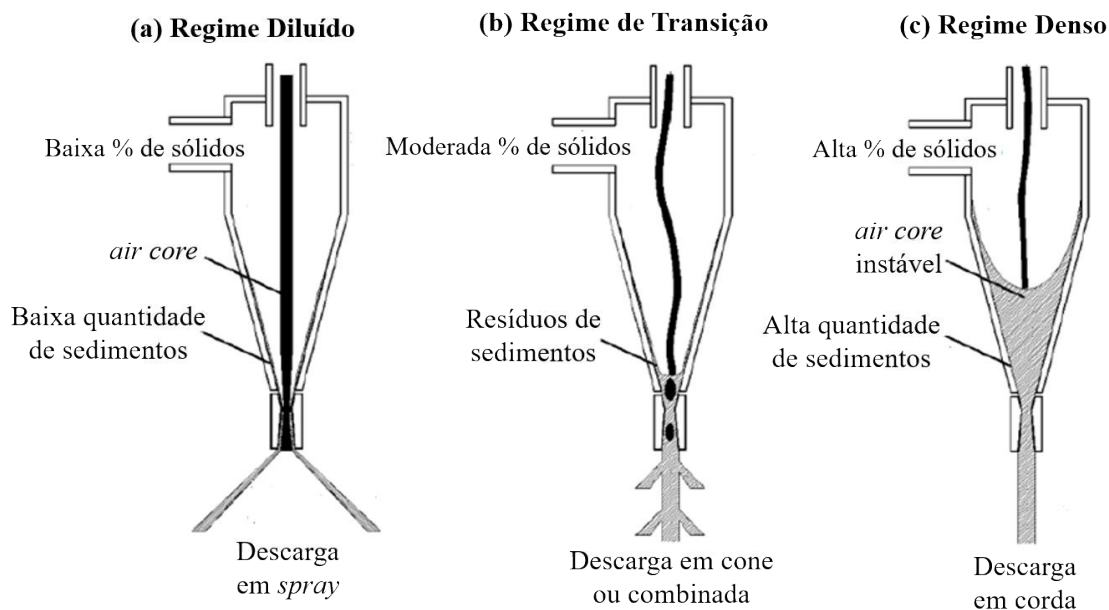


Figura 2.7 - Regimes de operação em hidrociclones.
(Adaptada de NEESSE et al., 2004)

Uma descarga em corda é observada no regime denso. Neste, mais sedimentos estão acumulados na seção cônica devido à grande concentração de sólidos na alimentação, e como resultado ocorre uma redução na recuperação de sólidos finos pelo *underflow*, que passam a ser recuperados no *overflow*. No entanto, devido a maior obstrução causada pelo acúmulo de sedimentos na seção cônica, o núcleo de ar não atravessa o hidrociclone completamente, tornando-se instável e até mesmo, sendo suprimido. Tal situação além de alterar a eficiência da separação, pode ocasionar no entupimento do hidrociclone devido ao acúmulo de sólidos no duto do *underflow* (NEESSE et al., 2004; WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Em concentrações de sólidos moderadas ocorre o regime de transição entre descarga *spray* e descarga em corda. Alguns autores nomeiam a descarga do regime de transição como descarga em cone ou descarga combinada. Esse regime é instável e mudanças repentinas entre descarga *spray* e em corda são observadas (NEESSE et al., 2004; DUBEY et al., 2017).

2.2 HIDROCICLONES NO SISTEMA DE CONTROLE DE SÓLIDOS

Nas indústrias petrolíferas, é denominada de Sistema de Controle de Sólidos, a planta de processamento que tem o intuito de separar o cascalho que chega à superfície do poço de perfuração de petróleo e/ou gás carregado pelo fluido de perfuração. Tal sistema é normalmente composto por algumas operações unitárias, sendo as mais comuns: decantação, peneiramento, hidrociclonação, centrifugação e secagem (PANISSET, 2014; PETRI, 2017). Um exemplo de uma planta de controle de sólidos é apresentado na Figura 2.8.

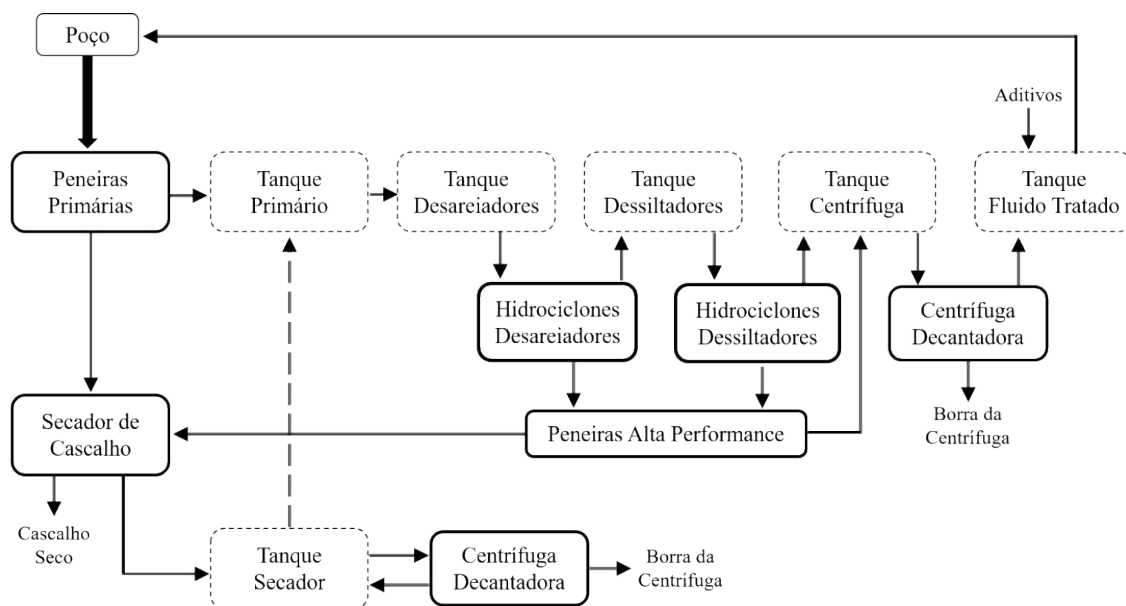


Figura 2.8 - Esquema de uma planta típica de controle de sólidos.
(Adaptada de PETRI, 2017)

Perfazendo um circuito típico de controle dos sólidos, de acordo com Schaffel (2002) e Petri (2017), o fluido de perfuração ao sair do poço é alimentado à peneira vibratória onde são separados do fluido os sólidos mais grosseiros. Ao deixar a peneira, o fluido passa por um conjunto de hidrociclones de 8 a 20 polegadas em paralelo, denominados desareiaadores. Tais hidrociclones recebem esta denominação por serem projetados para remover a fração granulométrica referente à areia e constituem baterias contendo de 2 a 4 separadores.

O resíduo que sai do *underflow* da bateria de hidrociclones desareiaadores é enviado às peneiras de alto desempenho e o líquido do *overflow* é enviado ao tanque que alimenta as baterias de hidrociclones dessiltadores (PETRI, 2017). Este nome vem do inglês *silt*, que caracteriza uma partícula de tamanho maior que a argila e menor que a areia,

denominada “silte”. O dessiltador é um hidrociclone de 4 a 5 polegadas que irá descartar as partículas sílticas e são geralmente utilizados em baterias contendo de 8 a 12 separadores (SCHAFFEL, 2002).

Ao deixar o dessiltador o fluido pode ser direcionado ao *mud cleaner*, que se trata de dessiltadores com uma peneira de alta performance para recuperar partículas reaproveitáveis que retornarão ao fluido, dispensando o acréscimo de mais aditivos. Na maioria dos casos, pode haver também uma centrífuga decantadora para retirar as partículas menores que ainda não tenham sido descartadas pelos hidrociclones. A partir daí o fluido volta a ser bombeado para o poço (THOMAS, 2004).

Os sólidos retidos pela peneira primária e pela peneira de alta performance são tratados pelo secador de cascalho. O líquido recuperado após o tratamento no secador de cascalho é enviado a um tanque e o sólido seco é descartado, desde que o teor da base não aquosa esteja dentro das normas ambientais de descarte (PETRI, 2017; SANTOS, 2018).

Cada equipamento que constitui o sistema de controle de sólidos deve ser projetado para separar do fluido partículas de uma determinada faixa de tamanho de maneira econômica e eficiente. A Figura 2.9 ilustra as faixas de tamanho das partículas geradas durante a perfuração de um poço e a faixa de operação de cada um dos equipamentos.

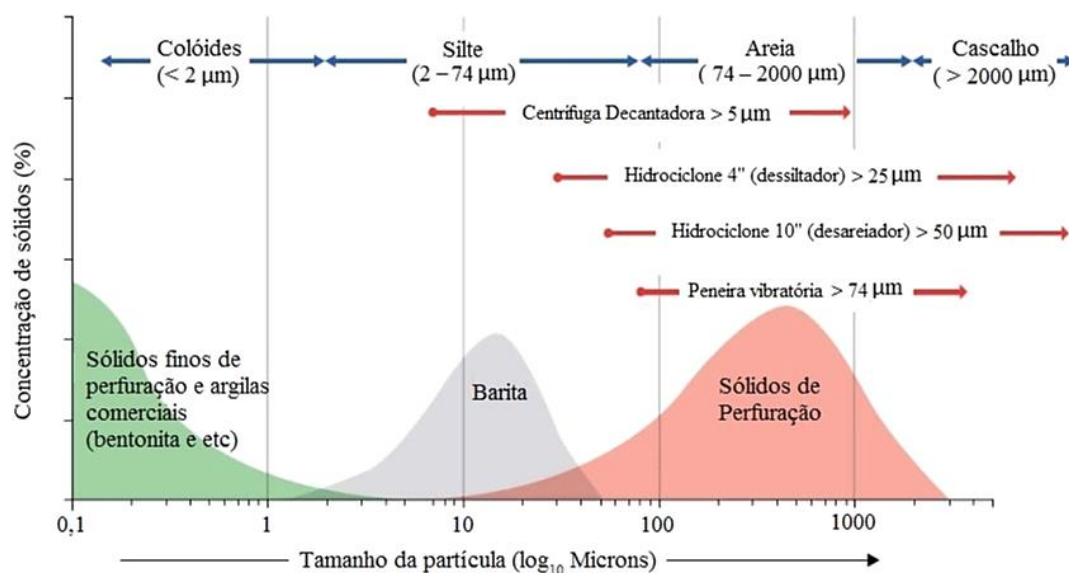


Figura 2.9 - Faixa típica de operação dos equipamentos que constituem o sistema de controle de sólidos (Adaptada de MALAGALAGE et al., 2017)

Como mostrado, as centrífugas decantadoras são as responsáveis pela recuperação dos sólidos ultrafinos presentes no fluido de perfuração, consistindo na linha de retenção final em um sistema de controle de sólidos. Entretanto, este equipamento apresenta sérias limitações de operação em sondas *offshore* por possuírem baixa capacidade de processamento frente aos demais equipamentos utilizados no controle de sólidos, alto custo de instalação, operação e manutenção e necessidade de grande espaço para instalação (MOGNON, 2015).

A baixa capacidade de processamento desses equipamentos torna-se um problema conforme a taxa de perfuração do poço se eleva. Nessa fase a quantidade de sólido perfurado exige um aumento nos fluxos de fluido de perfuração, e consequentemente sobrecarrega o sistema de controle de sólidos. Quantitativamente pode-se afirmar que em condições críticas de operação, cerca de apenas 10% do fluido circulante (aproximadamente 1000 gpm) é direcionado as centrífugas decantadoras, sendo o restante redirecionado por *by-pass*, misturado à corrente já tratada e, então, reinjetado ao poço (PANISSET, 2014).

Trabalhos antecessores a este propuseram a utilização de mini-hidrociclones (microcones) otimizados em apoio às centrífugas decantadoras, de modo a se obter uma maior remoção de material fino do fluido reinjetado sem a necessidade de aumentar o número de centrífugas presentes no sistema. Para tal, foram realizados estudos de otimização de parâmetros operacionais e geométricos a fim de se obter uma geometria ótima com alta eficiência de separação e baixa razão de líquido (proporção entre a vazão de *underflow* e a vazão alimentada ao hidrociclone), para que somente o *underflow* fosse tratado pela centrífuga (MOGNON et al, 2015; MOGNON et al, 2016).

Na Figura 2.10 é possível observar os três modelos de baterias distintos de hidrociclones que poderiam ser encontrados nas plantas de sistema de controle de sólidos: baterias de desareidores e baterias de dessiltadores já presentes e a proposta de bateria de mini-hidrociclones otimizados.

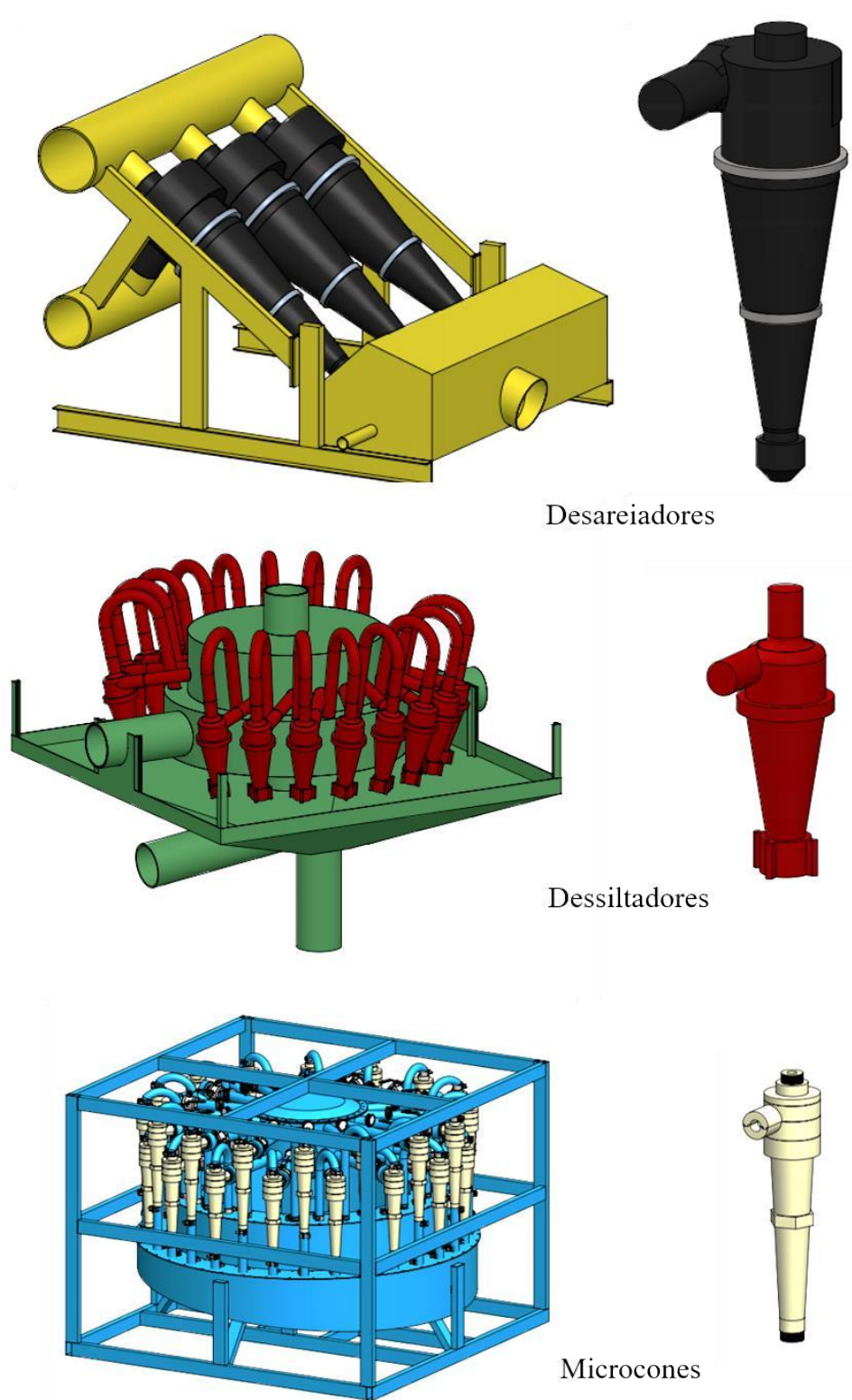


Figura 2.10 - Baterias de hidrociclones no sistema de controle de sólidos (SILVA, 2021).

Apesar da larga utilização, um problema recorrente enfrentado pelas plantas de controle de sólidos, é a ocorrência de entupimentos dos hidrociclones, devido, principalmente, à alta concentração das suspensões que os alimentam.

2.3 ENTUPIMENTOS EM HIDROCICLONES

Uma variável operacional importante dos hidrociclones é o diâmetro do duto de *underflow* (D_u), onde o fluxo descendente é descarregado. Esse diâmetro está intrinsecamente ligado à vazão e à capacidade de concentração do equipamento. Em hidrociclones com alta capacidade de concentração, a área de fluxo disponível para esse diâmetro (D_u) tende a ser reduzida, o que pode resultar em situações de entupimento.

Como principais causas de entupimentos destacam-se: a presença de elementos indesejados na corrente de alimentação (por exemplo, fragmentos de materiais arrastados de processos anteriores a hidrociclonagem, pedregulhos, insetos, dentre outros); a formação de aglomerados de sólidos finos na saída da corrente concentrada (*underflow*); e a presença de partículas que estão acima da faixa de distribuição granulométrica de operação do hidrociclone (SILVA et al., 2017).

Apesar da ocorrência de entupimentos se tratar de um problema recorrente nas linhas industriais de hidrociclonagem, atualmente não há praticamente nenhuma solução comercial visando sua prevenção e/ou remediação. A maioria das empresas, geralmente, recorre a operações manuais de limpeza para promover o desentupimento dos hidrociclones comprometidos.

Já na literatura, são encontradas algumas patentes propondo a injeção de um líquido diluente no interior do hidrociclone. Com a redução da concentração da suspensão disposta na sessão cônica do separador seria possível remover as partículas que estão obstruindo a saída de material pelo duto de *underflow*. Tais propostas foram desenvolvidas para serem utilizadas, particularmente, na indústria de papel e celulose, para a purificação de suspensões de fibras. O objetivo da hidrociclonagem em tal processo é remover as impurezas (areia, fragmentos de metal e similares) na forma de uma fração pesada (*underflow*), enquanto que as fibras úteis são coletadas na forma de fração leve (*overflow*) (FRYKHULT, 1974; HARTMANN, 2001, CALDELMAN, 2006).

Na busca por separadores de alta eficiência, foi alcançado um estágio no qual a fração pesada de contaminantes tornou-se tão espessa a ponto de provocar obstruções na saída do duto inferior dos separadores. Houve, então, a necessidade de se buscar arranjos que alinhassem a funcionalidade dos hidrociclones com a alta eficiência de separação desejada (HARTMANN, 2001)

Frykhult (1974) propôs a inserção de um dispositivo através do duto de *underflow* de hidrociclones utilizados para purificação de suspensão contendo fibra de papel. Tal dispositivo tem a função de injetar um líquido no interior do corpo cônico do hidrociclone, e, desta forma, diluir a fração concentrada de partículas pesadas ali disposta, promovendo a limpeza do separador. A Figura 2.11 apresenta a ilustração desta invenção.

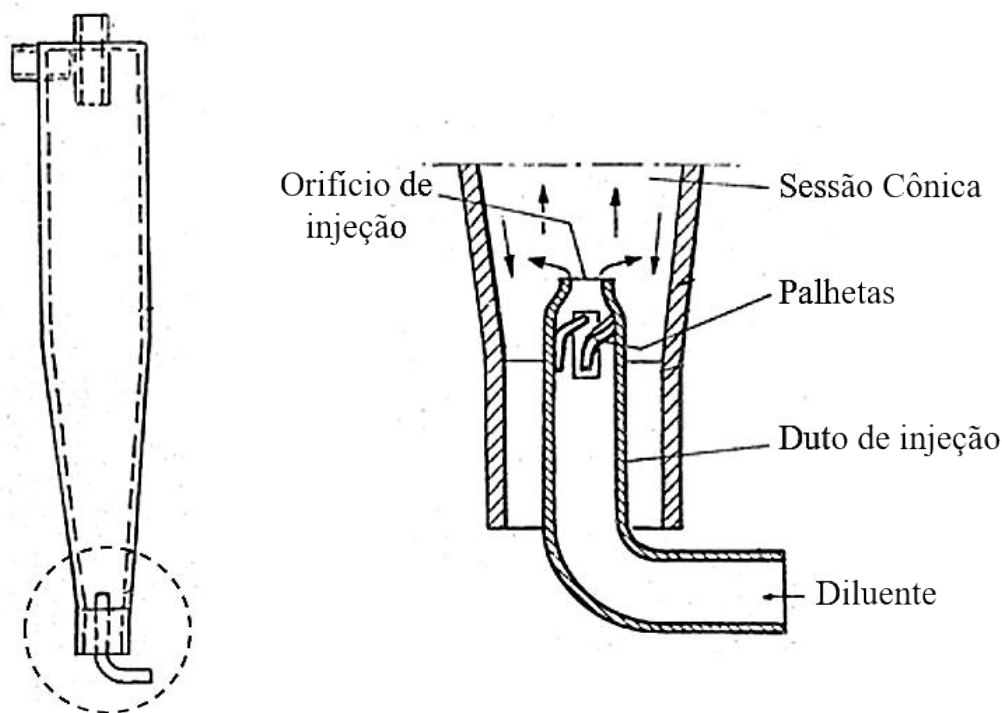


Figura 2.11 - Hidrociclone com diluidor de *underflow*.
(Adaptada de FRYKHULT, 1974 - Patente US3785489)

No interior do duto de injeção há a presença de palhetas que fornecerão um movimento de rotação (em torno do eixo do separador) para o líquido de diluição, o qual deve ser injetado sob pressão. Devido a esse movimento rotacional, o líquido, após deixar o orifício do duto, receberá uma direção de fluxo conforme indicado pelas setas internas (Figura 2.11). Frykhult (1974) afirma que devido a esse movimento, o líquido seguirá em direção à parede do hidrociclone, diluindo a fração pesada já separada, que irá fluir em direção a saída inferior em um vórtice externo. Ainda durante a diluição, as partículas mais leves (fibras) presentes nesta fase mais espessa seriam lavadas e suspensas, sendo capturadas pelo vórtice interno, se juntando ao *overflow*, o que aumentaria ainda mais a eficiência de separação do equipamento.

Hartmann (2001) alegou que a injeção do fluido de diluição deve ser realizada de modo axial (Figura 2.12) para evitar a lavagem da suspensão concentrada, o que na sua

concepção reduziria a eficiência de separação do hidrociclone ao agitar as camadas externas, provocando um maior arraste de partículas pesadas (contaminantes) pelo *overflow*. Segundo este inventor, a injeção do líquido de diluição pode ocorrer a poucos milímetros acima da abertura do cone de separação (distância “a”), até uma posição máxima dentro do hidrociclone, que corresponderia a até 30% de seu comprimento total (L). Na configuração desta patente, a suspensão concentrada é recolhida numa câmara e retirada através de um dispositivo de descarga.

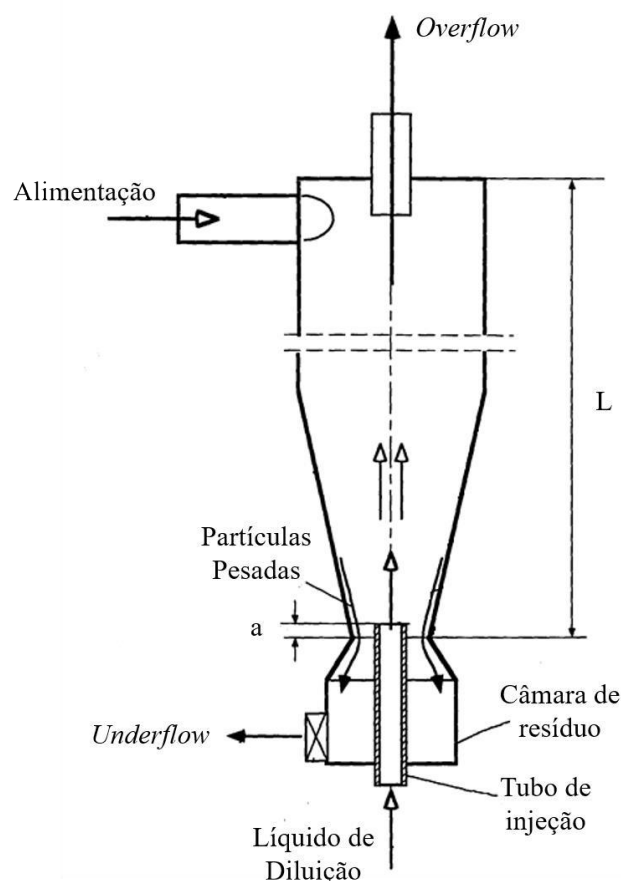


Figura 2.12 - Injeção axial de líquido para limpeza de hidrociclones.
(Adaptada de HARTMANN, 2001 - Patente US6284096B1)

Por sua vez, Caldelman (2006) propôs um hidrociclone para a purificação da suspensão das fibras no qual a injeção de fluido no interior da cavidade do hidrociclone ocorresse de modo oblíquo em direção à parede externa da seção cônica, diluindo a fração espessa e prevenindo entupimentos. A injeção do fluido se daria através da inserção de um dispositivo de cabeça cônica contendo 3 furos em sua lateral como é mostrado na Figura 2.13. O hidrociclone objeto desta patente contém ainda, além das duas saídas

convencionais, um duto inserido no centro do *vortex finder*, pelo qual seria descarregada uma terceira fração de partículas.

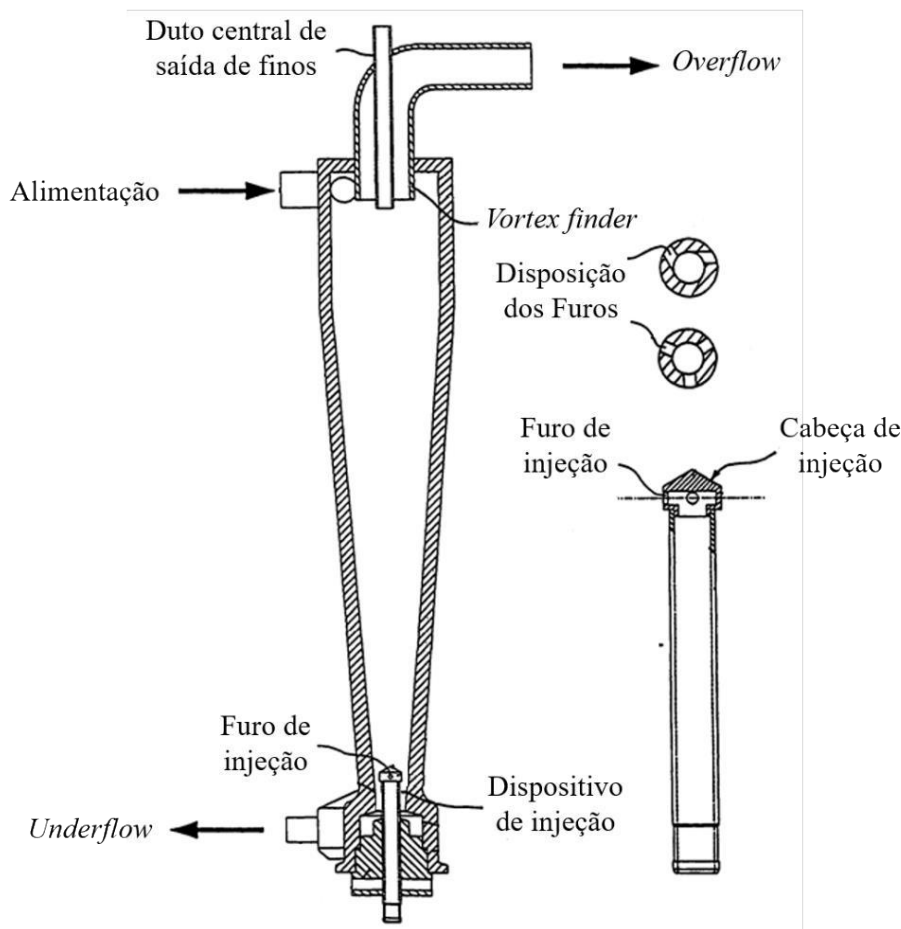


Figura 2.13 - Hidrociclone com injetor de fluido e duto de saída adicional.
(Adaptada de CALDEMAN, 2006 – Patente US20060163153A1)

Os furos de injeção foram projetados para pulverizar um jato de fluido, podendo ser líquido, gás, ou uma mistura dos dois, da região central em direção à parede circunferencial do hidrociclone. Deste modo, segundo Caldelman (2006), não ocorreria o arraste das partículas pesadas para o centro do equipamento, onde há o risco de serem carregadas pelo vórtice interno e serem descarregadas junto à fração leve que contém as fibras úteis (*overflow*). Além disso, a injeção de gás pelo dispositivo (preferencialmente ar) além de auxiliar na quebra de aglomerados de partículas, se separaria na forma de bolhas e arrastaria os contaminantes mais leves em direção ao duto central superior, não comprometendo assim, a eficiência do processo.

Já Kucher et al. (2018) propuseram modificações na cabeça de injeção do dispositivo desenvolvido por Caldelman (2006), de modo que a injeção de fluido diluente

ocorresse em duas direções distintas. A nova modalidade da invenção possui três bicos injetores radiais e uma (ou mais) aberturas superiores como é mostrado na Figura 2.14.

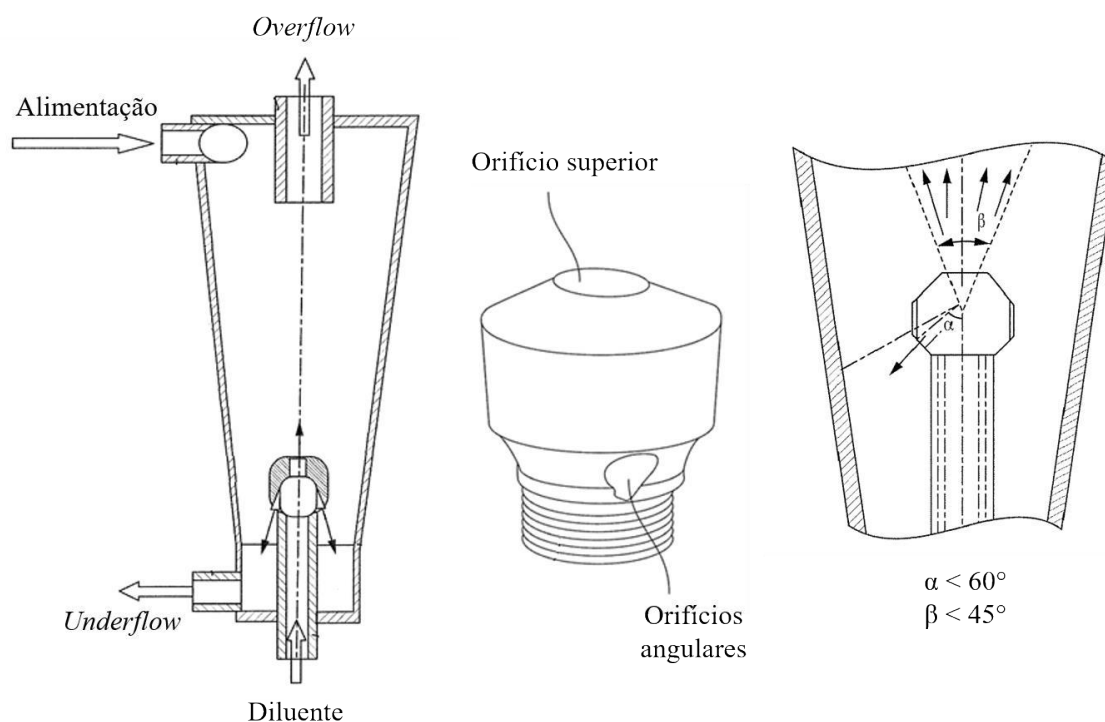


Figura 2.14 - Hidrociclone com dispositivo de diluição bidirecional.
(Adaptada de KUCHER et al., 2018 – Patente US9914139B2)

Segundo Kucher et al. (2018), o dispositivo de injeção foi desenvolvido de modo que 40% do fluido diluente fosse injetado de modo radial em direção à parede circunferencial do hidrociclone e os outros 60% de modo axial, em direção a parte superior do separador. Como consequência dessa divisão de fluxo, ocorreria um gradiente de pressão que proporcionaria ao jato de diluição um caráter pulsante, que reduziria ainda mais o espessamento da fase mais pesada de contaminantes.

Outra vantagem citada pelos autores é em relação à nova modalidade do bico injetor proposto. De acordo com Kucher et al. (2018), tais bicos possuem menor probabilidade de apresentar entupimentos que seus antecessores, permitindo assim, operar com fluidos de diluição mais concentrados em fibras.

Apesar dos métodos de diluição interna se mostrarem efetivos no combate aos entupimentos dos hidrociclones utilizados no processo de purificação das suspensões de fibra de papel, os mesmos não podem ser aplicados a todos os processos de hidrociclonagem. Os hidrociclones utilizados no sistema de controle de sólidos da

indústria petrolífera, por exemplo, possuem restrição em relação à quantidade de suspensão concentrada descarregada pelo *underflow*. Isto porque, tal suspensão segue para outros processos de separação, que seriam sobrecarregados, e talvez até perdessem em eficiência, devido ao excesso de líquido presente em caso de diluição.

Pesquisando sobre uma maneira de compensar às frequentes oscilações das condições das correntes que alimentam os hidrociclones que compõe o sistema de controle de sólidos, Silva (2015) avaliou, de modo preliminar, os efeitos provocados por alterações no diâmetro do *underflow* devido à inserção de um dispositivo de formato cônico no duto de saída inferior de hidrociclones (Figura 2.15). O autor notou que, além de permitir o ajuste mecânico da vazão da corrente de *underflow* com o intuito de compensar as oscilações da corrente de alimentação, a inserção do dispositivo apresentava potencial para provocar a supressão do *air core*, como também para ser utilizado na remediação e/ou prevenção de entupimentos.

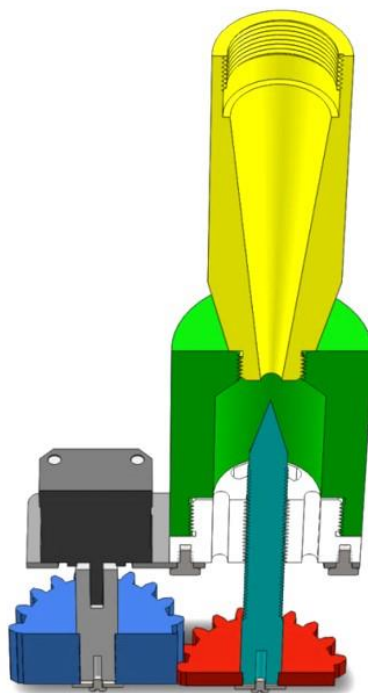


Figura 2.15 - Ajuste mecânico do diâmetro de abertura do *underflow*.
(SILVA, 2015)

Silva et al. (2017) realizaram simulações fluidodinâmicas que mostraram a existência do núcleo central de ar no hidrociclone utilizado nos ensaios e sua supressão quando o dispositivo está obstruindo parte do duto de *underflow*. Na Figura 2.16 são mostrados os perfis de distribuição de fases (ar/água) no interior do hidrociclone na

ausência (à esquerda) e com a presença do UCD (à direita). Na escala utilizada 1 (um) representa 100% de água e 0 (zero) corresponde a 100% de ar.

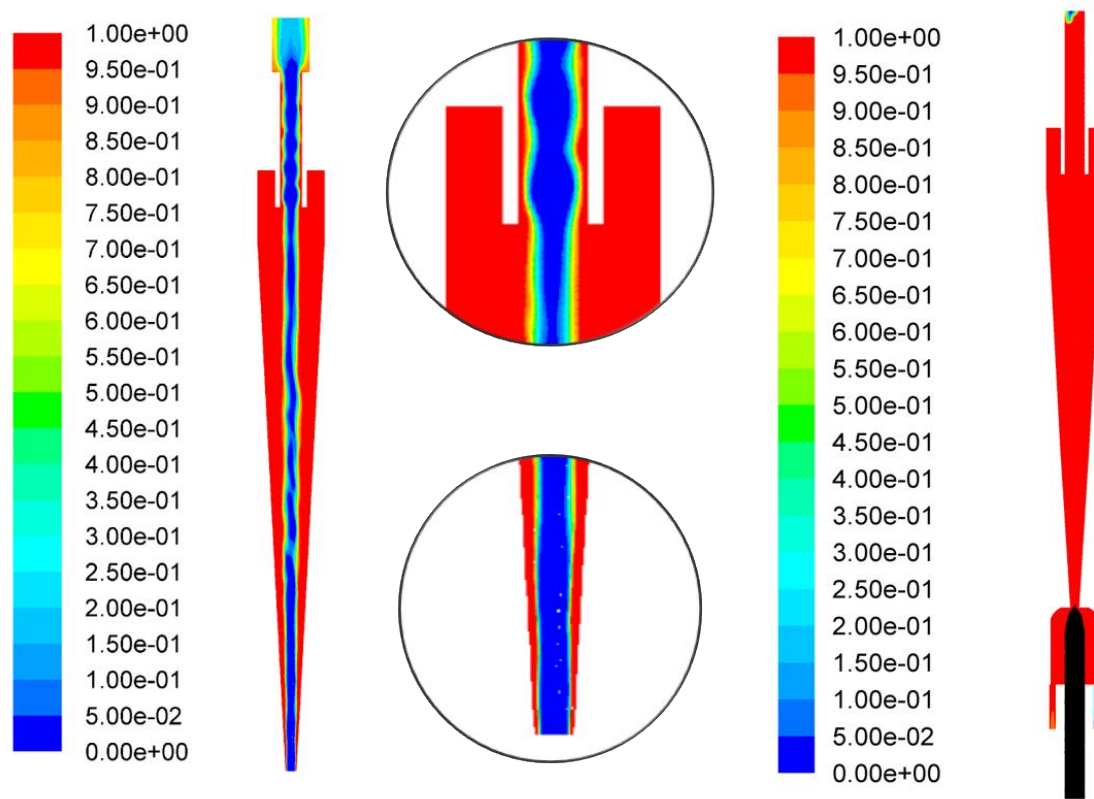


Figura 2.16 - Supressão do *air core* causada pela presença do UCD.
(Adaptada de SILVA et al., 2017)

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, a unidade experimental, o dispositivo proposto e a metodologia empregada tanto nos ensaios de hidrociclonagem quanto nas simulações computacionais.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Utilizou-se rocha fosfática para compor a mistura aquosa utilizada como corrente de alimentação dos ensaios de hidrociclonagem. Tal sólido foi cedido pela empresa Copebrás, situada em Catalão – Goiás.

A distribuição granulométrica da rocha fosfática, apresentada na Figura 3.1, foi realizada no equipamento MASTERSIZER 2000 da MALVERN. Durante as análises empregou-se a aproximação proposta por Fraunhofer, para analisar a detecção do espalhamento de luz *laser* e para a dispersão das partículas foi utilizada água destilada. Foi observado que aproximadamente a metade das partículas da rocha tem diâmetro inferior a 7 μm e que 100% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 100 μm .

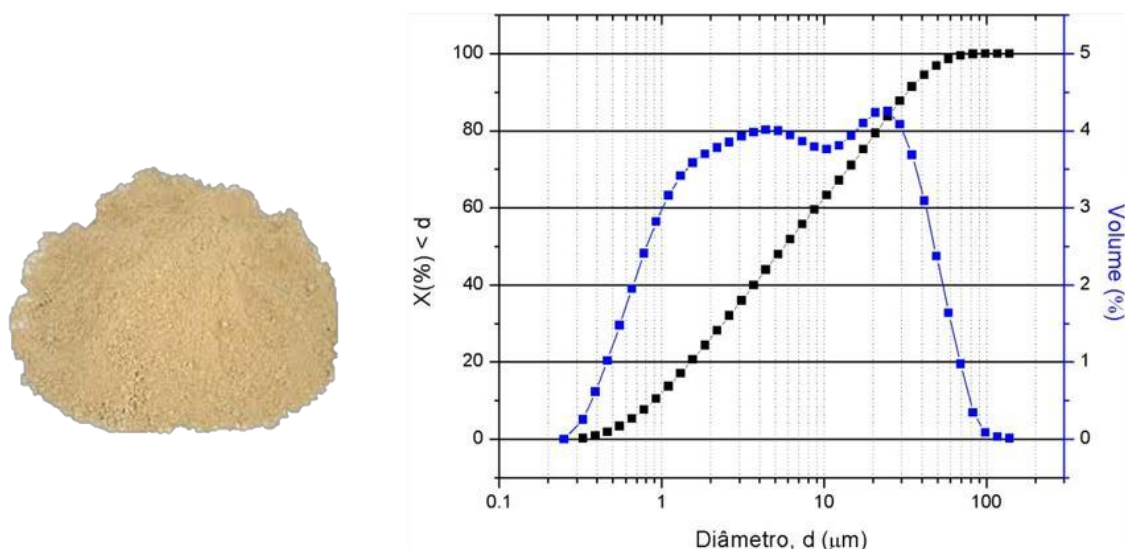


Figura 3.1 - Distribuição granulométrica da rocha fosfática.

Já a Figura 3.2 apresenta uma comparação entre a distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada nos ensaios de hidrociclonagem e a distribuição granulométrica

de uma amostra real dos sólidos presentes na suspensão que alimenta a centrífuga decantadora. Tal amostra foi fornecida pela Petrobras visando um melhor alinhamento dos ensaios experimentais deste trabalho com as condições operacionais reais.

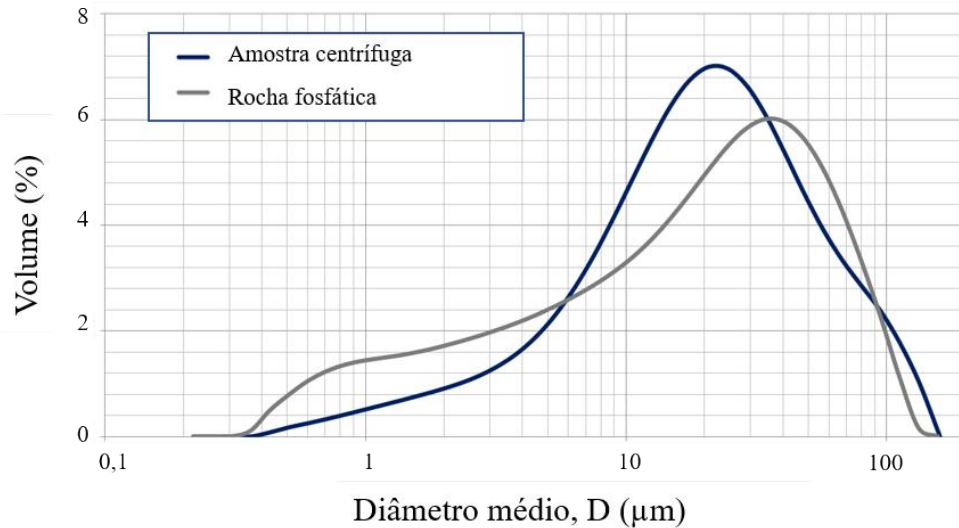


Figura 3.2 - Comparação entre o material utilizado nos ensaios e o material real do campo.

É possível notar a semelhança entre as amostras analisadas, o que mostra que a suspensão preparada para os ensaios possui boa representatividade granulométrica quando comparada à suspensão real que irá alimentar a bateria de hidrociclones em campo.

Já em relação à similaridade reológica entre as amostras, não foi possível ajustar a viscosidade da suspensão utilizada nos ensaios para que ela apresentasse o comportamento pseudoplástico do fluido de perfuração real devido ao limite operacional da unidade experimental.

3.2 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental utilizada neste trabalho, ilustrada na Figura 3.3, pertence a Grupo de Pesquisa em Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química e está localizada no Laboratório de Hidrociclonação da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).



Figura 3.3 - Bancada de hidrociclonação.

Tal unidade experimental consiste em uma bancada de hidrociclonação, na qual a mistura a ser separada é alimentada de modo tangencial ao hidrociclone (1) com o auxílio de um conjunto motobomba de 3 CV Sew-Eurodrive modelo DZ1001S4 (2) acoplado a um inversor de frequência WEG modelo CFW700 (3). Para garantir a homogeneização da mistura contida no tanque de armazenamento de 115 litros (4) é utilizado um agitador mecânico de 1 CV (5) acoplado a um inversor de frequência para o controle da velocidade de rotação Metal Corte, modelo B80a4 (6). Já a pressão do sistema é aferida por um manômetro digital (7) posicionado próximo a entrada do hidrociclone.

3.3 HIDROCICLONE

Como uma das principais características dos hidrociclones clarificadores é ser susceptível a entupimentos, foi escolhido para ser utilizado nesse trabalho, o modelo de hidrociclone clarificador otimizado por Mognon et al. (2015) apresentado na Figura 3.4. Outro motivo para a escolha deste modelo, foi sua já observada capacidade de formação

de *air core*, característica desejada para este estudo, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é avaliar a capacidade de supressão do *air core* pelo dispositivo desentupidor.

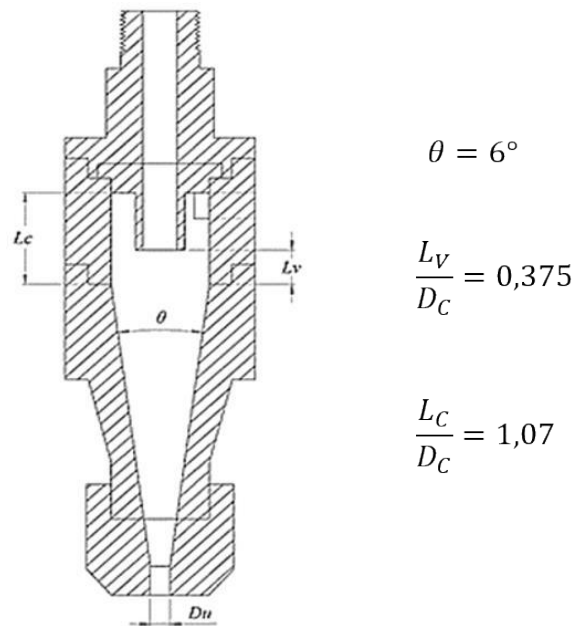


Figura 3.4 - Geometria do hidrociclone otimizado por Mognon et al. (2015).

Para a realização dos ensaios, o hidrociclone em questão foi usinado em poliacetal, de maneira modular (D_c igual a 45 mm) como pode ser observado nas Figuras 3.5.

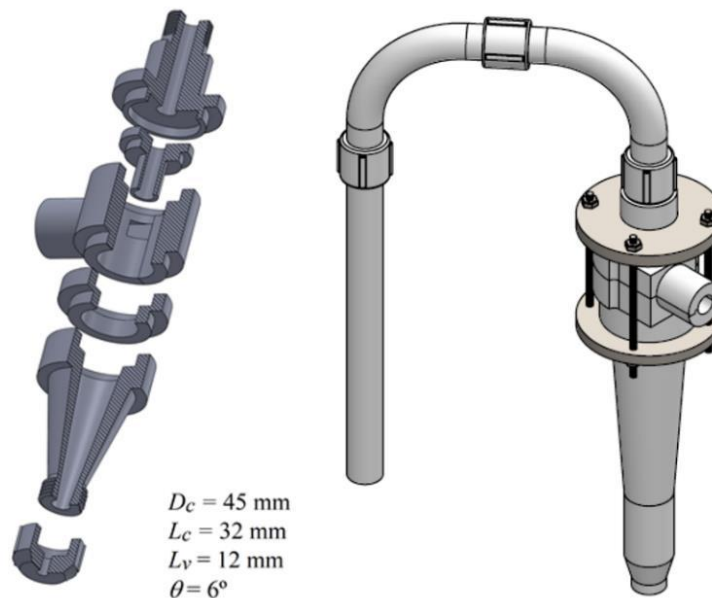


Figura 3.5 - Hidrociclone modular.

3.4 DISPOSITIVO DESOBSTRUDOR

Durante a execução deste trabalho, foi desenvolvido um dispositivo denominado *Unclog Conical Device* (UCD) para ser utilizado acoplado a saída do *underflow* do hidrociclone com o intuito de avaliar sua capacidade de atuar na prevenção/remediação de entupimentos.

A Figura 3.6 apresenta um esboço em corte do UCD acoplado ao hidrociclone que será utilizado. A variável L' representa a distância entre o UCD e o orifício do duto do *underflow*, β representa o ângulo do UCD e Du o diâmetro do duto de *underflow* do hidrociclone.

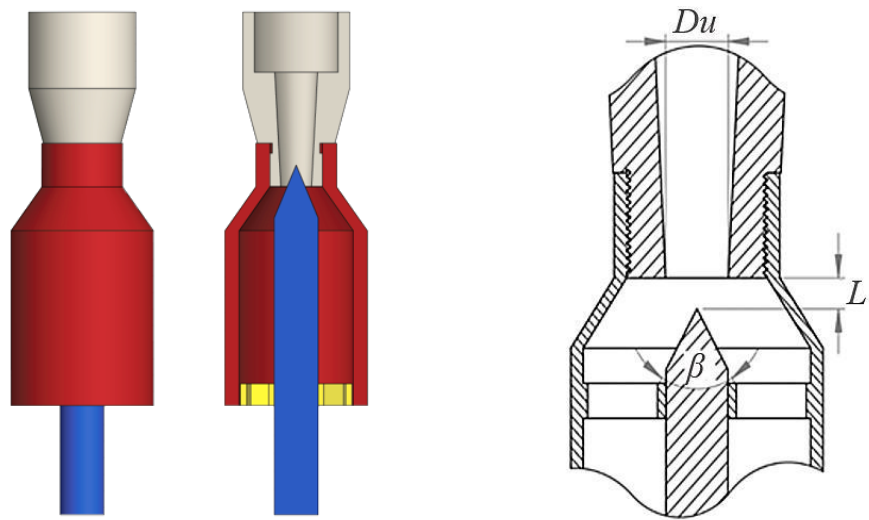


Figura 3.6 - Vistas em corte do UCD.

O sistema de acionamento mecânico do UCD pode ser realizado por motores de passo, servos, por acionamento hidráulico ou pneumático com válvulas solenoides. Uma vez acionado o sistema, o UCD desloca-se verticalmente reduzindo a área da corrente de *underflow* de dentro para fora.

A Figura 3.7 ilustra alguns desses sistemas de acionamento mecânicos. Durante a execução dos ensaios do presente trabalho a posição do UCD foi fixada manualmente, com o auxílio de uma haste acoplada à base do dispositivo conforme é mostrado na Figura 3.8.

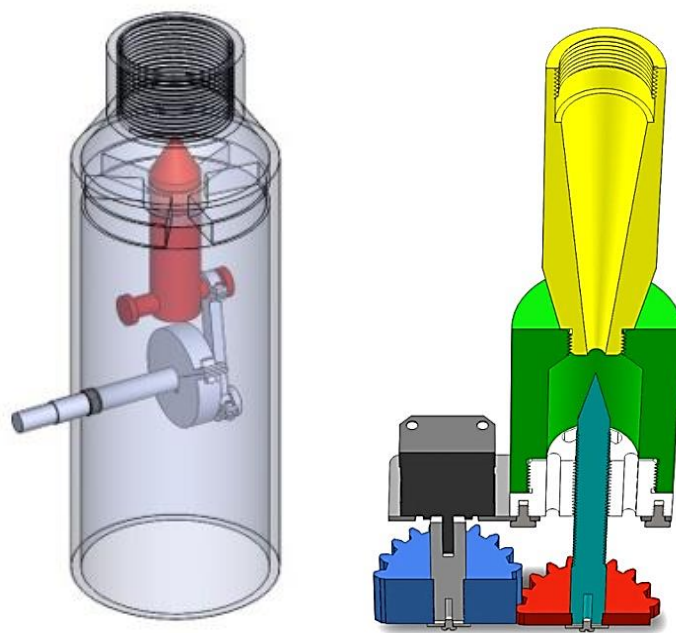


Figura 3.7 – Modelos de acionamentos mecânicos do UCD.

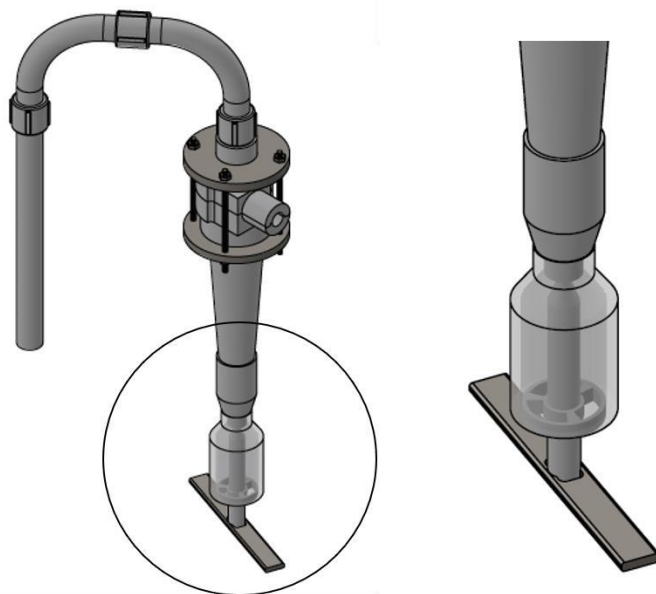


Figura 3.8 – Ajuste manual da posição do UCD utilizado nos ensaios.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais que compõem este trabalho foram divididos em 5 grupos de acordo com a ordem cronológica de execução dos testes como é mostrado na Figura 3.9.

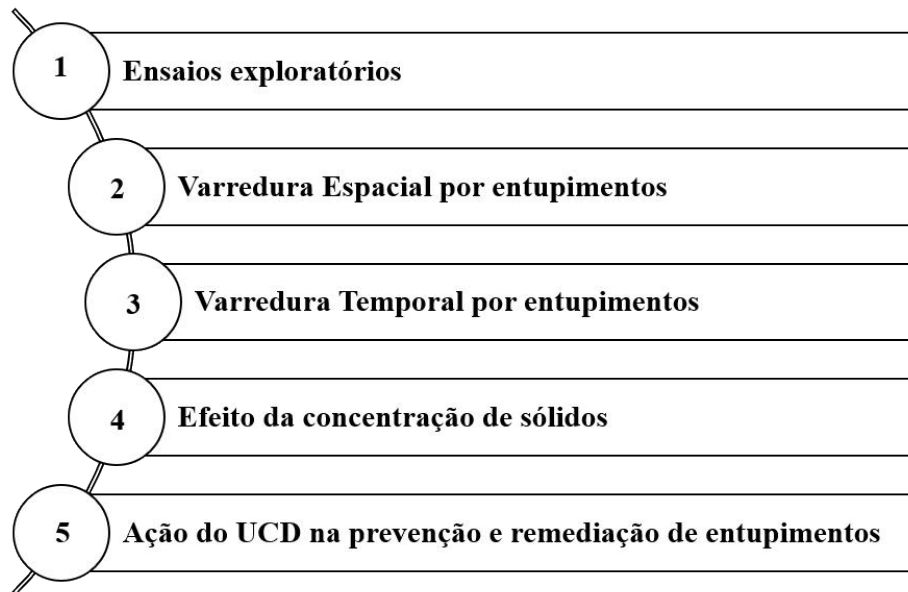


Figura 3.9 - Cronologia dos ensaios experimentais.

Primeiramente foram realizados ensaios exploratórios visando analisar a geometria do UCD e ensaios de varredura espacial e de varredura temporal visando obter um maior entendimento do processo de entupimento. Na sequência analisou-se a influência da concentração de sólidos no processo de entupimento e por fim analisou-se a capacidade do dispositivo proposto em remediar e prevenir entupimentos.

3.5.1 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

Foram realizados ensaios exploratórios visando, principalmente, encontrar as melhores dimensões para D_u (diâmetro de *underflow* do hidrociclone) e β (ângulo de abertura do UCD). Para tal, foram confeccionadas 5 peças em poliacetal com diferentes ângulos β : 35, 37,5, 40, 42,5 e 45° e 5 módulos com diferentes D_u : 6, 8, 10, 12 e 14 mm.

Para avaliar, principalmente, como tais dimensões influenciam na eficiência de separação do hidrociclone foi proposto um Planejamento Composto Central (PCC) Ortogonal com quatro variáveis independentes: diâmetro do *underflow* (D_u , mm), ângulo do UCD (β , °), porcentagem de obstrução causa pela presença do UCD (Z , %) e pressão de trabalho (P , psi). A razão de líquido (R_L), a eficiência reduzida (η') e capacidade concentradora (CC) foram as variáveis respostas analisadas.

A razão de líquido (Equação 3.1) é definida como a razão entre a quantidade de líquido direcionada ao *underflow* e a quantidade total de líquido alimentada no

equipamento. Em processos de concentração, é desejada a sua minimização associada a altas eficiências de separação.

$$R_L(\%) = 100 \frac{W_U(1 - C_U)}{W_A(1 - C_A)} \quad (3.1)$$

Onde W_U e W_A correspondem, respectivamente, as vazões mássicas do *underflow* e da alimentação. Enquanto que C_U e C_A representam, respectivamente, as concentrações mássicas do *underflow* e da alimentação.

Já a capacidade concentradora (Equação 3.2) consiste na razão entre as concentrações de sólido presentes no *underflow* e na alimentação, sendo um parâmetro de grande interesse nas operações onde são requeridas altas concentrações na corrente de grossos (*underflow*) e está diretamente atrelado à razão de líquido, sendo as duas inversamente proporcionais.

$$CC = \frac{C_U}{C_A} \quad (3.2)$$

A eficiência total (Eq. 3.3) é definida como a razão entre a quantidade mássica de sólidos coletados pelo duto de *underflow* e a quantidade mássica de sólidos alimentadas no equipamento. Entretanto, em operações de concentração, devido aos maiores valores de razão de líquido, este parâmetro não é capaz de quantificar adequadamente a capacidade de separação pelo campo centrífugo do equipamento. Nestes casos, utiliza-se a eficiência de separação reduzida (Eq. 3.4), que é uma correção a eficiência total, de modo a descontar o efeito de divisão de fluxo que ocorre no equipamento, quantificada esta, pela razão de líquido e comumente denominado efeito “T”.

$$\eta(\%) = 100 \frac{C_U W_U}{C_A W_A} \quad (3.3)$$

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (3.4)$$

Para a execução do Planejamento de Experimentos, foram realizados 29 experimentos, sendo 5 réplicas no ponto central. A Tabela 3.1 apresenta a relação dos valores de cada variável independente adotados nos ensaios que constituíram o PCC. Já os valores entre parênteses representam os níveis codificados.

Tabela 3.1- Matriz do Planejamento de Experimentos.

Ensaio	Du [mm]	β [°]	Z [%]	P [psi]
1	8 (-1)	37,5 (-1)	15 (-1)	25,5 (-1)
2	8 (-1)	37,5 (-1)	15 (-1)	29,5 (+1)
3	8 (-1)	37,5 (-1)	45 (+1)	25,5 (-1)
4	8 (-1)	37,5 (-1)	45 (+1)	29,5 (+1)
5	8 (-1)	42,5 (+1)	15 (-1)	25,5 (-1)
6	8 (-1)	42,5 (+1)	15 (-1)	29,5 (+1)
7	8 (-1)	42,5 (+1)	45 (+1)	25,5 (-1)
8	8 (-1)	42,5 (+1)	45 (+1)	29,5 (+1)
9	12 (+1)	37,5 (-1)	15 (-1)	25,5 (-1)
10	12 (+1)	37,5 (-1)	15 (-1)	29,5 (+1)
11	12 (+1)	37,5 (-1)	45 (+1)	25,5 (-1)
12	12 (+1)	37,5 (-1)	45 (+1)	29,5 (+1)
13	12 (+1)	42,5 (+1)	15 (-1)	25,5 (-1)
14	12 (+1)	42,5 (+1)	15 (-1)	29,5 (+1)
15	12 (+1)	42,5 (+1)	45 (+1)	25,5 (-1)
16	12 (+1)	42,5 (+1)	45 (+1)	29,5 (+1)
17	6 (-2)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)
18	14 (+2)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)
19	10 (0)	35 (-2)	30 (0)	27,5 (0)
20	10 (0)	45 (+2)	30 (0)	27,5 (0)
21	10 (0)	40 (0)	0 (-2)	27,5 (0)
22	10 (0)	40 (0)	60 (+2)	27,5 (0)
23	10 (0)	40 (0)	30 (0)	23,5 (-1)
24	10 (0)	40 (0)	30 (0)	31,5 (+1)
25	10 (0)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)
26	10 (0)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)
27	10 (0)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)
28	10 (0)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)
29	10 (0)	40 (0)	30 (0)	27,5 (0)

O efeito de cada variável (Du , β , Z e P) assim como de suas interações sobre as respostas foi avaliado através da técnica de superfície de resposta (MYERS & MONTGOMERY, 2009). O ajuste dos dados foi realizado através do método dos

mínimos quadrados pelo *software* STATISTICA 7.0. A análise de variância da regressão foi feita com base no quadrado do coeficiente de correlação múltipla (R^2) e o nível de significância dos parâmetros adotado foi de 10%.

A metodologia utilizada na preparação dos ensaios e análise dos resultados pertencentes a este planejamento é descrita a seguir:

- Preparação da suspensão contendo 2% em massa de rocha fosfática. A mistura foi mantida sobre constante agitação de modo a evitar a sedimentação do material particulado;
- Ajuste da vazão de alimentação através de sistema de controle proporcional acoplado ao inversor de frequência da bomba;
- Medição das vazões mássicas da lama nas correntes de *underflow* e *overflow* por gravimetria;
- Coleta de três amostras das correntes de *underflow* e *overflow* para cada condição, seguida por secagem em estufa a 105°C por 24 horas;
- A temperatura dos experimentos foi continuamente verificada por um termômetro, situando-se na faixa de 28 a 32°C.

3.5.2 ENSAIOS DE VARREDURA ESPACIAL

Durante a execução dos ensaios que constituíram o PCC exploratório, foram identificadas condições de operação mais propícias a apresentar entupimento do duto de *underflow*.

Visando obter um maior entendimento do processo de entupimento, foi realizado um conjunto de ensaios experimentais denominado varredura espacial, nos quais, fixada uma geometria (Du e β), o UCD foi sendo inserido gradativamente no duto inferior do hidrociclone. Deste modo, foi possível avaliar como o aumento da porcentagem da área obstruída do duto de *underflow* pela presença do UCD influencia no desempenho do hidrociclone.

Foram realizados ensaios utilizando o módulo correspondente ao Du de 12mm, UCD com β igual a 42,5° e a porcentagem de obstrução (Z) causada pela presença do UCD variou de 30 a 95%. A suspensão a ser separada foi a mesma utilizada nos ensaios exploratórios, isto é, uma mistura constituída de água e 2% (em massa) de rocha fosfática,

a pressão da alimentação foi de 25,5 psi e tempo de duração de cada ensaio foi em média 10 minutos, o suficiente para o processo entrar em regime contínuo.

A porcentagem de obstrução (Z) é definida como sendo a razão entre a área do dispositivo que está obstruindo o escoamento (A_D) e a área do duto do *underflow* (A_U) como é mostrado na equação 3.5.

$$Z = \frac{A_D}{A_U} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Já o cálculo do quanto o dispositivo deve ser inserido (L') e do número de rotações necessárias para que a área de obstrução corresponda ao valor pré-determinado foi realizado através do *software* SolidWorks 2019 utilizando relações trigonométricas. Tais valores são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Posicionamento do UCD nos ensaios de Varredura Espacial.

Z (%)	L' (mm)	Rotações	Z (%)	L' (mm)	Rotações
30,0	6,98	3,88	63,4	3,15	1,75
35,0	6,30	3,50	68,1	2,70	1,50
40,0	5,67	3,15	73,0	2,25	1,25
45,0	5,08	2,82	78,1	1,80	1,00
50,0	4,52	2,51	83,3	1,35	0,75
55,0	3,99	2,22	88,7	0,90	0,50
60,0	3,48	1,93	94,3	0,45	0,25

Após o primeiro conjunto de ensaios, que compreendeu a faixa de obstrução avaliada durante o PCC exploratório (30 a 60%) foi notada a necessidade de se ampliar a faixa estudada. Neste segundo conjunto de ensaios, optou-se por fixar o número de rotações e calcular a porcentagem de obstrução correspondente. Esta decisão foi tomada devido a maior precisão em se fixar o dispositivo manualmente com número de rotações múltiplos de 1/4 de volta.

3.5.3 ENSAIOS DE VARREDURA TEMPORAL

Durante os ensaios que compreenderam a varredura espacial foi notada a necessidade de se verificar o comportamento do processo ao longo do tempo. Isto porque uma das principais causas de entupimento de hidrociclone é o acúmulo de material

particulado que se compacta próximo a saída do duto de *underflow*. Sendo assim, é necessário avaliar se após um longo período de obstrução parcial do *Du* pelo dispositivo, posições que antes não apresentaram entupimentos, poderiam entupir com o passar do tempo.

Para isso, foram realizados ensaios de duração de 2 horas com o dispositivo obstruindo de 60 a 95% da área do duto do *underflow*, *Du* de 12mm, UCD com β igual a 42,5° e suspensão contendo 2% de sólidos em massa.

3.5.4 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

Além do efeito da porcentagem de área obstruída pelo dispositivo na ocorrência de entupimentos, também foi avaliado o efeito da concentração de sólidos. Para tal, foram realizados ensaios com diferentes concentrações de rocha fosfática na suspensão utilizada para alimentar o processo de separação.

Além dos ensaios com 2% de sólidos que constituíram a varredura temporal detalhada no item anterior (3.5.3), foi avaliado o efeito de mais 4 diferentes concentrações de sólidos na alimentação: 4, 6, 8 e 10 %.

Novamente, a posição do dispositivo variou de modo a obstruir de 60 a 95% da área do duto de *underflow*, *Du* de 12mm, UCD com β igual a 42,5°, pressão igual a 25,5 psi e o tempo de cada ensaio foi de 2 horas.

3.5.5 AÇÃO DO UCD NA PREVENÇÃO E REMEDIÇÃO DE ENTUPIMENTOS

Uma vez conhecidos os pontos de operação com tendência a apresentar entupimentos, foram realizados ensaios para avaliar a ação do dispositivo na prevenção e/ou remediação de entupimentos.

Para tal, foi escolhida uma condição experimental que apresentou entupimento durante a execução dos ensaios que avaliaram o efeito da concentração de sólidos na ocorrência de entupimentos: concentração inicial de sólidos de 6% e obstrução do duto de *underflow* pelo UCD (Z) igual a 83%. Realizou-se dois tipos de ensaios: um visando avaliar a capacidade do UCD de prevenir o entupimento e outro avaliando sua capacidade de remediar o entupimento.

Durante a execução do ensaio que visou avaliar a capacidade do UCD em remediar entupimentos, amostras das correntes de *underflow* e *overflow* eram coletadas ao longo do tempo até o entupimento total do hidrociclone. Neste momento o UCD foi acionado manualmente de modo a aumentar e diminuir rapidamente a área de abertura do *underflow* objetivando a retirada dos aglomerados de partículas responsáveis pelo entupimento do sistema. Tal procedimento, responsável por variar abruptamente a área disponível ao escoamento do *underflow*, foi repetido três vezes para garantir o total desentupimento do separador.

Após o desentupimento, o UCD foi novamente fixado na posição inicial, isto é, causando 83% de obstrução, e deu-se continuidade à coleta das amostras até o próximo entupimento, quando novamente ocorreu o acionamento do dispositivo desobstrutor, seguido pelo desentupimento do sistema e a retomada da coleta das amostras. Tal rotina foi repetida algumas vezes até completar o tempo total de duração do ensaio, que foi de aproximadamente 1 hora.

Já no ensaio que visou avaliar a capacidade do UCD de prevenir entupimentos, seu acionamento foi efetuado também de modo manual e a partir de respostas visuais, uma vez que não foi possível realizar a automatização do sistema durante a execução deste trabalho.

Em resumo, a partir do conhecimento do processo de entupimento obtido nos ensaios anteriores, foi executada a seguinte rotina de acionamento do UCD: coleta de amostras do sistema até que a diminuição da vazão de *underflow* que antecede o processo de entupimento se torne perceptível; alívio da obstrução causada pelo UCD até que a vazão de *underflow* retorne ao regime de corda (aumento da área disponível ao escoamento ao fixar o UCD de modo a reduzir a obstrução causada por sua presença de 83 para 73%) e retorno do UCD à posição inicial ($Z = 83\%$). Ressaltando que a coleta de amostras foi realizada também durante o período no qual o UCD esteve posicionado de modo a obstruir apenas 73% da área do duto de *underflow*. A duração total deste ensaio também foi de aproximadamente 1 hora.

A Figura 3.10 mostra os fluxogramas que representam as rotinas dos dois tipos de ação do UCD, isto é, remediando e prevenindo o entupimento.

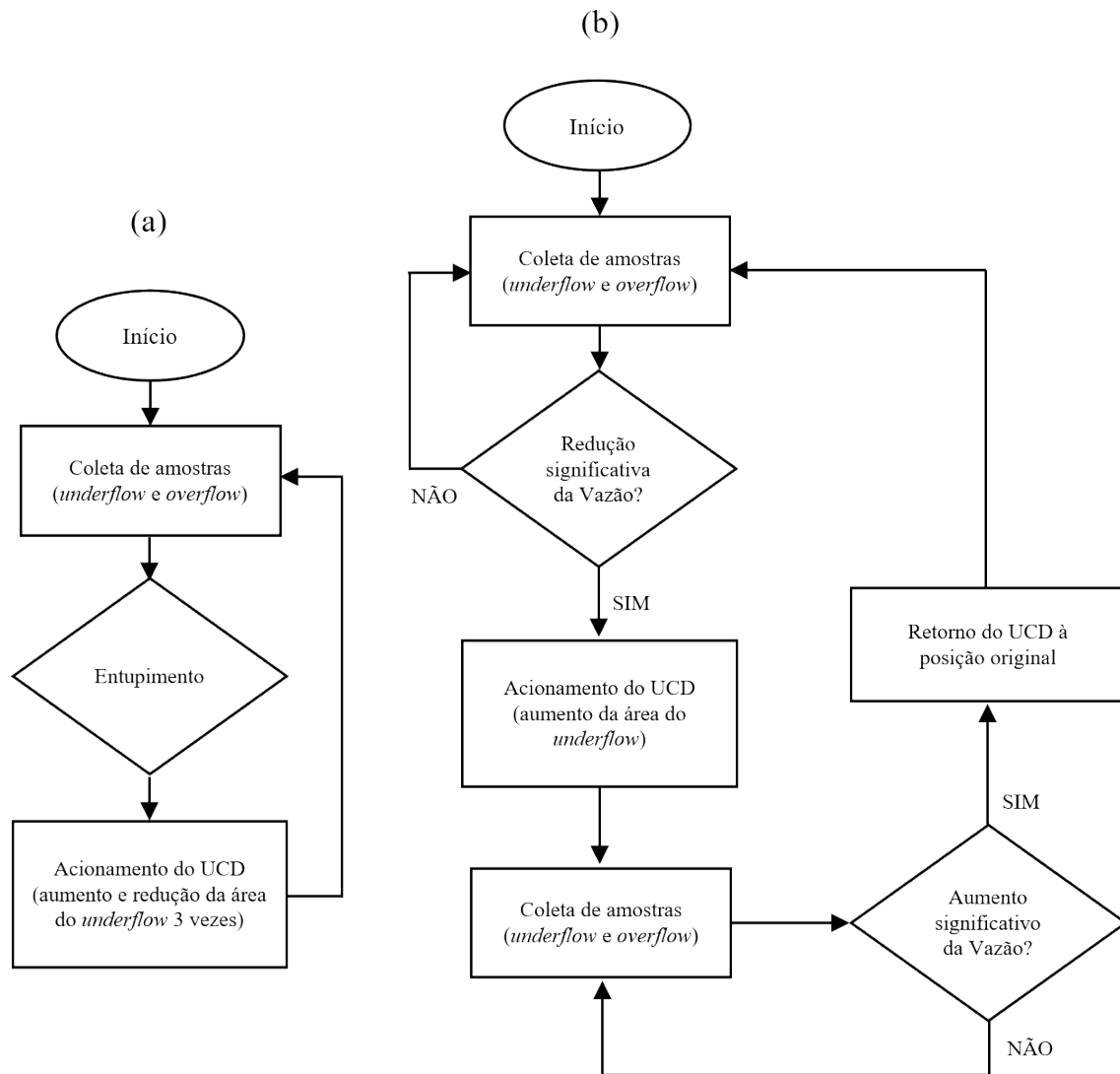


Figura 3.10 - Rotinas para o acionamento do UCD: a) na remediação e b) na prevenção de entupimentos.

3.6 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

As técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) já provaram ser uma ferramenta confiável na previsão dos campos de fluxo no interior de hidrociclones e podem apoiar estudos mais detalhados, reduzindo o número de experimentos e/ou facilitando a investigação de novas geometrias, parâmetros e variáveis (NOROOZI & HASHEMABADI, 2011; MOKNI et al., 2015; SILVA et al., 2020).

Neste trabalho, as técnicas de CFD foram utilizadas para verificar como a presença e a posição do UCD influencia na fluidodinâmica interna do hidrociclone. Para tal, os campos de pressão e contorno das fases no hidrociclone foram simulados numericamente

usando o código FLUENT® 16.0 CFD. O SolidWorks® 2019 foi usado para criar a geometria e o ICEM® 16.0 para a malha e especificação de condições de contorno.

As simulações foram realizadas com um solucionador tridimensional de dupla precisão, considerando uma formulação transiente implícita de primeira ordem e assumindo a operação do hidrociclone somente com água (sem partículas). As condições de contorno foram estabelecidas utilizando uma entrada de fluxo de massa de fluido constante de 900 g/s e pressão atmosférica nas saídas de *underflow* e *overflow*. Para a avaliação do núcleo de ar (*air core*), foi selecionado o Modelo de Volume de Fluido (VOF) e habilitada a entrada de ar nas duas saídas de fluxo do hidrociclone. A solução numérica das equações foi baseada no Método do Volume Finito e foi escolhido o Modelo de Turbulência de Simulação por Grandes Escalas (LES).

Na Tabela 3.3 é mostrado um resumo das condições de contorno e os modelos adotados nas simulações numéricas.

Tabela 3.3 – Condições de contorno e modelo adotados nas simulações.

Propriedade	Informação
Vazão mássica na entrada	0,9 kg/s
Pressão atmosférica local	101,325 kPa
Fluido	Água
Densidade do fluido	998,2 kg/m ³
Viscosidade do fluido	0,001003 kg/m.s
Pressão nas saídas (<i>overflow</i> e <i>underflow</i>)	Pressão atmosférica
Modelo de Turbulência	LES
Regime	Transiente
Esquema de acoplamento pressão – velocidade	SIMPLE
Discretização espacial – Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Discretização espacial – Pressão	PRESTO!
Discretização espacial – Momento	QUICK
Formulação Transiente	Implícita de 1ª ordem
Critério de convergência (resíduo máximo)	1·10 ⁻⁴
Passo no tempo (<i>time step</i>)	1·10 ⁻⁶ s

Para verificar a influência da presença do UCD foram realizadas simulações com o dispositivo em diferentes posições resultando em percentuais de obstrução da área do duto de *underflow* (Z) entre 60 e 95%.

A geometria utilizada nas simulações foi criada através do *software* SolidWorks® 2019 nas mesmas dimensões do hidrociclone utilizado nos ensaios, isto é, D_c de 45 mm e D_u igual a 12 mm. Na construção da geometria e da malha levou-se em consideração apenas a parte do UCD alojada internamente no duto de *underflow*.

A Figura 3.11 mostra uma das malhas computacionais geradas através do *software* ICEM® 16.0. Para todas as posições do UCD foram geradas malhas poliédricas de elementos hexagonais, contendo em média 497.000 células.

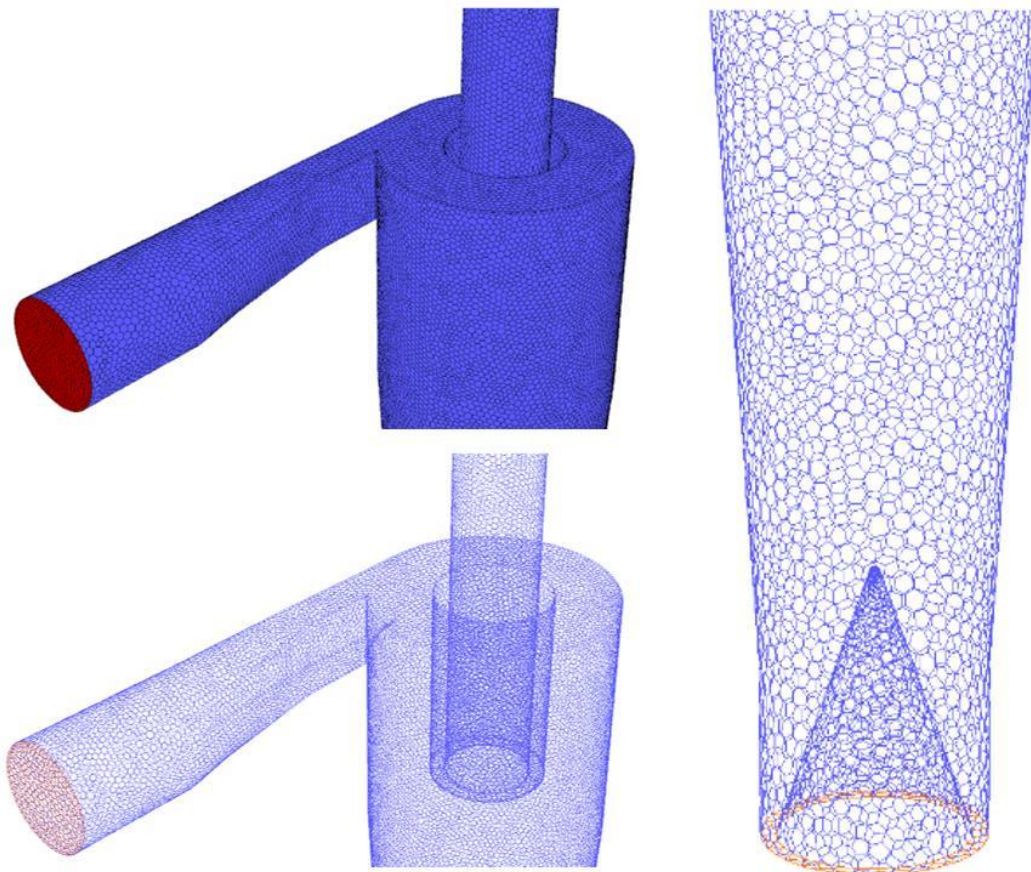


Figura 3.11 – Exemplo de malha computacional.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados nesse capítulo tanto os resultados relativos aos ensaios experimentais de hidrociclonagem realizados com o dispositivo proposto (UCD) quanto os resultados das simulações computacionais.

4.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Como mostrado no Capítulo 3, foram realizados 5 grupos de ensaios experimentais que visaram desenvolver e testar um dispositivo que ao ser acoplado à saída inferior de hidrociclones fosse capaz de prevenir e/ou remediar entupimentos. A seguir serão apresentados os resultados de todos esses ensaios.

4.1.1 PCC EXPLORÁTORIO

A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 apresentam os resultados obtidos nos ensaios que constituíram o PCC exploratório.

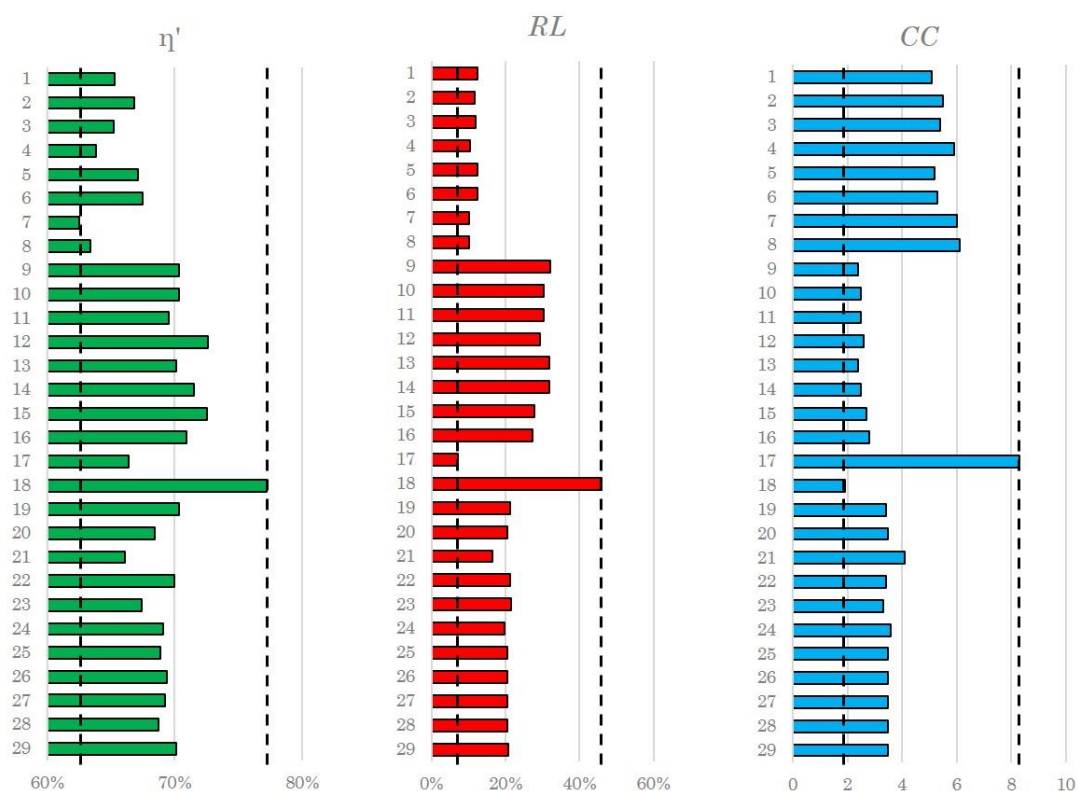


Figura 4.1 - Resultados do PCC Exploratório.

Tabela 4.1 - Resultados do PCC Exploratório.

Ensaio	Du	β	Z	P	RL	η'	CC
1	-1	-1	-1	-1	12,5	65,3%	5,1
2	-1	-1	-1	+1	11,7	66,8%	5,5
3	-1	-1	+1	-1	11,8	65,2%	5,4
4	-1	-1	+1	+1	10,3	63,8%	5,9
5	-1	+1	-1	-1	12,4	67,1%	5,2
6	-1	+1	-1	+1	12,3	67,5%	5,3
7	-1	+1	+1	-1	10,0	62,5%	6,0
8	-1	+1	+1	+1	10,0	63,4%	6,1
9	+1	-1	-1	-1	32,0	70,3%	2,4
10	+1	-1	-1	+1	30,3	70,3%	2,5
11	+1	-1	+1	-1	30,4	69,5%	2,5
12	+1	-1	+1	+1	29,3	72,6%	2,6
13	+1	+1	-1	-1	31,9	70,1%	2,4
14	+1	+1	-1	+1	31,8	71,5%	2,5
15	+1	+1	+1	-1	27,9	72,5%	2,7
16	+1	+1	+1	+1	27,3	70,9%	2,8
17	-2	0	0	0	7,0	66,4%	8,3
18	+2	0	0	0	45,9	77,2%	1,9
19	0	-2	0	0	21,3	70,3%	3,4
20	0	+2	0	0	20,5	68,4%	3,5
21	0	0	-2	0	16,3	66,1%	4,1
22	0	0	+2	0	21,2	70,0%	3,4
23	0	0	0	-2	21,4	67,4%	3,3
24	0	0	0	+2	19,7	69,1%	3,6
25	0	0	0	0	20,5	68,9%	3,5
26	0	0	0	0	20,4	69,4%	3,5
27	0	0	0	0	20,4	69,2%	3,5
28	0	0	0	0	20,4	68,7%	3,5
29	0	0	0	0	20,6	70,1%	3,5

Analisando os 16 primeiros ensaios do planejamento, (conduzidos nos níveis +1 e -1 das variáveis independentes) é possível notar a influência mais acentuada que o diâmetro do *underflow* possui sobre as respostas analisadas. De maneira geral, a eficiência de separação se manteve em torno de 65% para $Du = 8$ mm (ensaios 1 a 8) e 70% para $Du = 12$ mm (ensaios 9 a 16).

Nos pares em que ocorre a passagem do nível inferior de pressão (25,5 psi) para o nível superior (29,5 psi) mantendo-se constante as demais variáveis (ensaios 1 e 2, 3 e 4, até 15 e 16), assim como nos pares em que apenas o ângulo do UCD foi alterado, (por exemplo nos ensaios 2 e 6, 9 e 13) nota-se que tais mudanças praticamente não tiveram efeito nas três respostas analisadas (razão de líquido, eficiência reduzida e capacidade concentradora) indicando que os níveis adotados não foram suficientes para causar mudanças significativas na operação.

O ensaio 18 foi o que apresentou a maior eficiência de separação (77,2%), a maior razão de líquido (45,9) e a menor capacidade concentradora (1,9). Tal ensaio foi conduzido com o maior diâmetro de *underflow* (14 mm) e nos níveis centrais das demais variáveis. O ensaio com o menor Du testado (ensaio 17, $Du = 6$ mm) apresentou 66% de eficiência (valor intermediário), a maior capacidade concentradora (8,3) e a menor razão líquido (7,0). Este resultado indica que esta redução de mais de 50% no diâmetro do *underflow* foi capaz de reduzir em 80% a razão de líquido e aumentar a capacidade concentradora em mais de 4 vezes sem proporcionar uma grande redução na eficiência de separação.

Os ajustes dos dados obtidos nos ensaios que constituíram o planejamento de experimentos são apresentados nas Equações 4.1-4.3, em que cada uma das respostas (RL, η' e CC) é expressa em função das variáveis independentes em sua forma codificada, Du , (diâmetro do *underflow*), β , (ângulo do UCD), Z (porcentagem de obstrução) e P (pressão). Foram omitidos nas equações dos modelos matemáticos os parâmetros não significativos.

Em todos os ajustes não foram observadas tendências na distribuição dos resíduos, que ocorreram de forma aleatória em torno da média, indicando uma distribuição normal.

$$RL = 20,26 + 9,49Du + 1,37Du^2 - 0,55Z^2 \quad (R^2 = 0,98) \quad (4.1)$$

$$\eta' = 68,15 + 2,82Du + 0,59Du^2 + 0,95Du \cdot Z \quad (R^2 = 0,81) \quad (4.2)$$

$$CC = 3,51 - 1,54Du + 0,42Du^2 + 0,08Z^2 \quad (R^2 = 0,97) \quad (4.3)$$

Já as superfícies de resposta são apresentadas na Figura 4.2. Em cada gráfico foi plotado o comportamento de uma resposta versus duas variáveis independentes em sua forma codificada, sendo que cada superfície foi gerada fixando o valor das demais variáveis no ponto central, isto é, no nível 0 do PCC.

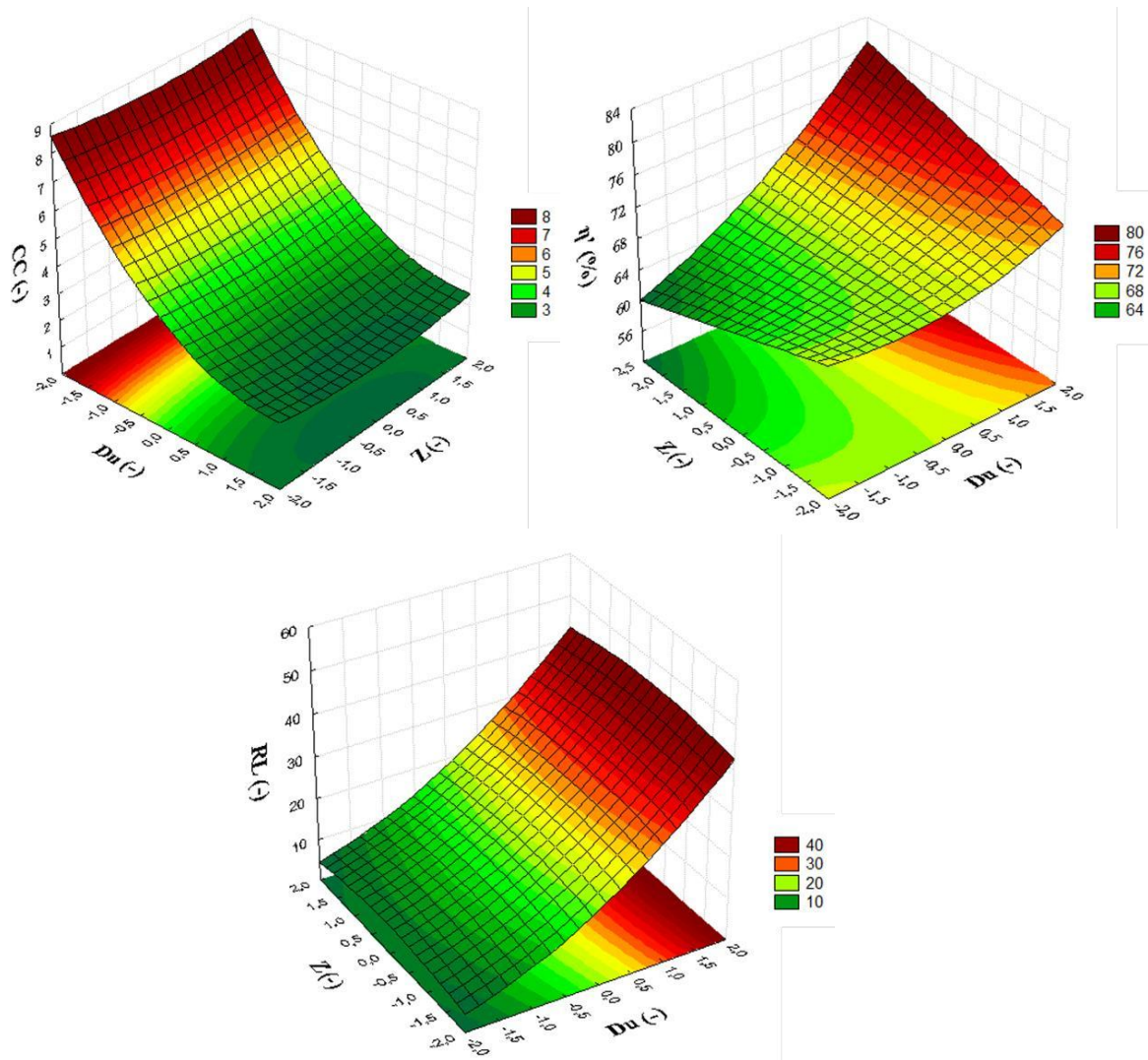


Figura 4.2 - Superfícies de Resposta.

De acordo com os modelos matemáticos obtidos através dos ajustes dos dados experimentais (Equações 4.1-4.3), apenas o diâmetro do *underflow* (Du) e a porcentagem de obstrução (Z) influenciaram significativamente as três respostas analisadas.

Razão de Líquido (RL) e Capacidade de Concentração (CC) foram influenciadas pelos termos linear e quadrático relativo ao diâmetro do *underflow* e pelo termo quadrático relacionado a porcentagem de obstrução do duto de *underflow* devido a

inserção do UCD. Os resultados confirmaram como essas duas respostas estão atreladas e são inversamente proporcionais, uma vez que são influenciados pelos mesmos parâmetros, porém de modo antagônico: RL aumenta com o aumento de Du e a diminuição de Z , enquanto que a CC aumenta com a redução de Du e o aumento de Z .

Já a eficiência reduzida (η') foi influenciada positivamente tanto pelo aumento do diâmetro do *underflow* como pelo aumento da interação entre o diâmetro e a porcentagem de obstrução.

Como mostrado, há uma grande influência do diâmetro de *underflow* nas respostas analisadas, em especial na razão de líquido e na capacidade concentradora. Entretanto, em ambas as respostas, a presença do UCD modificou um pouco o perfil da curva, evidenciando uma região central na qual esse efeito é ainda mais pronunciado (nível intermediário de obstrução, com $Z = 30\%$).

Isto provavelmente ocorre, porque com grandes obstruções há uma maior desestabilização das correntes, forçando parte do concentrado a se misturar com a corrente de *air core* e seguir para o *overflow*, aumentando assim a razão de líquido e reduzindo a capacidade concentradora do equipamento. Quando a obstrução é pequena, tem-se o comportamento normal do hidrociclone na presença do *air core*, e a medida que esta obstrução aumenta, a corrente de ar vai sendo gradativamente suprimida, reduzindo os efeitos causados por ela, isto é, ocorre o aumento da capacidade concentradora do equipamento e a redução da razão de líquido.

Como o objetivo deste tipo de operação de separação é minimizar RL (maximizando CC) sem perder em eficiência, analisando as superfícies de respostas, tem-se que, nas condições estudadas, o ponto ótimo estaria nas regiões intermediárias de Du e Z , isto é, diâmetros de *underflow* em torno de 10 mm tendo 30% de sua área obstruída pelo UCD (níveis 0 do PCC).

A Figura 4.3 apresenta o Número de Euler obtido em cada um dos 29 ensaios que constituíram o Planejamento de Experimentos.

O Número de Euler (Eq. 4.4) é um parâmetro que representa a quantidade de energia consumida a partir do bombeamento do fluido através do hidrociclone, e por esse motivo, também é uma das variáveis de interesse no projeto e otimização do separador.

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot \frac{v_c^2}{2}} \quad (4.4)$$

Sendo ΔP a queda de pressão do sistema, ρ a densidade do fluido e v_c a velocidade na seção cilíndrica do hidrociclone.

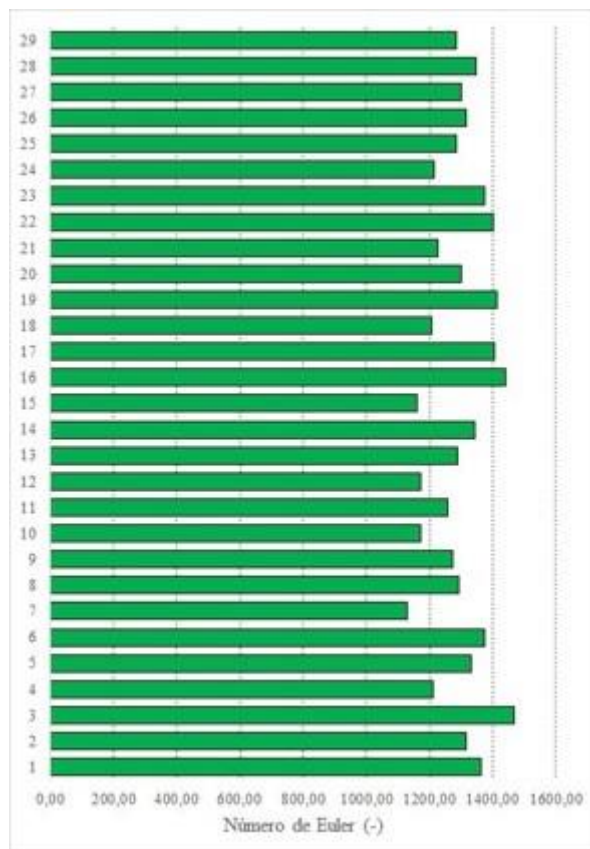


Figura 4.3 - Número de Euler.

Nota-se na Figura 4.3, que não houve mudanças significativas no valor de Euler com a inserção do UCD, uma vez que as variações entre os testes de mesmo Du se mantiveram na ordem do desvio experimental observado nas réplicas do PCC. Tal comportamento é um bom indício de que a presença do dispositivo, mesmo causando perturbações nas correntes, não aumentou o consumo energético da operação.

Durante a execução do PCC, alguns ensaios conduzidos com maior obstrução do *underflow* (45 e 60%) apresentaram uma tendência de entupimento onde foi notado inicialmente um aumento da concentração de sólidos seguido de um aumento mais acentuado da concentração de sólidos em conjunto com o aumento da pressão tendo por fim o entupimento total do hidrociclone. Nestes casos foi avaliada a possibilidade de se trabalhar em situações de pré-entupimento. Para se operar neste ponto, foram realizados ensaios acionando o UCD para causar desobstruções quando se aproximava do momento de entupimento total, sendo estes acionamentos previstos pelas oscilações na pressão.

Com isso foi possível analisar os resultados de vazão e concentrações de saída a longo prazo, sem que o hidrociclone apresentasse entupimento total.

Podendo ser utilizado como exemplo, a Tabela 4.2 apresenta o experimento 12 analisando sua operação sem entupimentos (no início do ensaio) e 12' em situação de pré-entupimento com acionamentos do UCD.

Tabela 4.2 - Comparação dos ensaios 12 e 12'

Ensaio	Du	B	Z	P	R_L	η'	CC
12	12 mm	37,5°	45%	29,5 psi	29,3	72,6%	2,6
12'	12 mm	37,5°	45%	29,5 psi	13,3	67,5%	4,9

É possível notar que ao se utilizar da capacidade do UCD de trabalhar em situações críticas, foi possível obter aumentos significativos na capacidade concentradora do equipamento sem grandes perdas na eficiência de separação. Neste ensaio a capacidade concentradora quase dobrou (aumentou de 2,6 para 4,9) enquanto que a redução na eficiência foi de apenas 5 pontos percentuais.

A partir deste resultado, foram realizados novos ensaios experimentais visando obter um maior entendimento do processo de entupimento e encontrar condições em que presença e/ou atuação do dispositivo favoreça o processo de separação. Para tal, optou-se por fixar a geometria do UCD e do diâmetro do *underflow* nos níveis +1 do PCC, isto é, β igual a 42,5° e Du igual a 12 mm. Já a pressão de todos os ensaios realizados após o PCC foi mantida em 25,5 psi.

4.1.2 VARREDURA ESPACIAL E TEMPORAL POR ENTUPIMENTOS

Primeiramente foi realizada uma varredura espacial na qual o UCD foi inserido gradativamente no duto inferior do hidrociclone reduzindo a área disponível de saída do *underflow* na faixa de obstrução estudada durante o PCC exploratório, isto é, causando obstruções de 30 a 60% da área total. Entretanto, durante a execução desses ensaios foi notado que no decorrer do tempo, devido a vibrações de todo o sistema, a posição do UCD não estava se mantendo fixa, o que comprometia toda a análise.

Foram realizadas algumas melhorias no sistema de fixação do dispositivo e então, ao refazer os ensaios, notou-se que na faixa até então estudada não ocorriam tendências a entupimentos. Deste modo, foram realizados novos ensaios aumentando-se ainda mais

a porcentagem de obstrução até atingir um entupimento instantâneo, o que ocorreu quando o UCD obstruiu aproximadamente 95% da área do orifício do duto de *underflow*.

A Figura 4.4 ilustra como ocorre a obstrução à medida que o dispositivo é inserido no duto do *underflow*.

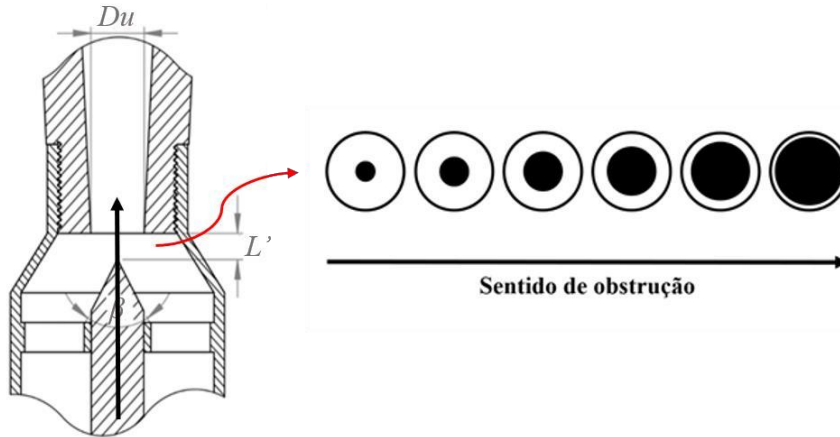


Figura 4.4 - Obstruções causadas pelo deslocamento do UCD.

Os resultados obtidos nesse novo conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.5, na qual é possível notar o efeito da porcentagem de área obstruída na concentração de sólidos das correntes do hidrociclone.

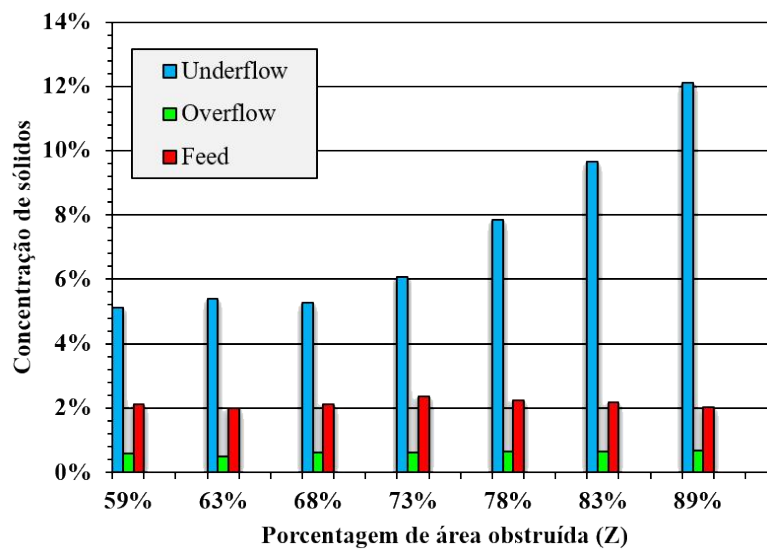


Figura 4.5 - Efeito da porcentagem de área obstruída na concentração de sólidos.

Analisando os resultados mostrados na Figura 4.5, nota-se que a inserção do dispositivo, em toda a faixa que antecedeu ao entupimento quase instantâneo (Z de aproximadamente 95%), praticamente não alterou a concentração de sólidos na corrente

de *overflow*, que se manteve em torno de 0,6%. Já a concentração de sólidos na corrente de *underflow* se manteve no patamar de 5% desde a ausência total do dispositivo até a obstrução de 68%, quando passou a aumentar com o aumento da porcentagem de obstrução, alcançando 12% de sólidos quando o orifício do duto de *underflow* se encontrava, aproximadamente, 90% obstruído pela presença do UCD.

É necessário salientar que o fato do desempenho do hidrociclone se manter praticamente constante mesmo o *Du* estando com quase 70% de obstrução, certamente está relacionado a escolha do diâmetro utilizado nos ensaios que constituíram essa varredura. O modelo otimizado por Mognon et al. (2015) apresentaria, para 45 mm de diâmetro da parte cilíndrica, um *Du* de 8 mm. Entretanto, foi utilizado um *Du* maior (12 mm) devido, principalmente, à dificuldade de se provocar alterações significativas no desempenho de um equipamento já otimizado.

Durante os ensaios que compreenderam a varredura espacial, foi notada a necessidade de se verificar o comportamento do processo ao longo do tempo. Isto porquê a obstrução total do orifício do duto de *underflow* ocorre devido ao acúmulo de material particulado naquela região. Sendo assim, foi necessário avaliar se após um longo período de obstrução parcial do *Du* pelo dispositivo, posições que antes não apresentaram entupimentos, poderiam entupir com o passar o tempo.

Foi realizado então, o acompanhamento ao longo do tempo do desempenho de separação do hidrociclone com diferentes porcentagens de obstrução do *underflow* provocadas pela presença do UCD. Os resultados destes ensaios que constituíram a chamada varredura temporal por entupimentos são apresentados na Figura 4.6.

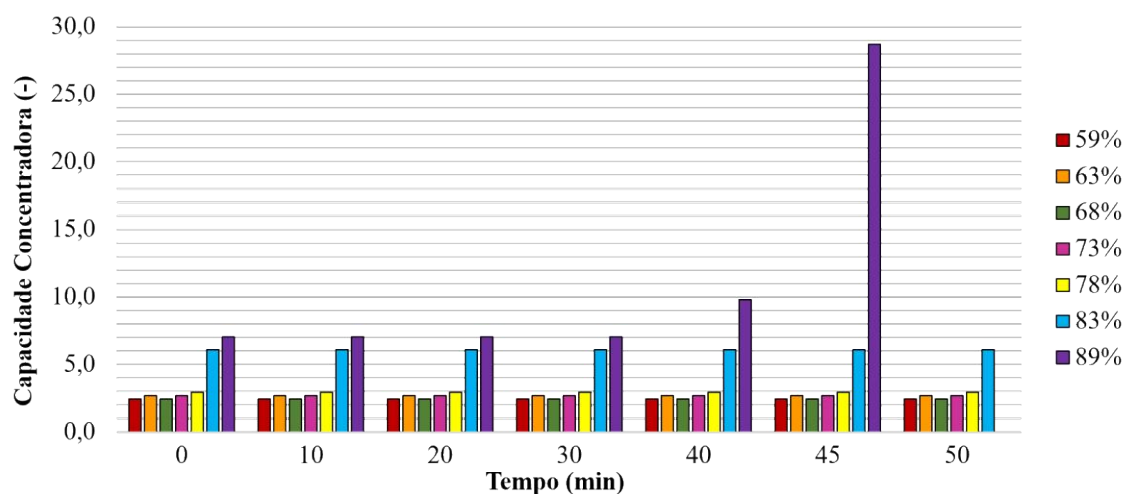


Figura 4.6 - Varredura Temporal por Entupimentos (concentração da alimentação igual 2% de sólidos)

Como previsto, os resultados dos novos ensaios mostraram que assim como a obstrução de 94%, a posição do UCD responsável por obstruir 89% da área de saída de *underflow* também provocou entupimento total do hidrociclone. Enquanto que ao obstruir 94% o entupimento foi quase instantâneo, com 89% de obstrução, o entupimento ocorreu aos 46 minutos de teste, após a Capacidade Concentradora apresentar uma subida acentuada (de 7 para 30 em 15 minutos).

Analizando a Figura 4.6 nota-se que enquanto a obstrução do duto de *underflow* foi de até 78%, a capacidade concentradora do hidrociclone se manteve praticamente constante em torno de 2,6 ao longo de todo o teste. Já com 83% de obstrução, a capacidade concentradora aumentou para 6,1. Tal resultado mostra que a presença do UCD em determinadas condições de operação é capaz de aumentar a capacidade concentradora sem gerar entupimentos e sem aumentar o custo energético da operação, por não alterar significativamente o Número de Euler (Eu), como é mostrado na Figura 4.7.

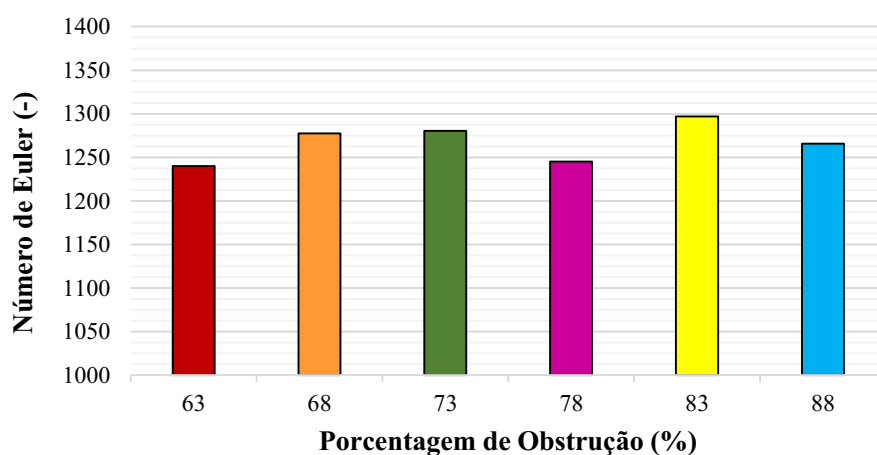


Figura 4.7 - Efeito da porcentagem de obstrução no Número de Euler.

4.1.3 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

O ensaio que constituiu a varredura temporal mostrada na Figura 4.6 foi conduzido com 2% de sólidos na suspensão alimentada ao hidrociclone, entretanto, nas plantas de controle de sólidos, essa concentração pode variar chegando a valores superiores a 10%. Por esse motivo também foi avaliado o efeito que a concentração de sólidos na corrente de alimentação possui na ocorrência de entupimentos ao se utilizar o UCD acoplado ao hidrociclone. Os resultados obtidos nos ensaios com 4, 6, 8 e 10% em massa de sólidos na suspensão que alimenta o processo de separação são apresentados na Figura 4.8.

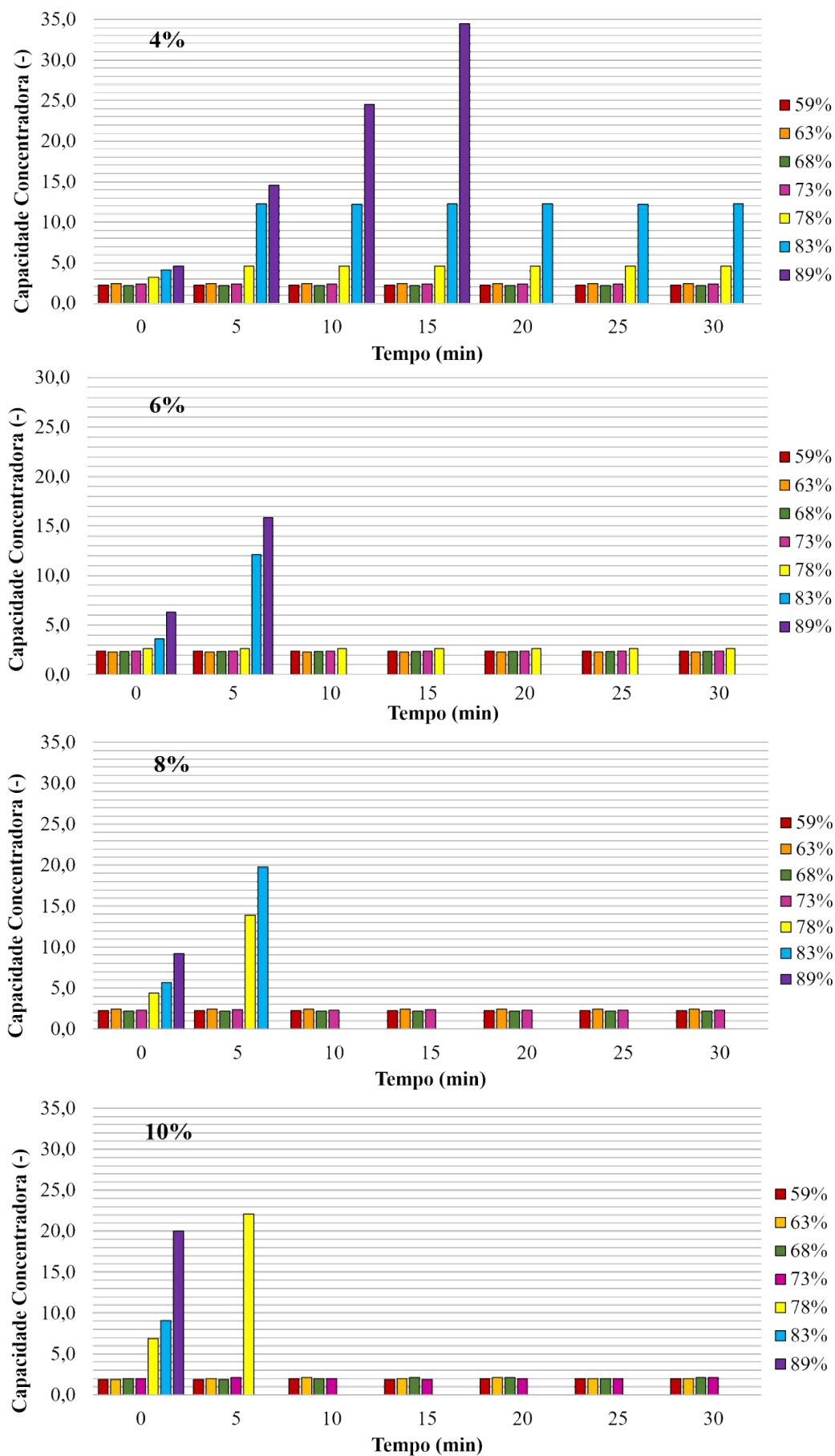


Figura 4.8 - Efeito da concentração da alimentação na ocorrência de entupimentos.

Como esperado, os resultados apresentados na Figura 4.8 mostram que o aumento da concentração de sólidos presentes na corrente de alimentação tem forte influência na ocorrência de entupimentos. Enquanto que para a suspensão contendo 2% de sólidos (Figura 4.6), os entupimentos ocorreram após 45 minutos para a obstrução causada pelo UCD de 89%, com 4% e 6% de sólidos esse tempo foi reduzido, respectivamente, para 15 e 5 minutos, considerando essa mesma obstrução de 89%. Já os ensaios que utilizaram as maiores concentrações (8 e 10% de sólidos) apresentaram entupimentos praticamente instantâneos quando o UCD obstruía 89% da área de saída do *underflow*.

Ainda analisando os resultados obtidos nesse conjunto de ensaios, destaca-se o aumento estável da capacidade concentradora ao se provocar obstruções do duto de *underflow* pela presença do UCD iguais a 78 e 83% nos testes que utilizaram 4% de sólidos na alimentação. Com porcentagens de obstrução de até 73%, a capacidade concentradora se manteve em aproximadamente 2,4, aumentando para 4,6 para $Z = 78\%$ e 10,4 quando 83% do orifício do duto de *underflow* estava obstruído pelo UCD.

Já para a concentração de 6% não foi observado um valor de Z que aumentasse a capacidade concentradora sem favorecer a ocorrência de entupimentos. Com obstruções de até 78%, a capacidade concentradora se manteve constante e em torno de 2,5 enquanto que em situações de pré-entupimento esse valor foi de 12 e 16, com o UCD posicionado de modo a causar, respectivamente 83 e 89% de obstrução.

É importante salientar que apesar da Figura 4.8 não apresentar os resultados obtidos em toda a duração dos ensaios, o comportamento do processo se manteve constante durante as 2 horas de duração de cada teste.

Nos ensaios que utilizaram as maiores concentrações de sólidos na alimentação, isto é, 8 e 10%, foram observados entupimentos a partir da posição do UCD responsável por causar 78% de obstrução do duto de *underflow*. Cabe ressaltar aqui que, a partir da concentração de 8%, a bomba utilizada para alimentar a suspensão se encontrava operando em seu limite máximo de potência. Já nos ensaios com 10% não foi possível alcançar a mesma pressão dos demais ensaios, o que certamente influenciou nos resultados obtidos.

Para ser fiel às condições reais de operação em campo, almejava-se realizar testes com suspensões mais concentradas, entretanto devido às limitações da unidade experimental não foi possível operar com valores superiores a 10% de sólidos. Para tal

seria necessário o aumento de escala do hidrociclone e a troca da bomba por outra de maior potência.

4.1.4 AÇÃO DO UCD NA PREVENÇÃO E REMEDIAÇÃO DE ENTUPIMENTOS

Após analisar os resultados obtidos nos ensaios anteriormente realizados e verificar em quais condições ocorreram entupimentos não instantâneos, ou seja, aquelas condições nas quais os entupimentos ocorreram devido ao acúmulo de partículas com o passar do tempo, escolheu-se o teste conduzido com 6% de sólidos na suspensão de alimentação e 83% de obstrução pelo UCD como a condição ideal para se avaliar a capacidade do UCD frente à ocorrência de entupimentos.

Como descrito no item 3.5.5 foram realizados dois tipos de ensaios, um que visou avaliar a capacidade do UCD de prevenir entupimentos e outro que visou avaliar sua capacidade de remediar entupimentos. Os resultados de ambos os ensaios são mostrados na Figura 4.9.

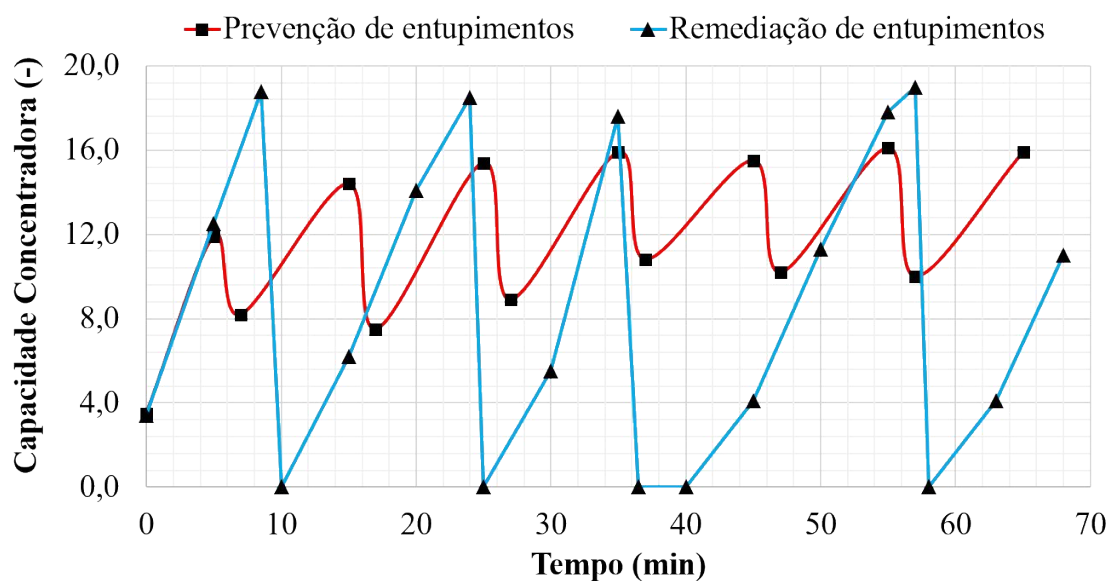


Figura 4.9 - Ação do UCD na prevenção e na remediação de entupimentos.

Observando os resultados obtidos nota-se o comportamento distinto do processo de separação para cada tipo de resposta do UCD. A curva que representa a capacidade concentradora em função do tempo quando o dispositivo foi utilizado para remediar entupimentos possui maior amplitude em comparação com a curva obtida a partir das amostras coletadas durante a ação preventiva do UCD.

Tal fato se justifica pela maneira como os dados foram coletados. Como durante a ação corretiva permitia-se a total obstrução do duto de *underflow*, os dados coletados instantes antes do entupimento apresentam altos valores de capacidade concentradora (amostra coletada durante o início do gotejamento) e são seguidos de um valor nulo (zero) que representa a parada de operação devido ao entupimento.

Durante a execução deste ensaio, o terceiro entupimento se deu de modo mais severo, não sendo possível restituir o fluxo de *underflow* pelo acionamento do UCD (aumento e redução da área disponível ao escoamento por três vezes seguidas). Neste caso foi necessário a total retirada do dispositivo e a inserção de uma haste rígida para auxiliar na remoção do material particulado presente ao longo do cone do separador. Tal operação durou cerca de 5 minutos e após desentupido, deu-se prosseguimento ao ensaio e à coleta de amostras.

Devido ao fato da área disponível ao escoamento na escala utilizada neste trabalho ser bastante reduzida quando comparada à escala que seria utilizada em plantas reais, a simples presença de partículas estranhas ao ensaio (fora da faixa granulométrica do material utilizado), como por exemplo, um inseto, é capaz de provocar o entupimento do sistema. Isto porque a área disponível ao escoamento para uma obstrução de 83% resulta em uma distância entre a parede do cone e a parede do UCD de apenas 0,5 mm. Esta pode ser uma hipótese que justifique este entupimento mais severo durante o ensaio. Após a remontagem do sistema, o ensaio seguiu com normalidade e aguardou-se o próximo entupimento seguido do desentupimento pela ação do UCD para finalizar o teste.

Já analisando a curva que representa a ação preventiva do UCD nota-se o comportamento mais constante do processo quando o dispositivo é utilizado para prevenir ao invés de remediar episódios de entupimento. Durante o tempo de duração do referido ensaio, o UCD foi acionado 6 vezes e obteve sucesso na prevenção dos entupimentos.

E mesmo tendo sua posição alterada ao longo do ensaio como manobra para prevenir os entupimentos, a presença do UCD obstruindo parte da área de escoamento do *underflow* foi novamente responsável por manter uma alta capacidade concentradora do hidrociclone em comparação com sua operação sem o UCD.

Como mostrado na Figura 4.8, ao utilizar 6% de sólidos na alimentação, a capacidade concentradora do hidrociclone utilizado é de aproximadamente 2,5 na operação conduzida desde a ausência do UCD até a posição na qual ele é responsável por

obstruir 78% da área do duto de *underflow*. Lembrando que o valor de Du utilizado neste trabalho é 50% superior ao valor original, otimizado por Mognon et al. (2015) o que justifica sua operação mesmo para altos percentuais de obstrução. Já no ensaio que o UCD foi utilizado para prevenir entupimentos, a capacidade concentradora média calculada através das amostras coletadas foi de $11,4 \pm 3,7$.

Tal resultado confirma a eficiência do dispositivo proposto para operar em situações de pré-entupimento e também como ferramenta de ajuste da área disponível a corrente *underflow* em equipamentos já existentes que estejam mal dimensionados ou como modo de compensar as oscilações das condições de operação em campo como mostrado nos resultados preliminares de Silva (2017). Como é comum em operações reais que ocorram oscilações na vazão e concentração da corrente de alimentação ao longo do processo, nestes casos a presença do UCD também pode ser utilizada como ferramenta para reduzir o efeito dessas oscilações de modo a manter o hidrociclone operando o mais próximo de suas condições ótimas.

4.2 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Com o objetivo de melhorar o entendimento acerca da influência da presença do UCD no regime de escoamento do hidrociclone e na formação e/ou estabilidade do *air core*, foram realizadas simulações numéricas com o dispositivo posicionado em diferentes posições resultando em percentuais de obstrução da área do duto de *underflow* (Z) entre 60 e 95%, aproximadamente.

A Figura 4.10 mostra alguns dos perfis simulados de distribuição de pressão ao longo do hidrociclone, para as obstruções de 68, 83 e 94%, respectivamente. Já a Figura 4.11 mostra os perfis de distribuição de fases (ar/água) na ausência do UCD e quando ele é fixado de modo a obstruir 83% do duto de *underflow*. Na escala utilizada 1 (um) representa 100% de água e 0 (zero) corresponde a 100% de ar. Todos esses perfis foram gerados a partir de um corte longitudinal e simétrico ao longo do centro do hidrociclone, considerando um tempo de 1,5 segundos de simulação.

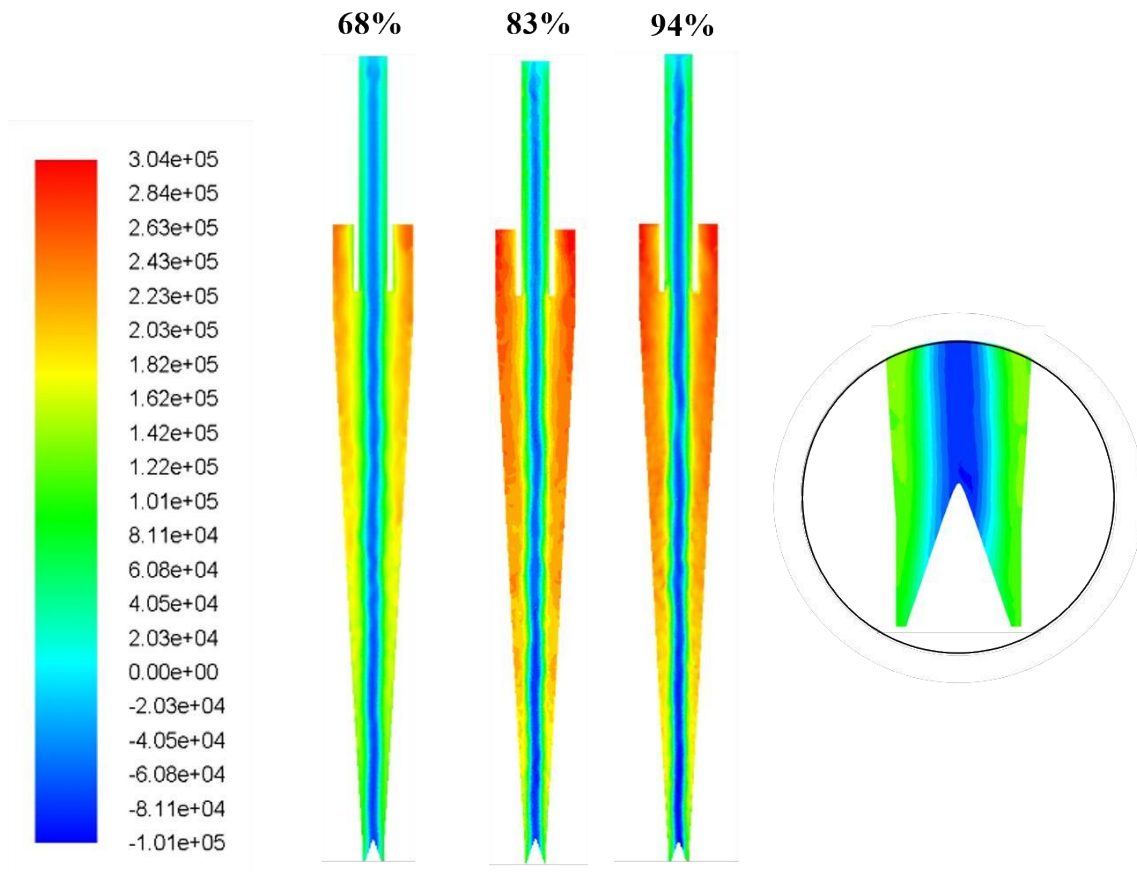


Figura 4.10 - Perfis de distribuição de pressão ao longo do hidrociclone para diferentes posições do UCD.

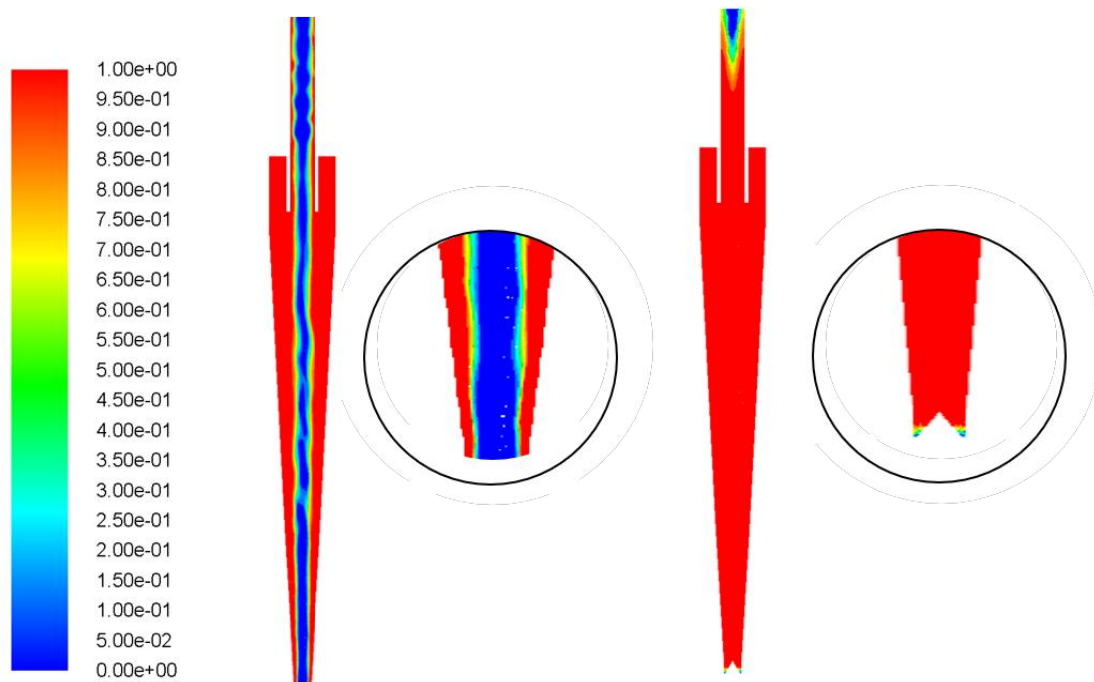


Figura 4.11 - Perfis de distribuição de fases (ar/água) no interior do hidrociclone na ausência (à esquerda) e na presença do UCD com $Z = 68\%$ (à direita).

Analisando os perfis obtidos, é possível destacar, nas condições avaliadas, a capacidade do UCD de suprimir o *air core* ao obstruir parte do duto de *underflow*, se tornando um obstáculo para a entrada do ar por aquela região.

Observando a Figura 4.10 nota-se a formação do núcleo central de baixa pressão que ocorre devido ao escoamento turbilhonar intenso deste tipo de equipamento de separação. Entretanto, devido à presença do UCD, essa zona não se conecta com a saída inferior do hidrociclone, impedindo o preenchimento deste núcleo por uma corrente de ar estável. No zoom dado na imagem da direita da Figura 4.11 é possível notar que há uma pequena fração de ar apenas na saída do duto de *underflow* e no topo do duto de *overflow*, mas estas frações não conseguem alcançar/preencher o núcleo central do hidrociclone.

A supressão do *air core* torna o processo mais eficiente, uma vez que, segundo Gupta et al. (2008), a presença desta corrente central de ar aumenta a queda de pressão ao causar mais turbulência dentro do hidrociclone.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas nos ensaios que visaram avaliar o desempenho do dispositivo proposto e também propõe algumas sugestões para os próximos trabalhos que darão sequência a esta pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais que visaram analisar e desenvolver um dispositivo capaz de ser utilizado na remediação e prevenção de entupimentos de hidrociclones, pode-se concluir que o protótipo proposto, denominado UCD (*Unclog Conical Device*) alcançou os objetivos almejados, se mostrando uma opção promissora para ser implementada não só pela indústria do petróleo como pelos diversos setores industriais que também buscam por soluções frente aos constantes entupimentos de seus hidrociclones.

Através da execução dos ensaios experimentais que constituíram as chamadas Varredura Espacial e Temporal por entupimentos foi possível obter um maior entendimento acerca do processo de entupimento e também verificar o efeito positivo da presença do UCD em determinadas posições, ao promover o aumento da capacidade concentradora, sem aumentar o gasto energético da operação.

Já quando avaliada a capacidade do UCD em remediar e/ou prevenir entupimentos, foi mostrado que o dispositivo proposto obteve êxito nas duas situações, sendo o controle preditivo mais eficaz por causar menos distúrbios no processo de separação.

Por fim, as simulações numéricas mostraram que, nas condições estudadas, a presença do UCD obstruindo parte do duto de *underflow* se configurou como um obstáculo para a formação do *air core*, fenômeno este, conhecido por causar maior perda de carga ao desestabilizar as correntes de fluxo internas dos hidrociclones, reduzindo o desempenho da operação.

De modo geral, o dispositivo desenvolvido durante este trabalho se mostrou capaz de atuar prevenindo e remediando os entupimentos causados principalmente pela formação de aglomerados de sólidos finos na saída da corrente concentrada, além de

aumentar a capacidade concentradora do separador em várias vezes ao manter o equipamento operando em condições de pré-entupimento e ainda suprimir a formação do *air core*.

Além disso, foi mostrado como o dispositivo também pode ser utilizado como ferramenta de ajuste da área disponível a corrente de *underflow* em equipamentos já existentes que estejam mal dimensionados ou como modo de compensar as oscilações das condições de operação em campo.

Nas operações de exploração de petróleo, por exemplo, a vazão e a concentração da suspensão de fluido e cascalho que chega à superfície para ser separada pelo sistema de controle de sólidos variam muito a depender do estágio da perfuração do poço. Nestas situações a presença do UCD pode ser utilizada como forma de ajustar a área do duto de *underflow* frente a essas oscilações de modo a manter os hidrociclones operando o mais próximo de suas condições ótimas.

Outra vantagem do UCD é que ele pode ser confeccionado em materiais baratos, desde que apresentem uma boa resistência à abrasão e baixa absorção de água, como por exemplo, poliuretano através de injeção por moldes, caso seja fabricado em larga escala ou sendo usinado em poliacetal levando a geometrias com alta precisão e mantendo as características físicas próximas às do poliuretano. A depender da necessidade da aplicação, o dispositivo desobstrutor pode, também, ser construído a partir de materiais ainda mais resistentes e ser utilizado em operações onde o desgaste é intenso, como na operação com sólidos abrasivos, mas mesmo em situações críticas, sua substituição é bastante simples e rápida podendo ser realizada por qualquer operador em campo.

Embora os ensaios que constituíram este trabalho tenham sido realizados utilizando controle manual do UCD, é possível realizar seu acionamento de modo mecânico, utilizando por exemplo, motor de passo com biela ou engrenagens para promover seu deslocamento. Além disso, através de técnicas de automação é possível realizar o controle do processo de prevenção e/ou remediação de entupimentos, tendo como sinal de entrada as leituras das vazões das correntes de alimentação e de *underflow*, e como resposta a movimentação do UCD de modo a provocar alterações na área disponível ao escoamento do *underflow*. Através do controle mecânico preditivo certamente será possível alcançar resultados ainda superiores aos deste trabalho, mantendo o hidrociclone operando sempre em regime de pré-entupimento.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a continuidade dos estudos iniciados por este trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros são expostas a seguir:

- Realizar ensaios utilizando hidrociclones de maiores escalas, que irão permitir operar com suspensões de maior concentração de sólidos, se aproximando mais das condições reais de campo.
- Automatizar as rotinas de acionamento do UCD, tornando mais precisas as ações de prevenção e remediação de entupimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVES, D. G. *Hidrociclones aplicados à separação sólido-líquido de suspensões contendo: areia, esferas ocas de vidro e fluido não-newtoniano*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.52>

BERGSTRÖM, J. *Flow field and fibre fractionation studies in hydrocyclones*. Tese, School of Chemical Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006.

BICALHO, I. C. *Concentração de leveduras da fermentação alcoólica em hidrociclones*. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

BRADLEY, D. *The Hydrocyclone*, Pergamon, Oxford, 1965.

CALDELMAN, S. *Hydrocyclone*. U.S. Patent Application n. 10/515,321, 2006.

CREMASCO, M. A. *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos e outros trabalhos*. *Blucher*, 2014.

CRUZ, O. C. *Desempenho de um hidrociclone de geometria Rietema como pré-filtro para sistemas de irrigação*. Tese de Doutorado em Agronomia – Faculdade de Ciências Agra-rias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, SP, 2008.

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

DUBEY, R. K.; SINGH, G.; MAJUMDER, A. K. ROPING: Is it an optimum dewatering performance condition in a hydrocyclone. *Powder Technology*, v. 321, p. 218-231, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.018>

DWARI, R. K.; BISWAS, M. N.; MEIKAP, B. C. Performance characteristics for particles of sand FCC and fly ash in a novel hydrocyclone. *Chemical Engineering Science*, v. 59, n. 3, p. 671-684, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.11.015>

FRYKHULT, R. Cyclone separator with *underflow* diluter. U.S. Patent n. 3,785,489, 15 jan. 1974.

GUPTA, R., KAULASKAR, M. D., KUMAR, V., SRIPRIYA, R., MEIKAP, B. C., & CHAKRABORTY, S. Studies on the understanding mechanism of air core and vortex formation in a hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal*, 144(2), 153-166, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.01.010>

HARTMANN, R. Process for discharging impurities from a hydrocyclone and a hydrocyclone. U.S. Patent n. 6,284,096, 4 set. 2001.

KUCHER, V.; LILIENGREN, G.; BACKMAN, J. Bi-directional lower cone dilution device. U.S. Patent n. 9,914,139, 13 mar. 2018.

MALAGALAGE, A., RATNAYAKE, C., ARIYARATNE, W. K. H., MELAAEN, M. C., & AAS, N. Pneumatic Conveying of Model Drill Cuttings-Pilot Scale Experiments and Simulations. In SPE Bergen One Day Seminar. *Society of Petroleum Engineers*, 2017. <https://doi.org/10.2118/185899-MS>

MOGNON, J. L. *Mini-hidrociclones aplicados ao Sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo*. 91f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

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

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

- MOKNI, I., DHAOUADI, H., BOURNOT, P., & MHIRI, H. Numerical investigation of the effect of the cylindrical height on separation performances of uniflow hydrocyclone. *Chemical Engineering Science*, 122, 500-513, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.09.020>
- MYERS, R. H., & MONTGOMERY, D. C. Response Surface Methodology. Wiley. New York, 2009.
- NEESSE, T. & DUECK, J. Air core formation in the hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 20(4), 349-354, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.01.007>
- NEESSE, T., SCHNEIDER, M., GOLYK, V., & TIEFEL, H. Measuring the operating state of the hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 17(5), 697-703, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.015>
- NOROOZI, S.; HASHEMABADI, S. H. CFD analysis of inlet chamber body profile effects on de-oiling hydrocyclone efficiency. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 89, n. 7, p. 968-977, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.017>
- NOWAKOWSKI, A. F., CULLIVAN, J. C., WILLIAMS, R. A., & DYAKOWSKI, T. Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones. Is this a realizable option or still a research challenge? *Minerals Engineering*, 17(5), 661-669, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.018>
- PANISSET, C. M. A. *Novas alternativas para o sistema de separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo: teste de uma unidade de VCS; busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclonagem; tratamento da borra de centrifugação por microondas*. 301f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2014.
- PETRI, I. J. *Descontaminação de cascalho de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo*. 148f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017
- SANTOS, J. M. dos. *Otimização do processo em batelada de descontaminação de cascalho de perfuração via aquecimento por micro-ondas*. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SCHAFFEL, S. B. *A Questão Ambiental na Etapa de Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil*. Dissertação (Mestrado) | Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SCHAPPEL, S. C., & CHASE, G. G. Modeling of Hydrocyclone Flows with Permeable Walls. *Advances in Filtration and Separation Technology*, 11, 33-38, 1998.

SILVA, D. O. *Otimização da separação sólido-líquido em hidrociclones mediante modificações geométricas*. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SILVA, J. M. *Ajuste mecânico de abertura do Apex em hidrociclones*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

SILVA, J. M., BICALHO, I. C.; ATAÍDE, C. H. *Desenvolvimento de dispositivo para acoplamento em hidrociclones na prevenção de entupimentos*. In: VII Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração de Poços de Petróleo, 2017.

SILVA, J. M., BICALHO, I.C. & ATAÍDE, C. H. Mechanical device designed for preventing hydrocyclone clogging and air-core formation. *Chemical Engineering & Technology*, 2020.

SILVA, J. T. T. *Hidrociclonagem aplicada ao processamento físico de concentrado fosfático contendo minérios de terras raras*. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1508>.

SRIPRIYA, R., SURESH, N., CHANDRA, S., BHATACHARJEE, D., The effect of diameter and height of the inserted rod in a dense medium cyclone to suppress the air core. *Minerals Engineering* 42, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.003>

SVAROVSKY, L. Hydrocyclones. *Technomic Publishing Co., Inc.*, 1984.

SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation, 4rd Edn. *Butterworths*, London, 2000.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: *Interciência*, 2004.

VIEIRA, L. G. M. *Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes*. 297f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006.

WILLS, B. A & NAPIER-MUNN, T. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th ed. Boston: *Butterworth - Heinemann*, 2006. <https://doi.org/10.1016/B978-075064450-1/50003-5>