



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UM HIDROCICLONE CILÍNDRICO-FILTRANTE CONCENTRADOR OTIMIZADO E A GEOMETRIA RIETEMA

ERICA V. FARIA^{1*}, MARCOS A. S. BARROSO¹, LUIZ GUSTAVO M. VIEIRA¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química
*e-mail: ericavictorfaria@gmail.com

RESUMO – Os hidrociclones filtrantes são uma modalidade de hidrociclones não convencionais que se destacam por aprimorar a eficiência da separação e os custos de energia combinando a filtração com a separação centrífuga. No presente trabalho, foi realizada uma comparação nas performances do hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado para redução do consumo energético (HCiF-OT3) e o hidrociclone da clássica família Rietema, conhecidos por serem hidrociclones aplicáveis a operações de espessamento e apresentarem baixo consumo energético. A partir disso, constatou-se que o número de Euler foi a variável mais beneficiada, apresentando redução de até 30% para HCiF-OT3. O hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado também apresentou aumentos para concentração de sólidos do *underflow* na faixa de 11,0% em comparação ao Rietema. Em relação a eficiência total também foram encontradas vantagens na utilização do equipamento HCiF-OT3 em comparação ao hidrociclone Rietema. Em média foram constatados aumentos 12,2% para a eficiência total. Assim, conclui-se que o equipamento filtrante de geometria HCiF-OT3 se destaca como opção para operações de concentração de suspensões. Nas condições abordadas ($C_{VA} = 1,0\%$ e $-\Delta P = 1,77$ bar), a utilização do equipamento filtrante resulta em correntes de *underflow* mais concentradas que o hidrociclone Rietema, além de promoverem a redução do consumo energético associado à operação.

INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são separadores que promovem a separação de uma fase dispersa (líquida ou sólida) de uma fase contínua líquida por meio de um campo centrífugo. Em geral, são equipamentos compostos de uma geometria cônico-cilíndrica, com uma entrada tangencial na seção cilíndrica e uma saída em cada sentido do seu eixo principal. Na parte mais estreita da seção cônica, há o orifício de *underflow*, ao passo que no topo da seção cilíndrica, há uma descarga chamada de tubo de *overflow*. Este tubo, por sua vez, é prolongado para o interior do hidrociclone por uma estrutura denominada de *vortex finder* (Bridges *et al.*, 2020).

Esses equipamentos são extensamente empregados no âmbito industrial por possuírem estrutura simples, sem partes móveis, baixo custo de manutenção e apresentarem satisfatória eficiência no processo de separação quando comparados a outros separadores (como centrífugas e filtros).

A sedimentação centrífuga é o princípio de separação dos hidrociclones. Uma suspensão é injetada tangencialmente no cilindro do equipamento sob pressão. Devido a sua configuração geométrica e energia de pressão disponível, o hidrociclone proporciona um movimento rotacional da suspensão em seu interior, fazendo com que as partículas maiores e mais densas ocupem a região mais próxima à parede do separador. Por outro lado, aquelas

menores e menos densas ocupam a região central do equipamento. Em virtude desse movimento para a região central, tais partículas são arrastadas por um vórtice ascendente interno até a descarga pelo tubo de *overflow* (Silva *et al.*, 2015).

Um hidrociclone “ideal” deveria apresentar simultaneamente um alto poder de classificação, baixo consumo energético e alta concentração de sólidos na corrente de *underflow* durante seu funcionamento. No entanto, em um hidrociclone real, dificilmente estas três características desejadas são verificadas simultaneamente. Em se tratando de hidrociclones, um alto poder de classificação demanda alto consumo energético e proporcionam baixa concentração de sólidos na corrente de *underflow*. Da mesma forma, uma alta concentração de sólidos na corrente de *underflow* faz com que o poder de classificação do hidrociclone seja prejudicado. Logo, a necessidade específica de um processo determina a escolha de um separador com alto poder de classificação (hidrociclones classificadores) ou com grande potencial concentrador (hidrociclones concentradores). Os hidrociclones concentradores são amplamente utilizados em processos de espessamento de suspensões e são identificados por apresentarem baixas razões de líquido frente aos classificadores (Ni *et al.*, 2019). Vale destacar que a razão de líquido (R_L) representa a fração de líquido alimentada que é descarregada no orifício de *underflow*. Opostamente, os hidrociclones classificadores são amplamente utilizados em processos cujo interesse está voltado na classificação de sólidos por faixa de tamanhos e são identificados por apresentarem altas razões de líquido frente aos hidrociclones concentradores (Svarovsky, 2000).

A fim de melhorar o desempenho de separação dos hidrociclones, muitos estudos vêm sendo realizados acerca de modificações geométricas, estruturais ou operacionais que podem ser feitas nesses equipamentos. Neste contexto, destaca-se também os hidrociclones filtrantes, propostos por pesquisadores da Universidade Federal de Uberlândia. A incorporação de meios filtrantes a um hidrociclone convencional foi estudada sob três

modalidades: o hidrociclone cilíndrico filtrante (Salvador *et al.*, 2016; Salvador *et al.*, 2021), cônico filtrante (Souza *et al.*, 2000; Vieira *et al.*, 2005; Vieira *et al.*, 2007; Oliveira *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2013; Vieira e Barrozo, 2014; Silva *et al.*, 2015; Vieira *et al.*, 2016) e cilíndrico-cônico filtrante (Salvador *et al.*, 2019). Uma representação esquemática dos hidrociclones (convencional, cônico-filtrante, cilíndrico-filtrante e cilíndrico-cônico-filtrante) pode ser vista na Figura 1.

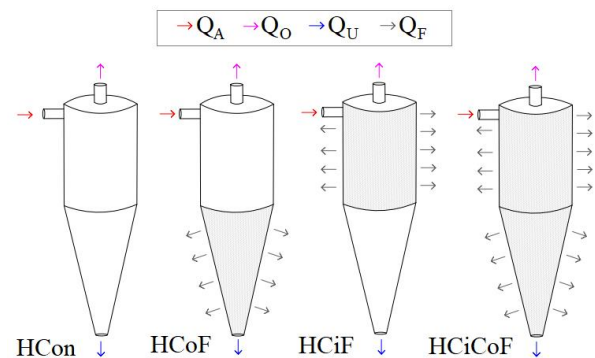


Figura 1: Representação esquemática de um hidrociclone convencional (HCon), hidrociclone cônico-filtrante (HCoF), hidrociclone cilíndrico-filtrante (HCiF) e hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante (HCiCoF). Fonte: Salvador *et al.* (2021).

O processo de separação nos hidrociclones filtrantes é similar ao dos hidrociclones completamente maciços (convencionais), com exceção de uma corrente adicional de fluido advinda da filtração pelas regiões permeáveis (cone, cilindro ou ambas). Apesar da vazão de filtrado corresponder no máximo a 0,11% da vazão de alimentação do separador, esta ínfima retirada de líquido pelo cilindro ou cone (ou por ambos) é capaz de modificar a fluidodinâmica interna do equipamento e impactar diretamente no desempenho do separador. Estudos prévios já sinalizaram que ao se incorporar um cilindro ou cone (ou ambos) filtrante na estrutura de um hidrociclone, alguns benefícios como a diminuição de consumo energético (diminuição do número de Euler) e aumento no poder de classificação de partículas (aumento da Eficiência Total) podem ser obtidos (Salvador *et al.*, 2016; Salvador *et al.*, 2019; Salvador *et al.*, 2021). O movimento rotacional da

suspensão (principalmente na região do vórtice externo) é diminuída com a incorporação do meio filtrante, uma vez que os poros da parede permeável garantem uma saída adicional para o fluido. Há, portanto, uma redução na queda de pressão e, conseqüentemente, no número de Euler desse equipamento. Já o aumento da Eficiência Total está associado à diminuição da velocidade radial do fluido próximo à parede porosa que minimiza as perdas de partículas para a corrente de *overflow* (Souza *et al.*, 2000; Vieira *et al.*, 2007).

A fim de melhorar o desempenho de separação dos hidrociclones, Vieira *et al.* (2011) avaliaram experimentalmente vinte e cinco configurações geométricas de hidrociclones convencionais (paredes completamente maciças). Neste estudo de Vieira *et al.* (2011), os autores destacaram pontualmente o potencial de dois hidrociclones, genericamente denominados de H11 e H14. O hidrociclone H11 (11ª linha da matriz de planejamento) apresentou o melhor desempenho de separação (maior Eficiência Total) com número de Euler relativamente baixo. Por sua vez, o hidrociclone H14 (14ª linha da matriz de planejamento) proporcionou características desejáveis a um hidrociclone concentrador (baixa Razão de líquido) sob razoável Eficiência Total e baixo número de Euler. Considerando as potencialidades dos hidrociclones convencionais H11 e H14 relatados por Vieira *et al.* (2011), Salvador (2017) constatou que, a depender da localização do meio filtrante, a filtração desempenhava diferentes efeitos no desempenho deste separador.

Essas observações preliminares motivaram Salvador (2017) a estudar os 25 hidrociclones convencionais de Vieira *et al.* (2011) nas modalidades cilíndrico-cônico-filtrante, cilíndrico-filtrante e cônico-filtrante. Salvador (2017) empregou técnicas de evolução diferencial e pôde propor 9 geometrias de hidrociclones filtrantes otimizados. Uma das geometrias otimizadas para promover baixo consumo energético (HCiF-OT3), despertou a interesse por apresentar também características desejáveis a processos de espessamento (alta concentração de sólidos no *underflow*).

Diante do exposto, com o intuito de dar continuidade aos estudos com hidrociclones do grupo de pesquisa da FEQUI/UFU, o objetivo geral do presente trabalho foi comparar o desempenho do hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado (HCiF-OT3) com a família clássica de hidrociclones concentradores Rietema.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi adotado como material particulado no presente estudo quartzito concedido pela empresa ANEX Mineração situada em Itabirito - MG. Trata-se de uma rocha metamórfica, composta principalmente por sedimentos recristalizados ricos em quartzo. Esse minério possui como principal característica uma elevada resistência interna, devido à estrutura cristalina densa e coesa no qual é formado (SANTOS *et al.*, 2014). Em virtude disto, o quartzito proporciona as principais características desejadas em um material particulado para ensaios experimentais de hidrociclonagem, dureza e resistência a quebra, que proporcionam a estabilidade da distribuição granulométrica durante a operação dos hidrociclones. Dessa forma, é possível reproduzir as condições experimentais com maior confiabilidade.

A densidade real do quartzito ($2,6707 \pm 0,0008 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) foi determinada por picnometria com deslocamento de gás Hélio, realizada no equipamento AccuPyc 1330 da Micromeritics. Enquanto a densidade aparente foi obtida através de picnometria convencional e correspondeu a $2,628 \pm 0,015 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. A distribuição granulométrica característica do quartzito, foi obtida através do analisador de partículas por difração a *laser* da Malvern modelo Mastersizer Microplus.

A Fig. 4 ilustra um esquema da unidade experimental, a qual era constituída de um tanque para o armazenamento da suspensão (a), um agitador mecânico para homogeneizar (b), uma bomba centrífuga (5 hp) para fornecer energia de pressão (c), um medidor de vazão do tipo Coriolis (d), um manômetro digital (e) e um hidrociclone (f).

A suspensão utilizada nos experimentos possuía 1.0% v. de quartzito. As medidas

experimentais eram iniciadas quando o sistema apresentasse condições estáveis de queda de pressão. Aferia-se a vazão mássica de alimentação através de um medidor tipo Coriolis, enquanto as demais vazões mássicas (*overflow*, *underflow* e filtrado) eram determinadas por técnicas gravimétricas. Amostras de cada corrente eram coletadas, pesadas e secadas em estufa por 24 h a 105°C. Posteriormente, aferia-se as massas para os cálculos das concentrações. Ressalta-se que as medidas experimentais foram realizadas em triplicata.

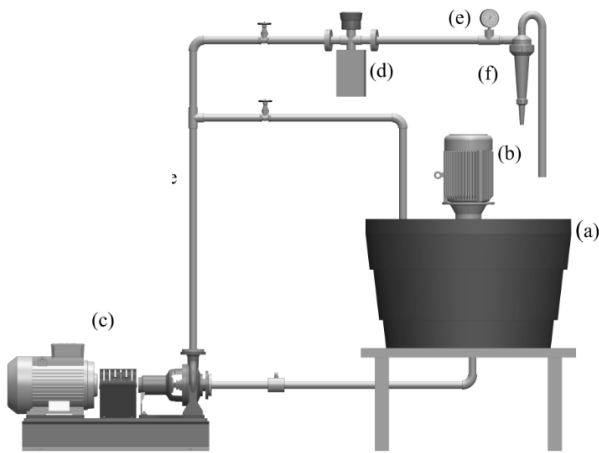


Figura 2: Representação esquemática da unidade experimental para o estudo dos hidrociclones. Fonte: Salvador *et al.* (2021).

Foram utilizados cilindros permeáveis confeccionados com partículas de bronze ($D_P = 150 \mu\text{m}$) submetidas a um processo de sinterização. A espessura da parede de todos os cones permeáveis era $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Após a colmatção a porosidade das matrizes porosas foi obtida segundo a metodologia de Darby (2001). A permeabilidade e a porosidade dos cones filtrantes foram equivalentes a $(4,19 \pm 0,70) \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ e $(5,07 \pm 0,28)\%$, respectivamente.

Para fins de comparação foram utilizados os dados experimentais de Vieira (2006) para um hidrociclone Rietema de 30 mm de diâmetro de seção cilíndrica. Esse equipamento foi escolhido justamente por ser uma clássica família de hidrociclones conhecidos por serem bons concentradores e apresentarem consumo energético relativamente baixo.

Para o estudo de Vieira (2006) foi adotada uma suspensão diluída de rocha fosfática ($C_{VA} = 0,915 \pm 0,015\% \text{ v.}$), de granulometria próxima à utilizada no presente estudo. Dessa forma, realizou-se a comparação de desempenho dos dois hidrociclones (HCiF-OT3 e Rietema) em operação nas mesmas condições operacionais. As relações geométricas do hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado HCiF-OT3 e Rietema estão organizados na Tabela 1.

Tabela 1: Relações geométricas dos hidrociclones.

Dimensões	HCiF-OT3	Rietema
Diâmetro da alimentação (D_i)	7,8 mm	8,4 mm
Diâmetro de <i>overflow</i> (D_o)	10,5 mm	10,2 mm
Diâmetro da seção cilíndrica (D_C)	30 mm	30 mm
Comprimento da seção cilíndrica (h)	75,7 mm	79 mm
Comprimento do tronco de cone (H)	98,3 mm	71 mm
Ângulo do tronco de cone (θ)	14,5°	20°

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número de Euler é uma resposta muito relevante em um processo de hidrociclonagem, pois está intrinsecamente relacionado ao consumo energético do separador. Sabe-se que em um processo industrial, o número de Euler deve ser levado para um valor mínimo, já que a demanda energética está diretamente relacionada a este adimensional. Dessa forma, para uma mesma queda de pressão, o equipamento que apresenta um menor número de Euler é capaz de processar uma maior quantidade de suspensão com um menor consumo energético.

Na Figura 3 são apresentados os valores de número de Euler obtidos experimentalmente para o hidrociclone HCiF-OT3 e por Vieira (2006) para o hidrociclone de geometria Rietema. Os dados foram obtidos para os diâmetros de *underflow* (D_U) de 3, 4 e 5 mm,

mantendo a concentração de sólidos da alimentação constante em 1,0%v e queda de pressão de 1,77 bar.

Segundo a Figura 3 o equipamento filtrante HCiF-OT3 promoveu um menor consumo energético em comparação ao hidrociclone Rietema. O número de Euler compreendeu uma faixa de 706 ($D_U = 5$ mm) a 810 ($D_U = 3$ mm) para o hidrociclone cilíndrico-filtrante e de 1048 a 1147 para o hidrociclone Rietema, segundo dados de Vieira (2006).

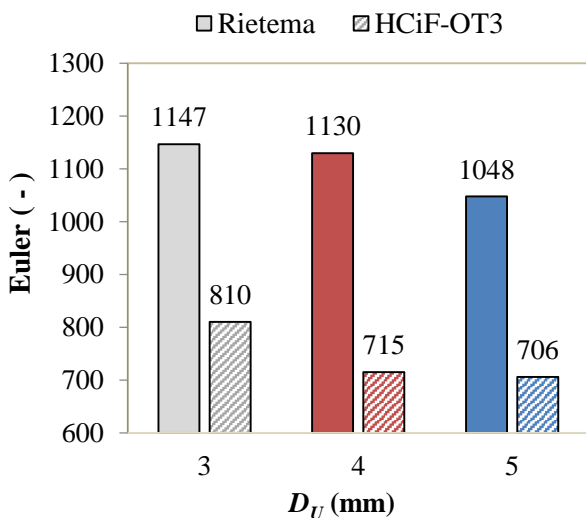


Figura 3: Número de Euler (Eu) dos hidrociclones Rietema e HCiF-OT3 para diferentes diâmetros de *underflow*.

Ainda de acordo com a Figura 3, verificou-se que o hidrociclone cilíndrico filtrante proporcionou uma redução de aproximadamente 30%, em média, no consumo energético associado à sua operação, quando comparado ao hidrociclone Rietema com o mesmo diâmetro de *underflow*.

Acredita-se que os decréscimos observados para os números de Euler para a configuração cilíndrico-filtrante também estejam relacionados com a retirada da corrente adicional de filtrado. As vazões de filtrado, independentemente da configuração geométrica, foram muito pequenas, consistindo no máximo 0,05% da vazão de alimentação de HCiF-OT3. Mesmo assim, a vazão de filtrado (0,250 a 0,270 cm^3/s), certamente alterou o comportamento fluidodinâmico e, portanto, também modificou a relação entre os vórtices

interno e externo. De acordo com as observações em CFD feitas por Vieira *et al.* (2007) a retirada de fluido pela matriz porosa promovia a redução do movimento espiralado no interior do hidrociclone que é a principal causa de dissipação da energia de pressão disponibilizada aos hidrociclones.

Em relação a geometria, o aumento na dimensão geométrica do diâmetro de *overflow* proporciona a redução da perda de carga. Assim, permite-se a alimentação de mais suspensão para uma dada queda de pressão (Vieira *et al.*, 2011). Com isso, para a mesma queda de pressão, os hidrociclones com maiores dimensões de D_o receberam quantidades maiores de fluido por unidade de tempo (efeito negativo sobre o número de Euler).

Além disso, o aumento do comprimento total do hidrociclone HCiF-OT3 ($L = 174$ mm) em relação ao Rietema ($L = 150$ mm), pode estar relacionado ao aumento da capacidade de processamento, comportamento verificado por Vieira *et al.* (2011) através de CFD e também observado por Salvador *et al.* (2019).

Em se tratando de hidrociclones concentradores, em processos de espessamento de suspensões é desejada uma alta recuperação de sólidos na corrente de *underflow*. A Figura 4 apresenta os dados de C_{VU} para diferentes níveis de D_U .

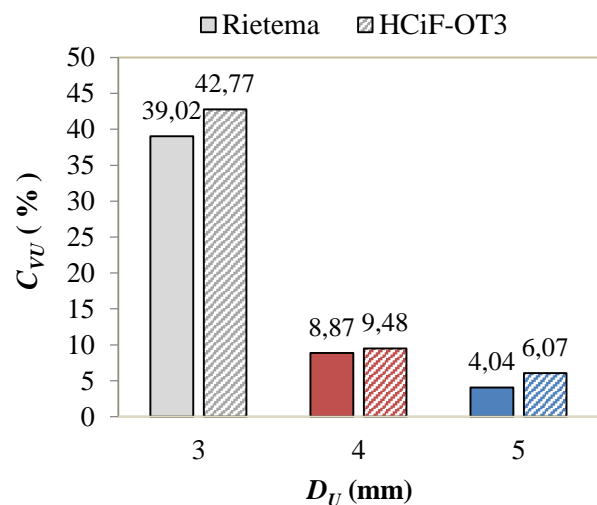


Figura 4: Concentração de sólidos do *underflow* (C_{VU}) para os hidrociclones Rietema e HCiF-OT3 para diferentes diâmetros de *underflow*.

O poder de recuperação ou de concentração de sólidos em hidrociclones pode ser avaliado através da concentração de sólidos do *underflow* (C_{VU}). Esta resposta está intrinsecamente relacionada à capacidade de espessamento da corrente de *underflow*.

A Figura 4 mostra as concentrações de sólidos obtidas experimentalmente para a corrente *underflow* para o hidrociclone HCiF-OT3 e levantadas por Vieira (2006) para o hidrociclone da família Rietema. Foi obtido um intervalo relativamente amplo para C_{VU} variando de 6,07% ($D_U = 5$ mm) a 42,77% ($D_U = 3$ mm) para o hidrociclone cilíndrico-filtrante e de 4,04% a 39,02% para os hidrociclones convencionais.

Ainda de acordo com a Figura 4, a operação com hidrociclone cilíndrico-filtrante proporcionou maiores concentrações de sólidos na corrente de *underflow* em comparação ao hidrociclone Rietema. Em média, C_{VU} de HCiF-OT3 foi 11,0% maior quando comparado ao dispositivo Rietema.

Para a mesma queda de pressão, hidrociclones com maiores dimensões de D_o tendem a apresentar menores razões de líquido e, com isso, maiores concentrações de sólidos no *underflow* (Salvador *et al.* 2021). Conforme indicado na Tabela 1, o hidrociclone HCiF-OT3 ($D_o = 10,5$ mm) apresenta um ligeiro aumento nessa variável geométrica em relação ao Rietema ($D_o = 10,2$ mm).

Provavelmente, tal incremento terá impacto direto no sentido de aumentar a Eficiência Total do equipamento HCiF-OT3. As Eficiências totais (E_T) do hidrociclone Rietema e de geometria otimizada HCiF-OT3 com diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm, podem ser vistos na Figura 5.

A eficiência total está relacionada ao poder de classificação de partículas do equipamento. De acordo com os dados de Vieira (2006) a eficiência total variou de 42,86% a 53,81% para o hidrociclone Rietema. Para HCiF-OT3 a eficiência esteve entre 48,42% e 56,42%.

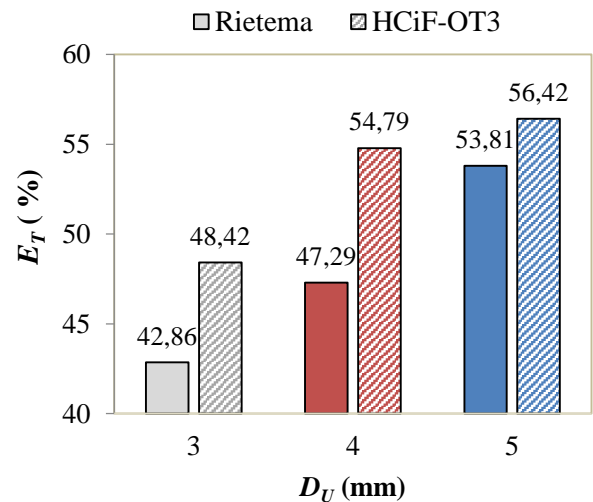


Figura 5: Eficiência Total (E_T) para os hidrociclones Rietema e HCiF-OT3 para diferentes diâmetros de *underflow*.

A Eficiência Total obtida para HCiF-OT3 foi maior que o hidrociclone Rietema. As Eficiências Totais do hidrociclone filtrante foram majoradas em 13,0%, 15,9% e 4,9% respectivamente, utilizando diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm respectivamente. Dessa forma, pode-se afirmar que a Eficiência Total dos separadores foi influenciada positivamente pela diferença de geometria e incorporação do meio filtrante à seção cilíndrica.

Em relação à filtração, é interessante ressaltar que a adição de um meio filtrante aos hidrociclones pode ter feito com que o movimento espiralado diminuísse no interior do equipamento, o que é uma condição desfavorável à separação. Este comportamento foi verificado pelos estudos de CFD de Vieira *et al.* (2007) e através de estudos experimentais por Salvador *et al.* (2019). Por outro lado, a incorporação de uma saída de filtrado na seção cilíndrica, deve ter resultado também uma redução da velocidade radial no interior do equipamento (condição favorável à separação). Assim, mesmo havendo particularidades agindo em sentidos opostos, as condições favoráveis foram preponderantes no fenômeno de modo que as Eficiências Totais do hidrociclone filtrante HCiF-OT3 pudessem ser majoradas em relação ao hidrociclone convencional Rietema.

Em relação à geometria, o menor diâmetro de alimentação apresentado pelo equipamento de geometria HClF-OT3 ($D_i = 7,8$ mm) em comparação ao hidrociclone Rietema ($D_i = 8,4$ mm) pode ter provocado acréscimos na Eficiência Total. Com a redução de D_i mais partículas são capazes de atingir a parede do separador devido ao aumento da velocidade tangencial do vórtice externo.

Além disso, o hidrociclone HCoF-OT3 apresenta um ângulo de tronco de cone de $14,5^\circ$, enquanto o equipamento Rietema tem ângulo de 20° . De acordo com Salvador *et al.* (2021) menores ângulos de tronco de cone resultam em maior comprimento da seção cônica, com isso, possibilitam uma maior recuperação de massa sólida, pois o processo de separação centrífuga é potencializado na seção cônica.

CONCLUSÃO

Foi possível concluir que hidrociclone cilíndrico filtrante otimizado por Salvador (2017) se destacou em relação ao hidrociclone Rietema, devido a vantagens no consumo energético, potencial concentrador e eficiência total. A partir dos dados experimentais desse trabalho e de Vieira (2006), constatou-se que o número de Euler foi a variável mais beneficiada, apresentando redução de até 30% para HClF-OT3. O hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado também apresentou aumentos para concentração de sólidos do *underflow* na faixa de 11,0% em comparação ao Rietema. Em relação a eficiência total também foram encontradas vantagens na utilização do equipamento HClF-OT3 em comparação ao hidrociclone Rietema. Em média foram constatados aumentos 12,2% para a eficiência total. Assim, conclui-se que o equipamento filtrante de geometria HClF-OT3 se destaca como opção para operações de concentração de suspensões. Nas condições abordadas ($C_{VA} = 1,0\%$ e $-\Delta P = 1,77$ bar), a utilização do equipamento filtrante resulta em correntes de *underflow* mais concentradas que o hidrociclone Rietema, além de promoverem a redução do consumo energético associado à operação.

NOMENCLATURA

- C_{VA} - Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, [MoLoT]
 C_{VU} - Concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow*, [MoLoT]
 D_C - Diâmetro da seção cilíndrica do hidrociclone, [MoLiTo]
 D_i - Diâmetro da alimentação do hidrociclone, [MoLiTo]
 D_U - Diâmetro do orifício de *underflow* do hidrociclone, [MoLiTo]
 D_o - Diâmetro do duto de *overflow* do hidrociclone, [MoLiTo]
 E_T - Eficiência total, [MoLoTo]
 Eu - Número de Euler, [MoLoTo]
 L - Comprimento total do hidrociclone, [MoLiTo]
 R_L - Razão de líquido, [MoLoTo]
 $-\Delta P$ - Queda de pressão, [M₁L⁻¹T₂]
 θ - Ângulo da seção cônica do hidrociclone, [°]

REFERÊNCIAS

- BRIDGES, S., & ROBINSON, L. (2020), Hydrocyclones. A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing, 423 - 438. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821341-4.00019-1>
- DARBY, R. (2001), Chemical Engineering Fluid Mechanics. 2nd ed. New York: Taylor & Francis. 559 p.
- NI, L.; TIAN, J.; ZHAO, J. (2016), Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. Separation and Purification Technology, v. 171, p. 270-279, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.047>
- 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.

- SALVADOR, F. F. (2017), Otimização Geométrica de Hidrociclones com Cilindros e Cones Permeáveis. PPGEQ/UFU – Uberlândia - MG, 132p. (tese de doutorado).
- 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*, v. 381, p. 611–619, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2020.12.036>
- 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 & Technology*, 39(6), 1015–1022.
- SALVADOR, F. F., BARROZO, M. A. S., & VIEIRA, L. G. M. (2019), Filtering cylindrical-conical hydrocyclone. *Particuology*. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.11.003>
- SANTOS, D. A.; GURGEL, M. T.; MOTA, A. F.; PAIVA, F. I. G. (2014), Extração Mineral de Quartzito e sua Aplicabilidade na Construção Civil na Cidade de Várzea - PB. *HOLOS*, v. 4, p. 89-100, 2014. <https://doi.org/10.15628/holos.2014.1675>
- 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.
- SVAROVSKY, L., (2000), *Solid–liquid separation* (4th ed.). Boston: Butterworth-Heinemann.
- VIEIRA, L. G. M. (2006), Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes. PPGEQ/UFU – Uberlândia - MG, 297p. (tese de doutorado).
- 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., BARROZO, M. A. S. (2014), Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator. *Minerals Engineering*. 57, 50–56.
- 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.
- VIEIRA, L. G. M., SILVA, D. O., & BARROZO, M. A. S. (2013), Study of the performance of a novel hydrocyclone built in the configurations of the classical families. *Separation Science and Technology*. 48(17), 2700–2706.
- VIEIRA, L. G. M., SILVA, D. O., & BARROZO, M. A. S. (2016), Effect of inlet diameter on the performance of a filtering hydrocyclone separator. *Chemical Engineering & Technology*. 39(8), 1406–1412.
- VIEIRA, L. G. M., SILVÉRIO, B. C., DAMASCENO, J. J. R., & BARROZO, M. A. S. (2011), Performance of hydrocyclones with different geometries. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 89(4), 655–662.