



AValiação DA PERFORMANCE DE UM HIDROCICLONE CONVENCIONAL E DE UM FILTRANTE QUANDO OPERADOS COM SUSPENSÕES NÃO-NEWTONIANAS

MURILO G. MORIMOTO^{1*}, MARCOS A. S. BARROZO¹, LUIZ G. M. VIEIRA¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química
*e-mail: murilo_g@ufu.br

RESUMO – Hidrociclones são equipamentos utilizados ordinariamente para separar um material particulado sólido de uma fase contínua líquida. Estudos mostram como a geometria do hidrociclone pode impactar em seu desempenho. O grupo de pesquisa do Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Universidade Federal de Uberlândia propuseram um hidrociclone convencional de alta eficiência conhecido como MOEH, e também dos chamados hidrociclones não convencionais filtrantes, os quais apresentam algumas vantagens operacionais. A performance dos hidrociclones também é afetada pela reologia da suspensão, sendo que a sua capacidade coletora diminui quando suspensões viscosas e pseudoplásticas são utilizadas. Nesse trabalho foi avaliada a performance do MOEH associado a um cone permeável, quando operado com suspensões não-Newtonianas e de alta viscosidade. Além disso, foi analisado o comportamento do equipamento frente a diversos valores de diâmetro de orifício de *underflow*. Os experimentos revelaram que, mesmo operando com uma suspensão não-Newtoniana e viscosa, a associação do MOEH a uma parede filtrante foi benéfica, pois a eficiência de coleta foi aumentada em 6,9% e o consumo energético diminuiu cerca de 12%.

INTRODUÇÃO

O hidrociclone é um equipamento comumente encontrado em indústrias e são utilizados para separar uma fase sólida ou líquida de uma fase contínua líquida. Assim como nas centrífugas, os hidrociclones utilizam o princípio da separação centrífuga para separar as fases de interesse. Uma das vantagens dos hidrociclones é que sua construção não envolve partes móveis, o que diminui custos relacionados à manutenção (Salvador *et al.*, 2016). Em adição, quando comparados às centrífugas, os hidrociclones têm um menor custo de aquisição, de investimento e são mais fáceis de serem operados (Garcia *et al.*, 2020).

Basicamente, o corpo de um hidrociclone convencional consiste em um cilindro acoplado a um tronco de cone. A alimentação de fluido é feita de forma tangencial à parte cilíndrica, e essa corrente é comumente dividida entre duas

saídas. A corrente que sai pelo topo do equipamento é chamada de *overflow*, enquanto a que sai por baixo é chamada de *underflow*. A suspensão quando alimentada ao equipamento assume um movimento rotacional descendente, gerando um vórtice externo (Vieira *et al.*, 2007). Ao alcançar o orifício inferior do hidrociclone, parte da suspensão deixa o equipamento, gerando a corrente de *underflow*. O restante do material, ainda em movimento rotacional, ascende em direção ao orifício de saída superior, gerando o vórtice interno (Vieira *et al.*, 2005). O material mais pesado e grosso tem uma maior tendência de se manter no vórtice externo e de ser coletado no orifício inferior do hidrociclone. Por outro lado, o material mais fino ou menos denso é mais propenso de se manter no vórtice interno e de ser coletado no orifício superior do equipamento (Salvador *et al.*, 2021).

Estudos apontam que a performance do hidrociclone está relacionada com a proporção geométrica entre as diferentes partes do corpo do equipamento (Brito-Parada *et al.*, 2018; Chu *et al.*, 2000; Hwang e Chou, 2017; Souza *et al.*, 2000). Desse modo, é possível alterar a geometria do hidrociclone com o intuito de atender uma demanda operacional específica.

O Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Universidade Federal de Uberlândia (LASER/UFU) possui diversos trabalhos que investigam o comportamento de hidrociclones quando suas geometrias são alteradas (Kyriakidis *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015). Associando o banco de dados do LASER/UFU com técnicas de otimização, Gonçalves *et al.* (2020) sugeriram um hidrociclone capaz de atingir uma alta eficiência de coleta de material particulado, o qual foi nomeado como MOEH (*Maximum Overall Efficiency Hydrocyclone*). Quando comparado ao hidrociclone mais eficiente usado na base de dados estudados por Gonçalves *et al.* (2020), o MOEH foi cerca de 9% mais eficiente e consumiu cerca de 33% menos energia. O MOEH foi capaz de atingir uma eficiência total de coleta superior a 90% e um número de Euler de aproximadamente 2000.

Ainda com o objetivo de atingir uma exigência operacional, o hidrociclone pode ser submetido a mudanças em sua estrutura padrão. Esses novos equipamentos são comumente chamados de hidrociclones não convencionais. Por exemplo, com a finalidade de aumentar a eficiência de coleta é possível mudar o formato ou aumentar a quantidade dos dutos de alimentação (Bing *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2020). A eficiência de coleta de material no orifício de *underflow* também é beneficiada caso o regime turbulento de escoamento da suspensão seja reduzido devido à inserção de um bastão no eixo axial do equipamento entre as aberturas de *overflow* e *underflow* (Vakamalla *et al.*, 2017). Em adição, a troca da região cônica por uma forma côncava ou convexa pode alterar as componentes de velocidade da suspensão dentro do hidrociclone, o que pode impactar na dinâmica de separação, podendo influenciar a quantidade de líquido e de sólidos presentes na corrente de *underflow* (Ghodrat *et al.*, 2014).

O grupo de pesquisadores do LASER/UFU foi responsável pela criação de um hidrociclone não convencional ao combinar a operação de hidrociclonagem com a de filtração, ao trocar o material da região cilíndrica ou cônica feita de um material maciço por um permeável. Assim, o hidrociclone filtrante divide a corrente de alimentação em três outros fluxos: *underflow*, *overflow* e filtrado. Estudos mostram que quando operados em condições semelhantes, o hidrociclone filtrante pode apresentar uma maior eficiência de coleta e/ou um menor consumo energético do que o hidrociclone convencional de mesma geometria (Souza *et al.*, 2000; Vieira *et al.*, 2005). Essas vantagens são verificadas, pois a presença do contorno permeável é responsável por alterar a fluidodinâmica da suspensão dentro do equipamento (Oliveira *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2007).

As características da suspensão de operação também podem impactar o desempenho do hidrociclone (Mognon *et al.*, 2016). Suspensões concentradas podem diminuir a velocidade tangencial e aumentar a velocidade terminal das partículas dentro do equipamento, o que pode diminuir a eficiência de coleta do separador (Davailles *et al.*, 2012; Gonçalves *et al.*, 2017). Em adição, a reologia da suspensão também pode influenciar a fluidodinâmica do fluido dentro do hidrociclone. Sob mesmas condições de operação, suspensões viscosas e de caráter pseudoplástico têm um movimento rotacional menos intenso dentro do equipamento do que suspensões com viscosidade e comportamento reológico próximos ao da água. Como consequência, a suspensão alcança uma menor velocidade tangencial, o que resulta em uma redução na eficiência de coleta do equipamento (Wu *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2015). Além disso, suspensões viscosas podem aumentar a componente de velocidade axial descendente da suspensão, diluindo a corrente de *underflow* (Tian *et al.*, 2018). Desse modo, tendo em consideração que a reologia da suspensão pode ser um parâmetro que influencia negativamente a capacidade de coleta do hidrociclone, estudos que buscam aumentar a eficiência de separação dos hidrociclones operados com esse tipo de suspensões são necessários.

Este trabalho tem como objetivo comparar o comportamento do hidrociclone convencional otimizado MOEH com a performance de um hidrociclone não convencional de mesma geometria, porém munido de uma região cônica construída de material permeável. Este estudo busca compreender se a categoria de hidrociclones filtrantes apresenta vantagens operacionais sobre a categoria convencional quando operada com suspensões com comportamento diferente do Newtoniano. Em adição, o efeito do diâmetro do orifício de *underflow* sobre o comportamento dos hidrociclones também foi analisado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Hidrociclones

Neste estudo dois hidrociclones foram utilizados. Um dos equipamentos foi o hidrociclone convencional MOEH obtido por Gonçalves *et al.* (2020), doravante chamado de MOEH-Con. O segundo equipamento estudado, chamado de MOEH-CoF, foi um hidrociclone geometricamente semelhante ao MOEH-Con, porém contemplado com um tronco de cone confeccionado de um material permeável.

Tabela 1: Dimensões do hidrociclone MOEH.

Dimensão	Valor (mm)
D_c	30,0
D_i	8,7
D_u	5,0
D_o	4,8
ℓ	55,2
h	69,0
H	159,0
ε	2,5

As dimensões do diâmetro da região cilíndrica (D_c), do tubo de alimentação (D_i), do

orifício de *underflow* (D_u), de *overflow* (D_o), comprimento do *vortex finder* (ℓ), comprimento da seção cilíndrica (h), da seção cônica (H) e espessura do cone permeável (ε) referentes ao MOEH-Con e ao MOEH-CoF são apresentadas na Tabela 1 e Figura 1. A região cilíndrica e o tubo de *vortex finder* dos hidrociclones foram confeccionadas em alumínio, e a parte cônica convencional e filtrante foram feitas em latão e bronze sinterizado, respectivamente. O meio filtrante utilizado neste estudo teve sua permeabilidade avaliada em $1,03 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ e uma porosidade de 1,92%.

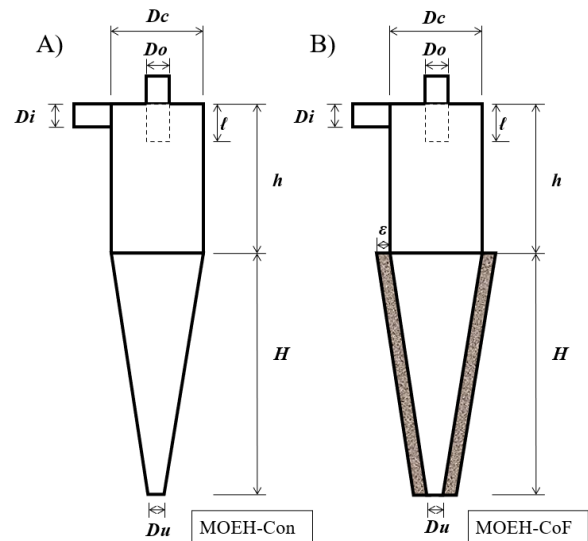


Figura 1: Representação esquemática dos hidrociclones MOEH-Con e MOEH-CoF.

Material particulado

O material particulado utilizado foi o quartzito. Por picnometria a gás hélio, a massa específica desse material foi estimada em $2,61 \text{ g/cm}^3$. As análises granulométrias do material particulado alimentado aos hidrociclones e coletado na corrente de *underflow* foram feitas por meio da técnica de difratometria à laser utilizando o equipamento *Mastersizer* fabricado pela *Malvern*. Neste estudo as suspensões alimentadas aos hidrociclones tinham uma concentração volumétrica de 1,0% de material sólido.

Viscosificante

Com o intuito de manipular a reologia da suspensão de quartzito em água, um agente viscosificante foi utilizado. Nesse estudo o material empregado foi a carboximetilcelulose (CMC). A CMC é um biopolímero que pode ser utilizado para controlar a reologia de fluidos de perfuração (Iskan e Kok, 2007; Peng *et al.*,

2018). Mognon *et al.* (2016) mostraram que suspensões que possuem uma concentração de 0,6% e 1,0% em massa de CMC são capazes de simular o comportamento reológico de fluidos de perfuração baseados em hidrocarbonetos.

A reologia da suspensão foi avaliada utilizando um reômetro *Brookfield* modelo *R/S plus*, com *spindle* coaxial de 40 mm. Para aferição da tensão de cisalhamento, foi necessário que uma amostra de 50 mL de suspensão fosse submetida às taxas de cisalhamento de 10, 100, 400, 600, 800, 1000 e 1100 s⁻¹ por 5 min. Esse procedimento foi capaz de fazer com que a tensão de cisalhamento avaliada atingisse um patamar estacionário, o que garantiu que as medidas referentes a reologia fossem independentes do tempo.

Procedimento experimental

A Figura 2 mostra uma representação da unidade experimental. Nos experimentos desse trabalho, 150 L de suspensão com concentração de material particulado de 1,0% em volume foram armazenadas em um tanque com chicanas de aço. O fluido foi agitado com auxílio de um agitador mecânico do tipo naval da marca *Voges*, modelo B90 S4 com motor de 4 cv, o qual operou a 1730 rpm. A suspensão foi bombeada com auxílio de uma bomba centrífuga da marca *Weir Minerals* (modelo 1,5/1B-AH) com potência de 7,5 cv. Com a finalidade de manter a temperatura da suspensão em uma faixa de operação aceitável, foi empregado um sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura do fluido entre 25 e 27 °C. A queda de pressão do hidrociclone foi monitorada por um manômetro digital da marca *Dwyer* (modelo DPF-204) disposto a montante do hidrociclone. A queda de pressão operacional selecionada para esse estudo foi de 1,77 kPa. Por fim, um medidor de vazão do tipo *Coriolis* foi utilizado para mensurar a vazão alimentada ao hidrociclone.

O consumo energético dos hidrociclones foi avaliado pelo número de Euler (Eu) (Equação 1), o qual é um adimensional que relaciona a queda de pressão experimentada pelo equipamento com a energia cinética por unidade de volume. Entre dois equipamentos que operam sob mesmas condições de queda de pressão, o hidrociclone que apresentar um menor número de Euler é o que tem um menor

consumo energético, pois é aquele que opera um maior volume de fluido.

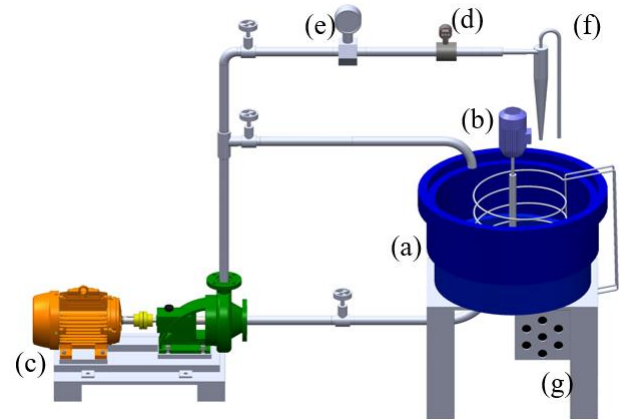


Figura 2: Representação esquemática da unidade experimental - (a) reservatório, (b) agitador mecânico, (c) bomba centrífuga, (d) manômetro digital, (e) medidor de vazão, (f) hidrociclone e (g) sistema de refrigeração.

$$Eu = \frac{(-\Delta P)}{\frac{\rho v_c^2}{2}} \quad (1)$$

Em que ΔP é a diferença de pressão entre o orifício de *overflow* e a alimentação, ρ é a massa específica da suspensão, e v_c é a velocidade da suspensão na região cilíndrica.

A capacidade concentradora dos hidrociclones foi avaliada pela razão de concentração (RC) e pela razão de líquido (RL), os quais são representados pela Equação 2 e 3, respectivamente. A razão de concentração relaciona a concentração volumétrica de sólido na corrente de *underflow* com a concentração originalmente alimentada. Por outro lado, a razão de líquido relaciona a quantidade de líquido presente na corrente de *underflow* com o líquido inicialmente alimentado. Um hidrociclone concentrador apresenta alta razão de concentração e baixa razão de líquido.

$$RC = \frac{C_{VU}}{C_{VA}} \quad (2)$$

$$RL = \frac{Q_U(1 - C_{VU})}{Q_A(1 - C_{VA})} \quad (3)$$

Nessas equações, C_{VU} e C_{VA} são as concentrações volumétricas de material

particulado na corrente de *underflow* e alimentação, respectivamente. Q_U e Q_A indicam a vazão volumétrica das correntes de *underflow* e alimentação, respectivamente.

A eficiência total de coleta do hidrociclone foi avaliada pela Equação 4, a qual relaciona a massa de material sólido presente na corrente de *underflow* com a massa de material alimentado ao equipamento. A eficiência reduzida (Equação 5) também foi analisada com o intuito de avaliar a performance centrífuga do hidrociclone. A diferença entre a eficiência total e a reduzida é que a primeira contabiliza todo material sólido coletado pelo orifício de *underflow* independente do mecanismo de separação, enquanto a segunda se refere ao material particulado coletado exclusivamente devido a sedimentação centrífuga.

$$Ef = \frac{C_{WU}W_U}{C_{WA}W_A} \quad (4)$$

$$Ef' = \frac{Ef - RL}{1 - RL} \quad (5)$$

Em que C_{WU} e C_{WA} são as concentrações mássicas das correntes de *underflow* e alimentação, respectivamente. W_U e W_A são as vazões mássicas das correntes de *underflow* e alimentação, respectivamente.

Planejamento experimental

Com o intuito de avaliar os efeitos provocados pela reologia da suspensão e pelo diâmetro do orifício de *underflow* sobre o desempenho do hidrociclone, foi proposto um planejamento fatorial a 3 níveis. A Tabela 2 mostra o planejamento proposto, sendo X_1 a concentração mássica de CMC (C_{CMC}) e X_2 o diâmetro do orifício de *underflow* (D_u). Complementarmente, a Tabela 3 relaciona os valores reais das variáveis de estudo com os valores codificados por X_1 e X_2 . Vale a pena mencionar que o planejamento experimental foi repetido quatro vezes para a análise do erro residual.

Os resultados coletados (Eu , RC , RL , Ef e Ef') foram tratados por meio de regressões múltiplas, os parâmetros obtidos tiveram sua significância avaliada pela análise de variância. No presente estudo, o nível de significância adotado foi de 10%. Neste trabalho, serão

apresentados somente os parâmetros significativos das regressões, sendo que a adequação das equações foi avaliada pelo coeficiente de determinação (r^2).

Tabela 2: Planejamento experimental.

Experimento	X_1 (C_{CMC})	X_2 (D_u)
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	0
6	0	+1
7	+1	-1
8	+1	0
9	+1	+1

Tabela 3: Relação entre os valores reais e os codificados das variáveis analisadas.

Variável	Codificação		
	-1	0	+1
X_1 (C_{CMC})	0,20%	0,40%	0,60%
X_2 (D_u)	3 mm	4 mm	5 mm

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Distribuição granulométrica

A Equação 6 mostra a distribuição granulométrica do material particulado alimentado aos hidrociclones. Os dados obtidos foram ajustados seguindo o modelo de distribuição granulométrica proposto por Robin-Rammler-Bennet (RRB), tendo um coeficiente de determinação de superior a 0,99.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{25,22}\right)^{1,41}} \quad (6)$$

Em que D_p é o diâmetro de uma determinada partícula em μm . E X indica a porcentagem mássica de material particulado menor que um determinado D_p .

Análise reológica

A Figura 3 mostra os reogramas obtidos experimentalmente seguindo a metodologia

apresentada, bem como os ajustes feitos seguindo uma equação do tipo *Power-law* (Equação 7), os coeficientes de determinação destas regressões foram superiores a 0,99. Os parâmetros obtidos pelas regressões são apresentados na Tabela 4 juntamente com informações sobre a viscosidade aparente da suspensão (η) a uma taxa de cisalhamento de 1100 s^{-1} . Pela análise da Figura 3 e da Tabela 4 é possível observar que a concentração de CMC impactou de maneira significativa a reologia e viscosidade da suspensão. Como esperado, a suspensão se tornou mais pseudoplástica e viscosa com o aumento da concentração de CMC.

$$\tau = K(\dot{\gamma}^n) \quad (7)$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento, K é o índice de consistência e n é o índice de potência.

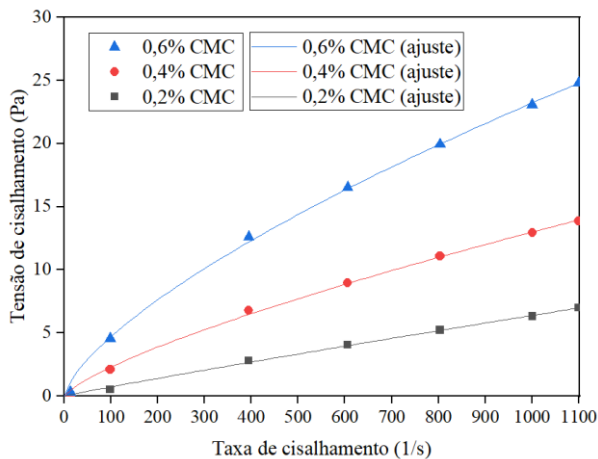


Figura 3: Reograma das suspensões utilizadas em diferentes concentrações mássicas de CMC.

Tabela 4: Parâmetros da equação do tipo *Power-law* das suspensões utilizadas relacionados com a concentração mássica de CMC.

C_{CMC}	K	n	η (cP)
0,2%	0,01	0,93	6,4
0,4%	0,07	0,75	12,10
0,6%	0,20	0,69	22,50

Consumo energético

O consumo energético dos hidrociclones foi avaliado pelo número de Euler. Neste estudo todos os hidrociclones foram submetidos a uma

mesma queda de pressão (1,77 kPa). Assim, ao comparar dois hidrociclones, aquele que apresentou o menor número de Euler foi o equipamento com menor consumo energético. A Figura 4 apresenta os resultados experimentais obtidos para o MOEH-Con e MOEH-CoF. A análise estatística dos dados apontou que a associação da operação de hidrociclonação à filtração reduziu o consumo energético do equipamento. Operando nas mesmas condições, o hidrociclone filtrante teve em média um número de Euler 12% menor do que o hidrociclone convencional. Apesar da corrente de filtrado ser significativamente menor do que as correntes de *underflow* e *overflow* ela é responsável por mudar drasticamente o perfil de queda de pressão dentro do equipamento (Oliveira *et al.*, 2009). Segundo Oliveira *et al.* (2009), devido à presença da corrente de filtrado, o hidrociclone cônico filtrante apresenta uma menor queda de pressão do que o convencional quando operados com uma mesma vazão volumétrica.

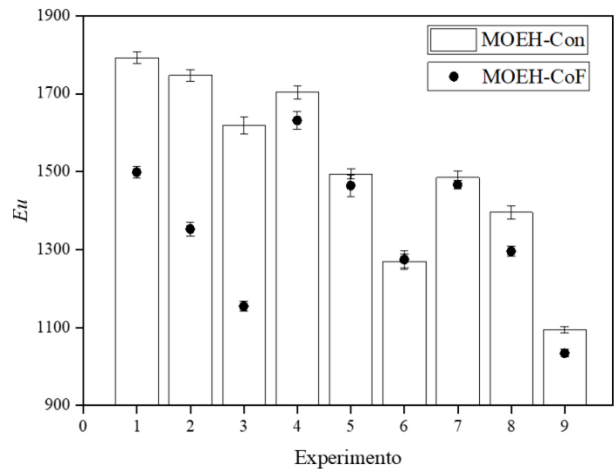


Figura 4: Número de Euler (Eu) dos hidrociclones MOEH-Con e MOEH-CoF para os experimentos planejados.

A Equação 8 mostra os parâmetros significativos obtidos por técnica de regressão múltipla para o hidrociclone filtrante ($r^2=0,99$). O consumo energético foi dependente do comportamento reológico da suspensão (modulado pela concentração de CMC, X_1), e do diâmetro de *underflow* do equipamento (X_2).

$$Eu = 1351 - 34X_1 + 78X_1^2 - 189X_2 + 13X_2^2 - 22X_1X_2 \quad (8)$$

Na Tabela 5 é mostrado o quadro de análise de variância (ANOVA) dos fatores significativos que acompanham respectivamente X_1 , X_1^2 , X_2 , X_2^2 e X_1X_2 na equação de regressão do número de Euler. Na Tabela 5 a soma de quadrados é representada por SQ e o quadrado médio é representado por QM. Um fator que pode analisar a significância de um parâmetro é o *p-value*, o qual é representado por “p”. Neste estudo, um fator foi considerado significativo caso apresentasse um *p-value* inferior a 0,10.

Tabela 5: Tabela de ANOVA para a resposta *Eu*.

Fator	SQ	QM	p
X_1	7343	7343	0,011751
X_1^2	48973	48973	0,000751
X_2	214482	214482	0,000083
X_2^2	1520	1520	0,087058
X_1X_2	1952	1952	0,065513
Erro	725	242	-

À medida que a suspensão tornou-se mais pseudoplástica e viscosa devido à adição de CMC o movimento rotacional da suspensão foi prejudicado (Liu *et al.*, 2021). Segundo Hoffman e Stein (2007), a queda de pressão do ciclone diminui ao passo que o movimento rotacional da suspensão se torna menos pronunciado. Nesse contexto, com o intuito de manter a queda de pressão constante em 1,77 kPa mais suspensão foi alimentada ao hidrociclone, o que fez com que o consumo energético diminuísse.

O consumo energético também diminuiu com incrementos no orifício de *underflow*. Um menor comprimento de orifício de *underflow* restringiu a passagem de líquido, o que aumentou a queda de pressão do equipamento, o que fez com que o seu consumo energético aumentasse (Kyriakidis *et al.*, 2018).

Capacidade de concentração

A capacidade de concentração foi avaliada pela razão de concentração (*RC*) e pela razão de líquido (*RL*). Os dados experimentais para *RC* e *RL* são apresentadas nas Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

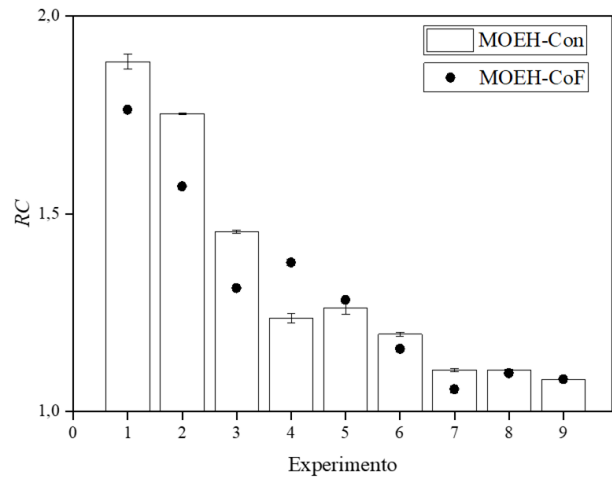


Figura 5: Razão de concentração (*RC*) dos hidrociclones MOEH-Con e MOEH-CoF para os experimentos planejados.

O hidrociclone MOEH foi originalmente desenvolvido para atingir alta eficiência de coleta tendo um caráter concentrador reduzido (correntes de *underflow* diluídas). Isso justifica os baixos valores de *RC* e altos de *RL* obtidos. De maneira geral, o hidrociclone convencional mostrou-se um melhor concentrador do que o equipamento filtrante, pois apresentou maiores valores de *RC* e menores de *RL*.

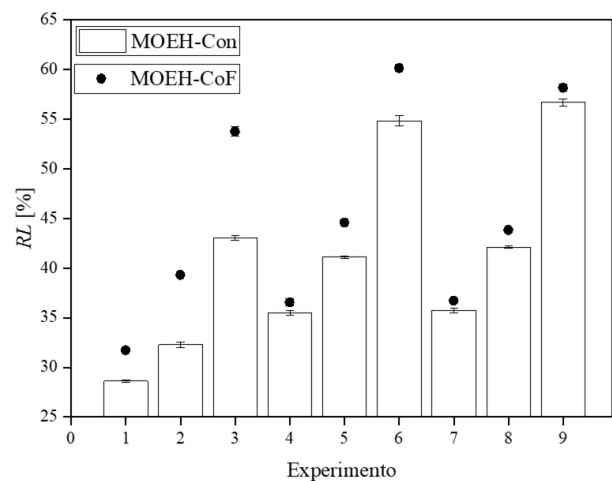


Figura 6: Razão de líquido (*RL*) dos hidrociclones MOEH-Con e MOEH-CoF para os experimentos propostos.

Segundo análises computacionais de fluidodinâmica (Vieira *et al.*, 2010), o hidrociclone filtrante pode apresentar uma menor componente de velocidade radial. Nesse caso, a suspensão tem uma maior tendência de se manter próximas às paredes no hidrociclone filtrante do que no hidrociclone convencional.

Esse comportamento pode justificar o fato do hidrociclone filtrante ter apresentado uma maior quantidade de líquido na corrente de *underflow* e uma menor capacidade de concentração do que o equipamento convencional.

As Equação 9 e Equação 10 relacionam, respectivamente, o comportamento da razão de concentração e de líquido do hidrociclone filtrante em função das variáveis estudadas. Ambas as equações possuem um coeficiente de determinação superior a 0,99.

$$RC = 1,30 - 0,23X_1 - 0,02X_1^2 - 0,11X_2 + 0,01X_2^2 + 0,12X_1X_2 \quad (9)$$

$$RL[\%] = 44,93 + 2,32X_1 + 1,59X_1^2 + 11,12X_2 - 1,80X_2^2 \quad (10)$$

Nas Tabela 6 e Tabela 7 é mostrado o quadro de análise de variância (ANOVA) dos fatores significativos que acompanham respectivamente X_1 , X_1^2 , X_2 , X_2^2 e X_1X_2 para a razão de concentração e razão de líquido, respectivamente.

Tabela 6: Tabela de ANOVA para a resposta *RC*.

<i>Fator</i>	<i>SQ</i> ·10 ⁴	<i>QM</i> ·10 ⁴	<i>p</i>
X_1	3283,93	3283,93	0,00001
X_1^2	34,72	34,72	0,00018
X_2	699,77	699,77	0,00002
X_2^2	10,13	10,13	0,00117
X_1X_2	552,75	552,75	0,00001
Erro	0,20	0,07	

Tabela 7: Tabela de ANOVA para a resposta *RL*.

<i>Fator</i>	<i>SQ</i> ·10 ⁴	<i>QM</i> ·10 ⁴	<i>p</i>
X_1	32,33	32,33	0,000539
X_1^2	20,16	20,16	0,001335
X_2	749,77	749,77	0,000001
X_2^2	25,89	25,89	0,000827
Erro	1,27	0,32	

A capacidade de concentração do hidrociclone filtrante, além de ter sido

prejudicada à medida que a suspensão se tornou mais pseudoplástica e viscosa, ela também foi diminuída com incrementos no comprimento do diâmetro de *underflow*.

A velocidade tangencial da suspensão tende a diminuir, e a axial descendente a aumentar com o incremento da viscosidade da suspensão, fazendo com que uma maior parcela de líquido seja conduzida para o orifício de *underflow*. Isto faz com que menos material seja coletado devido à sedimentação centrífuga (Tian *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2015). Esse argumento pode justificar a perda do caráter concentrador do hidrociclone quando teve seu comportamento reológico alterado pela adição de CMC.

Além disso, um maior diâmetro de *underflow* impõe uma menor resistência à passagem de fluido por esse orifício. Isto pode aumentar a velocidade axial descendente da suspensão, fazendo com que uma maior quantidade de líquido seja associada à corrente de *underflow*, o que aumenta o valor de *RL* e diminui a *RC* devido à diluição da corrente (Kyriakidis *et al.*, 2018).

Eficiência de coleta

A Figura 7 compara a eficiência total (*E_f*) do hidrociclone MOEH-Con com a do MOEH-Cof, enquanto a Figura 8 compara a eficiência reduzida (*E_f'*).

Análises estatísticas apontaram que o hidrociclone filtrante é um melhor coletor de partículas do que o equipamento convencional. O MOEH-CoF foi, em média, 6,9% mais eficiente do que o MOEH-Con, e teve uma separação centrífuga (avaliada pelo parâmetro *E_f'*) cerca de 9,7% superior do que o hidrociclone convencional. A velocidade radial da suspensão da parede para o centro é diminuída com a retirada de fluido pelo contorno permeável, o que faz com que a força de arraste que age no sentido de conduzir o material particulado para o vórtice interno seja reduzida (Vieira *et al.*, 2010). Esse comportamento fluidodinâmico pode justificar a constatação de que o hidrociclone filtrante tem um maior poder de separação do que o equipamento convencional.

As equações obtidas para a eficiência total (*E_f*) e eficiência reduzida (*E_f'*) do hidrociclone filtrante são apresentadas nas Equação 11 e Equação 12, respectivamente.

Nesse caso, ambas apresentaram um coeficiente de determinação superior a 0,99.

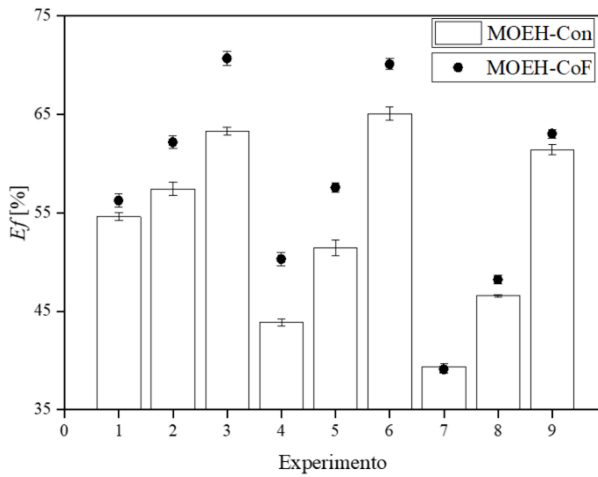


Figura 7: Eficiência total (E_f) dos hidrociclones MOEH-Con e MOEH-CoF para os experimentos planejados.

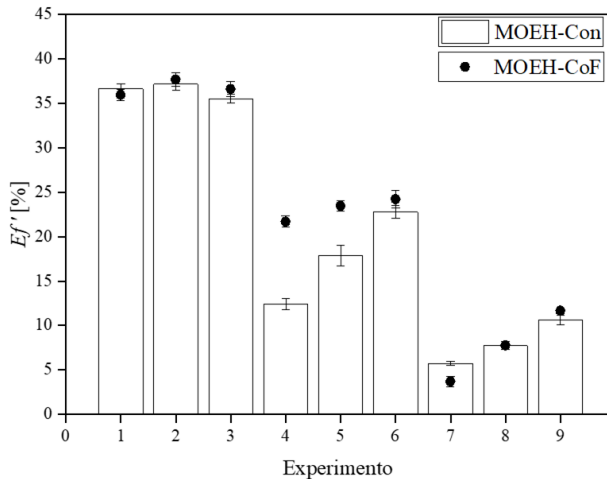


Figura 8: Eficiência reduzida (E_f') dos hidrociclones MOEH-Con e MOEH-CoF para os experimentos planejados.

$$E_f[\%] = 57,45 - 6,46X_1 + 1,37X_1^2 + 9,70X_2 - 1,13X_2^2 + 2,37X_1X_2 \quad (11)$$

$$E_f'[\%] = 22,48 - 14,51X_1 + 1,86X_2 \quad (12)$$

As Tabelas 8 e 9 mostram os quadros de análise de variância dos fatores significativos que acompanham respectivamente X_1 , X_1^2 , X_2 , X_2^2 e X_1X_2 para a eficiência total de coleta e a eficiência reduzida.

À medida em que o fluido se tornou mais pseudoplástico e viscoso com a adição de CMC, tanto a eficiência total quanto a reduzida foram diminuídas. Esse comportamento deve-se a

uma redução do movimento rotacional da suspensão e uma consequente redução do efeito centrífugo (Gonçalves *et al.*, 2022). Observou-se que o coeficiente relacionado ao comportamento reológico da suspensão na Equação 11 (-6,46) é cerca de 2,25 vezes superior do que o mesmo coeficiente retratado na Equação 12 (-14,51). Essa averiguação é um indicativo de como a reologia da suspensão impactou o campo centrífugo da suspensão influenciando diretamente na performance do equipamento, uma vez que a eficiência reduzida de coleta contabiliza o material coletado somente devido à ação centrífuga.

Por outro lado, aumentar o diâmetro de *underflow* favoreceu a coleta de material particulado. Valores mais elevados de D_u fizeram com que a suspensão sofresse uma menor resistência, o que favoreceu os mecanismos de separação (Gonçalves *et al.*, 2022).

Tabela 8: Tabela de ANOVA para a resposta E_f .

Fator	$SQ \cdot 10^{-4}$	$QM \cdot 10^{-4}$	p
X_1	250,36	250,36	0,000118
X_1^2	15,12	15,12	0,007372
X_2	564,21	564,21	0,000035
X_2^2	10,16	10,16	0,012883
X_1X_2	22,51	22,51	0,004168
Erro	1,07	0,36	

Tabela 9: Tabela de ANOVA para a resposta E_f' .

Fator	$SQ \cdot 10^{-4}$	$QM \cdot 10^{-4}$	p
X_1	1264,24	1264,24	0,000001
X_2	20,80	20,80	0,004091
X_1X_2	13,31	13,31	0,010299
Erro	4,15	0,83	

CONCLUSÃO

Os resultados analisados indicam que o hidrociclone coletor MOEH-Con (o qual foi obtido a partir de um processo de otimização geométrica por Gonçalves *et al.* (2020)) pode coletar em média cerca de 6,9% mais material particulado caso sua região cônica maciça seja trocada por um material permeável. Além disso, os experimentos conduziram a dedução de que

o MOEH-CoF pode consumir cerca de 12% menos energia do que o equipamento convencional quando operados sob mesmas condições.

Em adição, concluiu-se que a reologia da suspensão tem papel crucial na performance do equipamento. Observou-se que os hidrociclones têm sua eficiência de coleta e poder de concentração atrofiados quando operados com suspensões viscosas e com comportamento pseudoplástico. Presumivelmente, essa conduta se deve a uma redução do movimento rotacional da suspensão. Apesar do consumo energético diminuir com o incremento da viscosidade da suspensão é importante contrastar este benefício com o revés da perda da capacidade coletora do equipamento.

Por fim, o diâmetro de *underflow* também impactou a performance do equipamento. De maneira geral, um maior diâmetro de *underflow* provavelmente ofereceu uma menor resistência a passagem de fluido, o que se traduziu em um aumento da capacidade coletora do hidrociclone e redução do consumo energético.

NOMENCLATURA

C_{CMC} – Concentração mássica de carboximetilcelulose [%]
 C_{VA} – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação [%]
 C_{VU} – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* [%]
 C_{WA} – Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação [%]
 C_{WU} – Concentração mássica de sólidos na corrente de *underflow* [%]
 D_c – Diâmetro da região cilíndrica do hidrociclone [mm]
 D_i – Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone [mm]
 D_o – Diâmetro do duto de *overflow* do hidrociclone [mm]
 D_p – Diâmetro de uma partícula usado na equação de distribuição granulométrica [μm]
 D_u – Diâmetro do orifício de *underflow* do hidrociclone [mm]
 E_f – Eficiência total de coleta [%]
 E_f' – Eficiência reduzida de coleta [%]
 Eu – Número de Euler [--]

h – Altura da zona cilíndrica do hidrociclone [mm]
 H – Altura da zona cilíndrica do hidrociclone [mm]
 K – Índice de consistência do fluido [Pa s]
 N – Índice de comportamento do fluido [--]
 p – *p-value*
 Q_A – Vazão volumétrica de alimentação [m^3/h]
 QS – Quadrado médio
 Q_U – Vazão volumétrica da corrente de *underflow* [m^3/h]
 RC – Razão de concentração [--]
 RL – Razão de líquido [%]
 SQ – Soma de quadrados
 v_c – Velocidade da suspensão na região cilíndrica do hidrociclone [m/s]
 X – Fração de sólidos menor que um determinado tamanho D_p [--]
 X_1 – Variável codificada: concentração mássica de CMC [--]
 X_2 – Variável codificada: diâmetro do orifício de *underflow* [--]
 ΔP – Diferença de pressão entre o orifício de *overflow* e a alimentação [Pa]
 γ – Taxa de cisalhamento [1/s]
 η – Viscosidade aparente [cP]
 ε – Espessura do filtro [mm]
 ρ – Massa específica da suspensão [kg/m^3]
 τ – Tensão de cisalhamento [Pa]

AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores gostariam de agradecer às agências de fomento Capes, CNPq e Fapemig pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- BING, L., LUNCAO, L., HUAJIAN, W., ZHENJIANG, Z., YAOGUANG, Q. (2020). Numerical simulation and experimental study on internal and external characteristics of novel Hydrocyclones. Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung, 56(6), 1875–1887.
- BRITO-PARADA, P. R., DEWES, R. M., VEGA-GARCIA, D., CILLIERS, J. J. (2018). Influence of Design Parameters on Biomass Separation in Mini-hydrocyclones. Chemical Engineering and

- Technology, 41(12), 2323–2330.
- CHU, L. Y., CHEN, W. M., LEE, X. Z. (2000). Effect of structural modification on hydrocyclone performance. *Separation and Purification Technology*, 21(1–2), 71–86.
- DAVAILLES, A., CLIMENT, E., BOURGEOIS, F., MAJUMDER, A. K. (2012). Analysis of swirling flow in hydrocyclones operating under dense regime. *Minerals Engineering*, 31, 32–41.
- GARCIA, V. A., LOBATO, F. S., VIEIRA, L. G. M. (2020). Design of high performance thickener hydrocyclones using robust optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 191.
- GHODRAT, M., KUANG, S. B., YU, A. B., VINCE, A., BARNETT, G. D., BARNETT, P. J. (2014). Numerical analysis of hydrocyclones with different conical section designs. *Minerals Engineering*, 62, 74–84.
- GONÇALVES, S. M., BARROZO, M. A. S., VIEIRA, L. G. M. (2017). Effects of Solids Concentration and Underflow Diameter on the Performance of a Newly Designed Hydrocyclone. *Chemical Engineering and Technology*, 40(10), 1750–1757.
- GONÇALVES, S. M., ULLMANN, G., MORIMOTO, M. G., DE SOUZA BARROZO, M. A., VIEIRA, L. G. M. (2022). Effect of rheology and solids concentration on hydrocyclones performance: A study involving the design variables of an optimized hydrocyclone. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 210(September 2021).
- HWANG, K. J., CHOU, S. P. (2017). Designing vortex finder structure for improving the particle separation efficiency of a hydrocyclone. *Separation and Purification Technology*, 172, 76–84.
- ISCAN, A. G., KOK, M. V. (2007). Effects of polymers and CMC concentration on rheological and fluid loss parameters of water-based drilling fluids. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 29(10), 939–949.
- KYRIAKIDIS, Y. N., SILVA, D. O., BARROZO, M. A. S., VIEIRA, L. G. M. (2018). Effect of variables related to the separation performance of a hydrocyclone with unprecedented geometric relationships. *Powder Technology*, 338, 645–653.
- LIU, Y., BU, F., CHEN, S., JIANG, M. (2021). Investigating effect of polymer concentrations on separation performance of hydrocyclone by sensitivity analysis. *Energy Science and Engineering*, 9(8), 1202–1215.
- MOGNON, J. L., DA SILVA, J. M., BICALHO, I. C., ATAÍDE, C. H., DUARTE, C. R. (2016). 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.
- OLIVEIRA, D. C., ALMEIDA, C. A. K., VIEIRA, L. G. M., DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. S. (2009). Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: An experimental and CFD study. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(3), 575–582.
- PENG, S., JIANG, G., LI, X., YANG, L., LIU, F., HE, Y. (2018). Flocculation of submicron particles in water-based drilling fluids by CMC-g-DMDAAC. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 162(October 2017), 55–62.
- ROCHA, C. A. O., ULLMANN, G., SILVA, D. O., VIEIRA, L. G. M. (2020). Effect of changes in the feed duct on hydrocyclone performance. *Powder Technology*, 374, 283–289.
- SALVADOR, F. F., ASCENDINO, G. G., DE FARIA, É. V., BARROZO, M. A. DE S., VIEIRA, L. G. M. (2021). Geometric optimization of filtering cylindrical hydrocyclones. *Powder Technology*, 381, 611–619.
- SALVADOR, F. F., BARROZO, M. A. S., VIEIRA, L. G. M. (2016). Effect of a Cylindrical Permeable Wall on the Performance of Hydrocyclones. *Chemical Engineering and Technology*, 39(6), 1015–1022.
- SILVA, D. O., VIEIRA, L. G. M., LOBATO, F. S., BARROZO, M. A. S. (2012). Optimization of the design and performance of hydrocyclones by

- Differential Evolution technique. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 61, 1–7.
- SILVA, N. K. G., SILVA, D. O., VIEIRA, L. G. M., BARROZO, M. A. S. (2015). Effects of underflow diameter and vortex finder length on the performance of a newly designed filtering hydrocyclone. *Powder Technology*, 286, 305–310.
- SOUZA, F. J., VIEIRA, L. G. M., DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. S. (2000). Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone. *Powder Technology*, 107(3), 259–267.
- TIAN, J., NI, L., SONG, T., OLSON, J., ZHAO, J. (2018). An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, 206(May), 268–285.
- VAKAMALLA, T. R., KORUPROLU, V. B. R., ARUGONDA, R., MANGADODDY, N. (2017). Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model. *Separation and Purification Technology*, 175, 481–497.
- VIEIRA, L. G. M., BARBOSA, E. A., DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. S. (2005). Performance analysis and design of filtering hydrocyclones. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(1), 143–152.
- VIEIRA, L. G. M., DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. S. (2010). Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(5), 460–467.
- VIEIRA, L. G. M., SILVA, C. A., DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. S. (2007). A study of the fluid dynamic behaviour of filtering hydrocyclones. *Separation and Purification Technology*, 58(2), 282–287.
- WU, S. E., HWANG, K. J., CHENG, T. W., HUNG, T. C., TUNG, K. L. (2017). Effectiveness of a hydrocyclone in separating particles suspended in power law fluids. *Powder Technology*, 320, 546–554.
- YANG, L., TIAN, J. L., YANG, Z., LI, Y., FU, C. H., ZHU, Y. H., PANG, X. L. (2015). Numerical analysis of non-Newtonian rheology effect on hydrocyclone flow field. *Petroleum*, 1(1), 68–74.