



DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA PREVENÇÃO DE ENTUPIMENTO EM HIDROCICLONES

JOAQUIM M. SILVA^{1*}, JÉSSIKA M. SANTOS², CLAUDIO R. DUARTE¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química

²Universidade Federal de São João del Rei, Departamento de Engenharia Química

*e-mail: joaquim.moroni@gmail.com

RESUMO - O entupimento dos hidrociclones que fazem parte do sistema de controle de sólidos da indústria petrolífera é um problema operacional recorrente 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 um dispositivo, denominado UCD (*Unclog Conical Device*) para ser utilizado acoplado à saída do *underflow* do hidrociclone. Tal dispositivo é capaz 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.

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 (SILVA et al., 2020).

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 deixam 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; 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 inferior do hidrociclone fosse capaz de ajustar mecanicamente a área do 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*).

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.

MATERIAL E MÉTODOS

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 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 metade das partículas da rocha tem diâmetro inferior a 7 μm e que 100% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 100 μm .

Já a Figura 2 apresenta uma comparação entre a distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada nos ensaios 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.

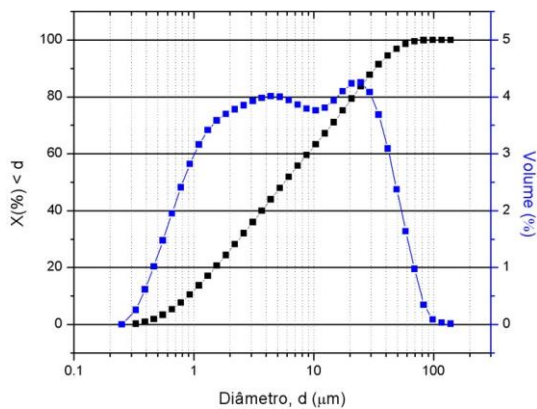


Figura 1 - Distribuição granulométrica da rocha fosfática.

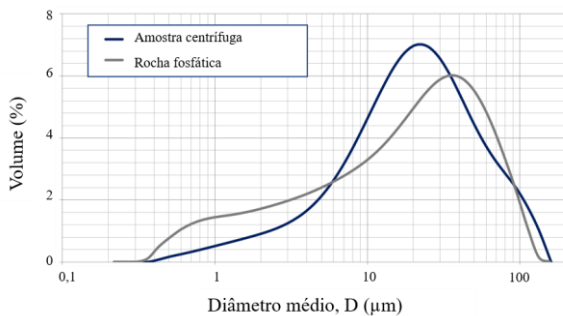


Figura 2 - Comparação entre o material utilizado nos ensaios e o material real do campo.

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.

Unidade Experimental:

A unidade experimental utilizada neste trabalho, ilustrada na Figura 3, pertence ao Grupo de Pesquisa em Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química e está localizada no Laboratório de Hidrocicloneamento da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

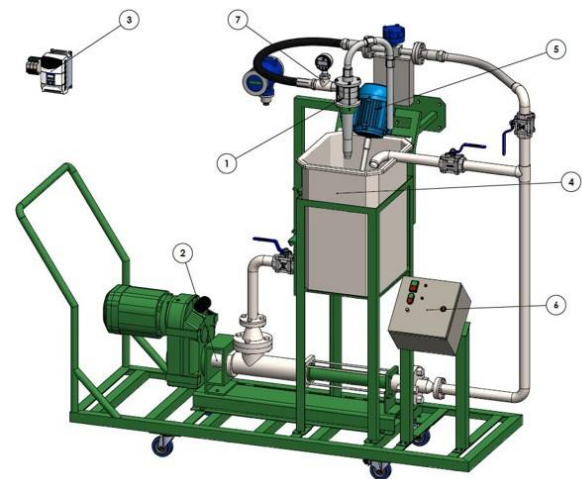


Figura 3 - Bancada de hidrocicloneamento.

Tal unidade experimental consiste em uma bancada de hidrocicloneamento, 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.

Hidrociclone:

Foi escolhido para ser utilizado nesse trabalho, o modelo de hidrociclone otimizado por Mognon et al. (2015) para compor a bateria de microcones em apoio às centrífugas decantadoras no sistema de controle de sólidos operado pela Petrobras. Além de possuir geometria suscetível à entupimentos, 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.

Para a realização dos ensaios, o hidrociclone em questão foi usinado em poliacetal, de maneira modular, como pode ser observado na Figura 4.

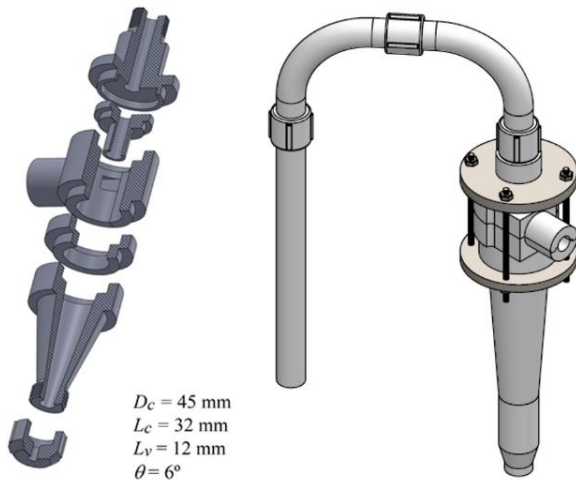


Figura 4 - Hidrociclone modular.

Apesar o hidrociclone otimizado por Mognon et al. (2015) possuir 8 mm de abertura do duto de *underflow*, após ensaios exploratórios, optou-se por utilizar o módulo referente ao D_u (diâmetro de *underflow*) igual a 12 mm para compor os ensaios deste trabalho de modo a ampliar a faixa de operação do dispositivo desobstrutor.

Dispositivo Desobstrutor:

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 5 apresenta um esboço em corte do UCD acoplado ao hidrociclone.

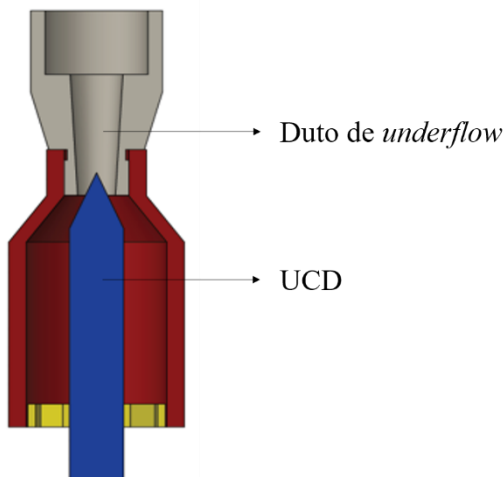


Figura 5 - Vista em corte do UCD.

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.

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 6.

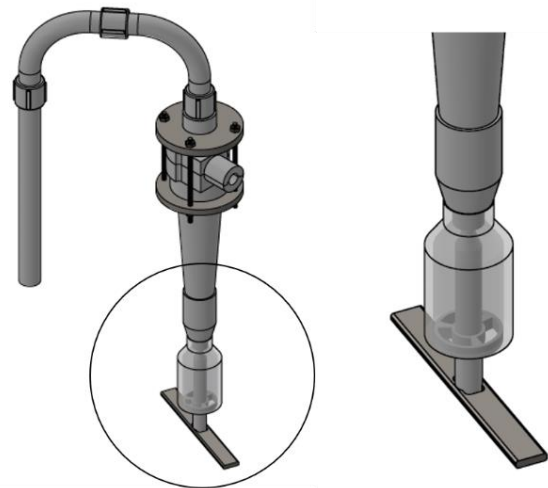


Figura 6 - Ajuste manual da posição do UCD utilizado nos ensaios.

Procedimento Experimental:

Os ensaios experimentais que compõem este trabalho foram divididos em 4 grupos de acordo com a ordem cronológica de execução dos testes como é mostrado na Figura 7.

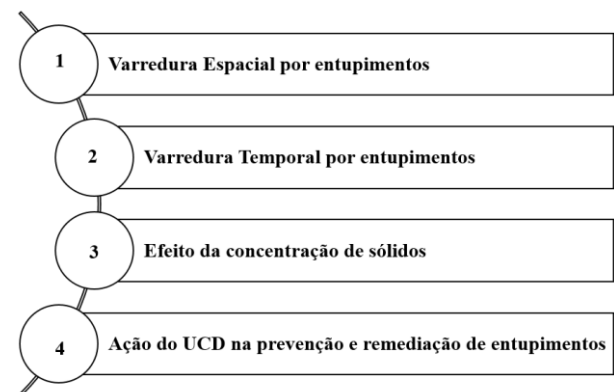


Figura 7 - Cronologia dos ensaios experimentais.

Primeiramente foram realizados 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.

A metodologia utilizada na preparação dos ensaios e análise dos resultados pertencentes a todos os ensaios deste trabalho é descrita a seguir:

- Preparação da suspensão contendo a porcentagem em massa de rocha fosfática requerida em cada ensaio (2, 4, 6, 8 e 10%). 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;
- Pressão de operação mantida constante e igual a 25,5 psi.
- 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.

➤ Ensaios De Varredura Espacial e Temporal

Visando obter um maior entendimento do processo de entupimento, foi realizado um conjunto de ensaios experimentais denominado varredura espacial, nos quais 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.

A variável resposta analisada neste, e em todos os ensaios deste trabalho, foi a capacidade concentradora (CC) do equipamento. Esta consiste na razão entre as concentrações de

sólido presentes no *underflow* e na alimentação, e se trata de um parâmetro de grande interesse nas operações onde são requeridas altas concentrações na corrente de grossos (*underflow*).

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 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 entre 60 a 95% da área do duto do *underflow*, e suspensão contendo 2% de sólidos em massa.

A Figura 8 ilustra o sentido de obstrução causado pela inserção do UCD no duto de *underflow* do hidrociclone.

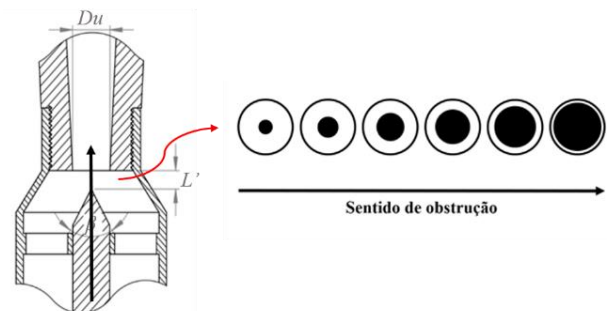


Figura 8 - Obstruções causadas pelo deslocamento do UCD.

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 1.

$$Z = \frac{A_D}{A_U} \cdot 100\% \quad (1)$$

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 1.

Tabela 1 - Posicionamento do UCD nos ensaios de Varredura Espacial.

Z (%)	L' (mm)	Rotações
58,8	3,60	2,00
63,4	3,15	1,75
68,1	2,70	1,50
73,0	2,25	1,25
78,1	1,80	1,00
83,3	1,35	0,75
88,7	0,90	0,50
94,3	0,45	0,25

Como pode ser observado na Tabela 1, 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.

➤ 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, 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*, D_u de 12mm, pressão igual a 25,5 psi e o tempo de cada ensaio foi de 2 horas.

➤ Ação do UCD na prevenção e remediação 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.

Fluidodinâmica Computacional:

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).

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 9 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.

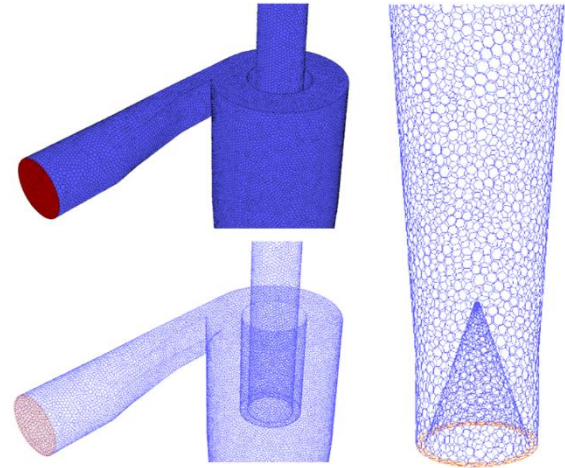


Figura 9 - Exemplo de malha computacional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

➤ Ensaios De Varredura Espacial e Temporal

Os resultados obtidos no conjunto de ensaios relativo a varredura espacial são mostrados na Figura 10, na qual é possível notar o efeito da porcentagem de área obstruída na concentração de sólidos das correntes do hidrociclone.

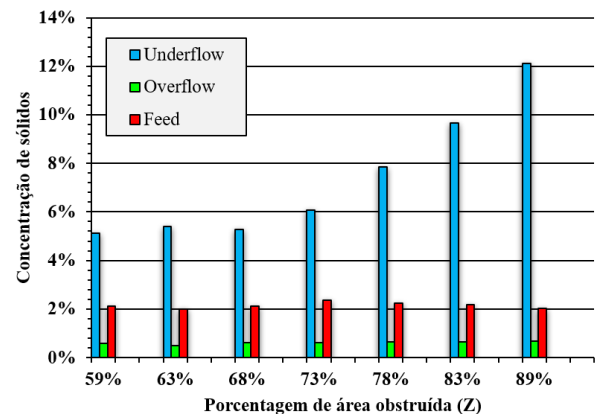


Figura 10 - Efeito da porcentagem de área obstruída na concentração de sólidos.

Analisando os resultados mostrados na Figura 10, 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 11.

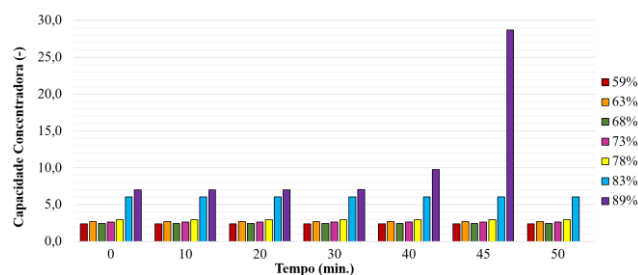


Figura 11 - Varredura Temporal por Entupimentos (concentração da alimentação igual 2% de sólidos)

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).

Analisando a Figura 11 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.

➤ Efeito da concentração de sólidos

O ensaio que constituiu a varredura temporal mostrada na Figura 11 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 12.

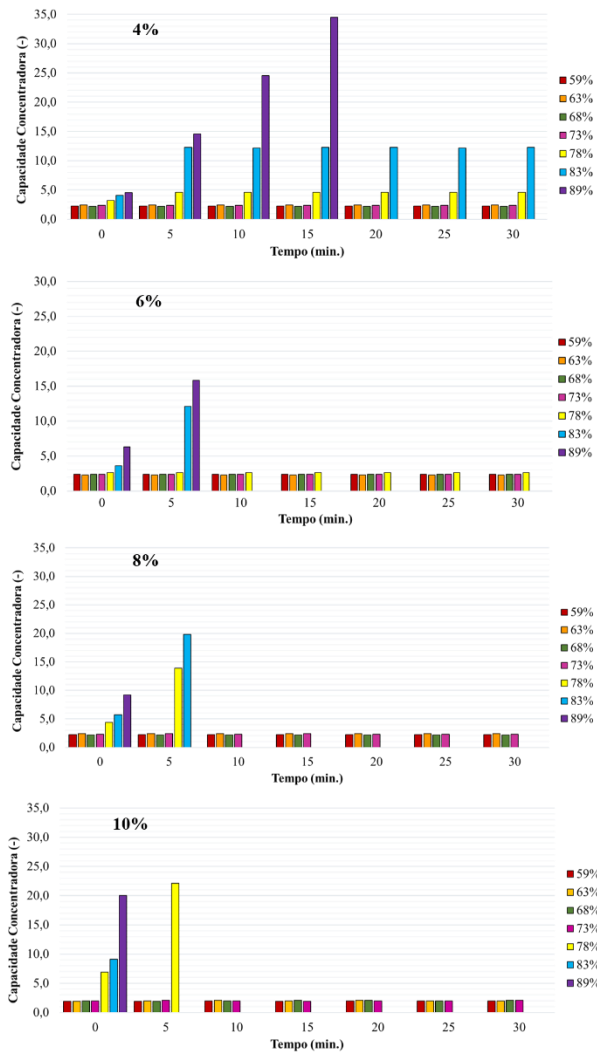


Figura 12 - Efeito da concentração da alimentação na ocorrência de entupimentos.

Como esperado, os resultados apresentados na Figura 12 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 11), 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 12 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.

➤ 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.

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 13.

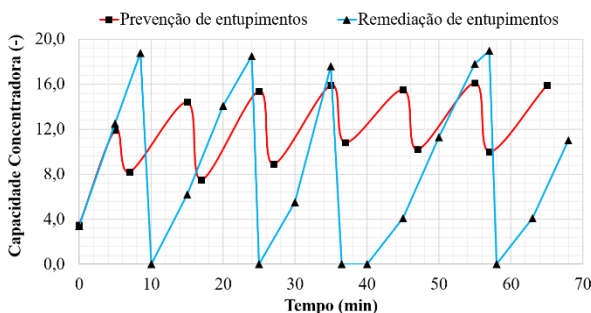


Figura 13 - Ação do UCD na prevenção e na remediação de entupimentos.

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 12, 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 D_u 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 et. al (2020). 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.

➤ 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 14 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 15 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.

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.

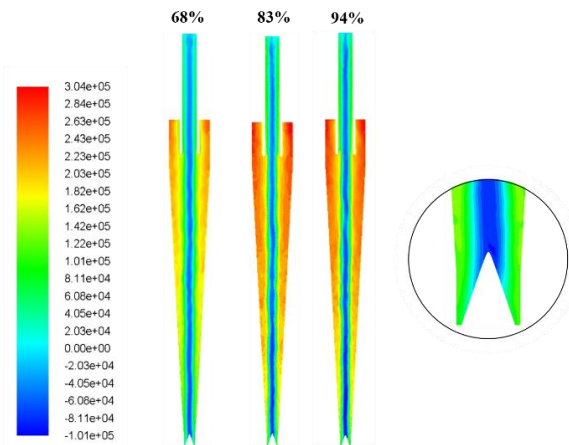


Figura 14 - Perfis de distribuição de pressão ao longo do hidrociclone para diferentes posições do UCD.

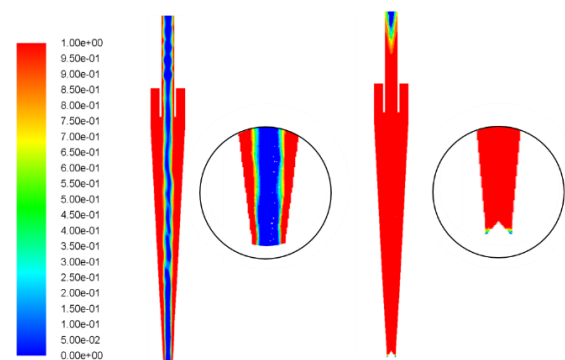


Figura 15 - Perfis de distribuição de fases (ar/água) no interior do hidrociclone na ausência (à esquerda) e na presença do UCD com $Z = 68\%$ (à direita).

Observando a Figura 14 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 15 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.

CONCLUSÃO

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.

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*.

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.

REFERÊNCIAS

- CALDELMAN, S. Hydrocyclone. U.S. Patent Application n. 10/515,321, 2006.
- 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.
- KUCHER, V.; LILIENGREN, G.; BACKMAN, J. Bi-directional lower cone dilution device. U.S. Patent n. 9,914,139, 13 mar. 2018.
- 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.
- 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.
- 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 hidrociclonação; tratamento da borra de centrifugação por microondas. 301f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2014.
- 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.
- SILVA, J. M., BICALHO, I.C. & ATAÍDE, C. H. Mechanical device designed for preventing hydrocyclone clogging and aircore formation. *Chemical Engineering & Technology*, 2020.