

EFEITO DA FILTRAÇÃO NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO HIDROCICLONE HCICOF EM RELAÇÃO AOS SEPARADORES HCIF E HCOF

KYRIAKIDIS, Y.N.¹, SALVADOR, F.F.², BARROZO, M.A.S.³, VIEIRA, L.G.M.⁴

¹Universidade Federal de Uberlândia. yannenk@yahoo.com.br

²Universidade Federal de Uberlândia. ffs.salvador@gmail.com

³Universidade Federal de Uberlândia. masbarrozo@ufu.br

⁴Universidade Federal de Uberlândia. luizgustavo@feq.ufu.br

RESUMO

Hidrociclones são equipamentos cônico-cilíndricos destinados à separação de uma fase dispersa de uma fase líquida contínua, tendo ampla utilização nos mais variados setores industriais. Dependendo da finalidade almejada pelo usuário (concentração ou classificação), é possível potencializar o desempenho dos hidrociclones mediante o uso simultâneo de novas operações unitárias à hidrociclonagem. Assim, este projeto teve como objetivo estudar experimentalmente o efeito da inserção de cilindros e cones porosos, conjunta e separadamente, durante a operação de um hidrociclone de geometria otimizada (H11) para avaliar o comportamento do consumo energético. De acordo com os principais resultados experimentais, a filtração aplicada simultaneamente à separação centrífuga diminuiu o número de Euler nos casos onde o hidrociclone tinha apenas o cilindro filtrante (HCiF) ou apenas o cone filtrante (HCoF), quando comparado ao hidrociclone convencional (HCon). Em se tratando do hidrociclone totalmente filtrante (HCiCoF), a filtração simultânea pelas partes cônica e cilíndrica pouco alterou o consumo energético deste equipamento.

PALAVRAS-CHAVE: hidrociclone; separação; filtração.

ABSTRACT

Hydrocyclones are conical-cylindrical equipment for the separation of a dispersed phase in a continuous liquid phase, with widespread use in several industrial sectors. Depending upon the desired purpose (concentration or classification), it is possible to enhance the performance of hydrocyclones through the simultaneous use of new unit operations applied to the hydrocycloning. Thereby, this project aimed to experimentally study the effect of inserting porous cylinders and cones, jointly and separately, during the operation of a hydrocyclone with an optimized geometry (H11) to evaluate the behavior of energy consumption. According to the main experimental results, filtration simultaneously applied to centrifugal separation reduced the Euler's number in the cases where the hydrocyclone had only the filtering cylinder (HCiF) or only the filtering cone (HCoF), when compared to the conventional hydrocyclone (HCon). Regarding the fully filtering hydrocyclone (HCiCoF), the simultaneous filtration through conical and cylindrical parties barely changed the energy consumption of this equipment.

KEYWORDS: hydrocyclone; separation; filtration.

1. INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são separadores centrífugos amplamente utilizados no setor industrial. Estes separadores formam um importante grupo de equipamentos destinado à separação sólido-líquido e líquido-líquido aplicado aos mais diversos setores industriais, sendo empregados principalmente nas operações unitárias de separação e/ou concentração de partículas.

Estes equipamentos oferecem um dos meios mais baratos de separação do ponto de vista de operação e de investimento, posto que os mesmos não possuem partes móveis. Embora os hidrociclones tenham sido patenteados no final do século XIX, esse tipo de equipamento teve seu uso pouco difundido durante algumas décadas, sendo este restrito a apenas algumas atividades como a remoção de areia de águas. Entretanto, na primeira metade do século XX este contexto começou a se alterar. A indústria de extração e processamento mineral percebeu o potencial de aplicação dos hidrociclones e começou a empregá-los em escala industrial, o que despertou o interesse de pesquisadores, levando a numerosos estudos científicos dessa categoria de separadores.

Basicamente, os hidrociclones são utilizados para duas funções específicas: classificação por tamanho das partículas ou concentração de material particulado no *underflow*. A fim de que tais funções possam ser alcançadas (concentração ou classificação), há na literatura e na indústria vários tipos de famílias de hidrociclones, cuja principal característica é possuir relações geométricas específicas com o diâmetro da parte cilíndrica. Neste aspecto, a Figura 1 apresenta genericamente as principais dimensões geométricas que são relevantes para o estudo de qualquer hidrociclone.

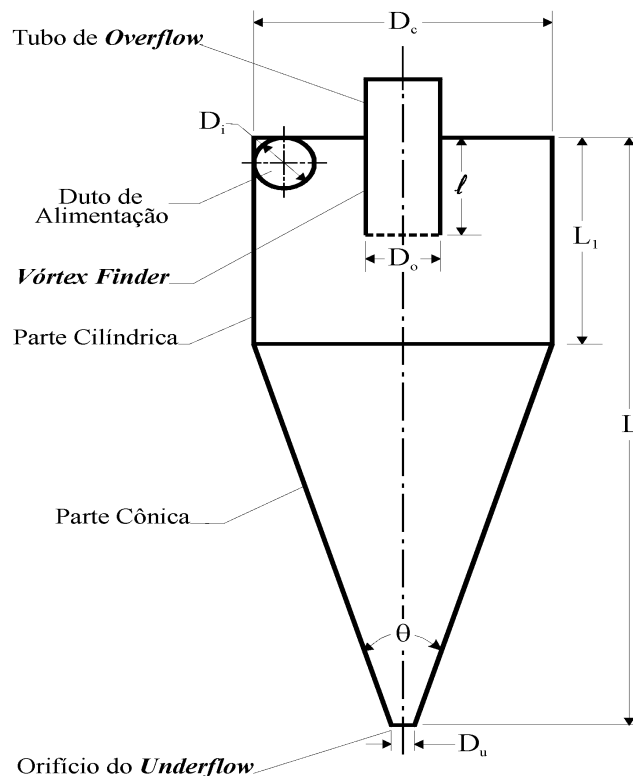


Figura 1. Principais dimensões geométricas de um hidrociclone.

A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) sempre se mostrou dedicada em estudos relacionados à separação de particulados, visto que a localização geográfica da Universidade favorece o estudo da hidrociclonagem, já que a região do Triângulo Mineiro e parte do interior de Goiás têm uma elevada demanda destes separadores, especialmente

na área mineral e metalúrgica (SOUZA *et al.*, 2000). Neste contexto, Vieira (2006) estudou numérica e experimentalmente o desempenho de separação de hidrociclones de famílias não convencionais, estudando também o efeito da inserção de um cone filtrante comparado aos hidrociclones de corpo totalmente impermeável. Para tanto, foram estudadas 25 distintas geometrias de hidrociclones em conformidade com as técnicas de um Planejamento Composto Central (PCC), cujos fatores analisados foram o diâmetro da alimentação (D_i), diâmetro de *overflow* (D_o), comprimento total (L) e ângulo do tronco de cone (θ). De acordo com as principais simulações fluidodinâmicas e dados experimentais obtidos por Vieira (2006), foi possível concluir que era possível conciliar, num único equipamento, altas eficiências com baixos número de Euler (BARROZO *et al.*, 2007). A esta geometria foi dada a denominação de Hidrociclone 11, ou simplesmente, H11 (11^a linha da matriz de planejamento gerada pelas técnicas do PCC).

Vale mencionar que Vieira (2006) estudou o efeito da filtração apenas na parte cônica dos hidrociclones, enquanto que Façanha (2012) realizou um trabalho de menor escala, mas ainda semelhante ao de Vieira (2006), observando apenas a influência da inserção de um cilindro poroso no hidrociclone de geometria otimizada H11.

Visando dar continuidade aos estudos com os hidrociclones filtrantes feitos por Vieira (2006) e Façanha (2012), este trabalho teve como objetivo estudar a influência da inserção simultânea de um cilindro e cone, ambos permeáveis, sobre o desempenho energético do hidrociclone H11, comparando-o com os observados nas demais modalidades filtrantes (apenas cone ou cilindro poroso).

Dessa forma, para fins de esclarecimento, de acordo com a localização da matriz porosa foi dada as seguintes nomenclaturas ao hidrociclone H11: HCon (Hidrociclone Convencional – cone e cilindro maciços - VIEIRA, 2006), HCoF (Hidrociclone Cônico-Filtrante - VIEIRA, 2006), HCiF (Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante - FAÇANHA, 2012) e HCiCoF (Hidrociclone Cilíndrico-Cônico-Filtrante - objeto de estudo do presente trabalho).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O hidrociclone H11 estudado por Vieira (2006), cuja geometria foi empregada em todos os hidrociclones referentes ao presente trabalho, tem suas relações geométricas expostas na Tabela I a seguir e suas dimensões mostradas na Figura 2.

Tabela I. Relações geométricas do hidrociclone H11.

Relação	Valor
D_i/D_c	0,26
D_o/D_c	0,22
L/D_c	6,90
L_1/D_c	2,22
θ	11,2°

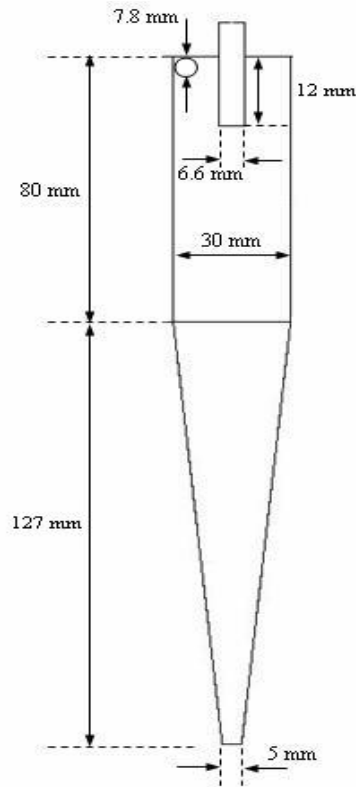


Figura 2. Dimensões características do hidrociclone H11 (VIEIRA, 2006).

Cada peça do hidrociclone (cone, cilindro, dutos de alimentação e *overflow*) foi fabricada separadamente e arranjados de forma a conseguir os quatro equipamentos descritos: HCon, HCoF, HCiF e HCoFi. A principal vantagem da construção individual das peças é a possibilidade de se produzir diferentes hidrociclones apenas mudando as peças dos encaixes, sem a necessidade de construção de outro equipamento. A Figura 3 ilustra algumas das partes construídas.

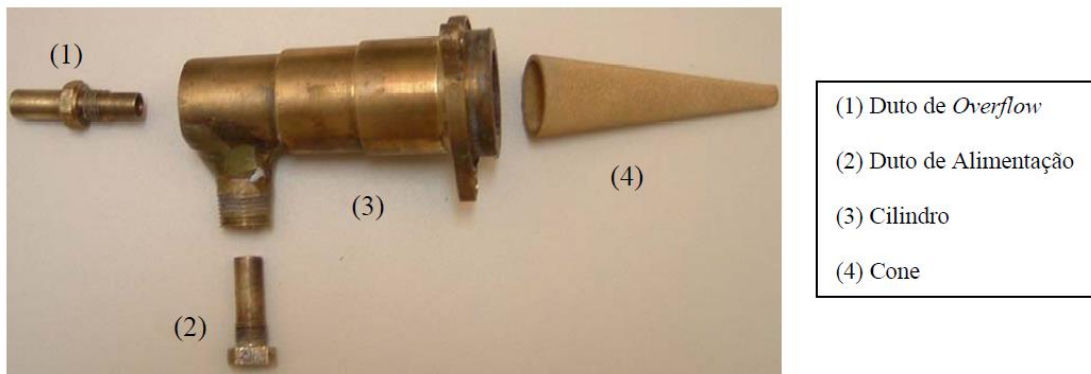


Figura 3. Componentes de um hidrociclone (VIEIRA, 2006).

As matrizes porosas utilizadas neste estudo foram fabricadas a partir de partículas sinterizadas de bronze, enquanto que os componentes maciços foram feitos em latão, manufaturados na própria oficina mecânica da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. As propriedades de permeabilidade (k) e porosidade (ϵ) do material sinterizado foram determinadas através de testes de bancada por Vieira (2006) e Façanha (2012) e se encontram na Tabela II, a seguir.

Tabela II. Permeabilidades e porosidades dos componentes sinterizados.

Componente	$k \cdot 10^{-16} [m^2]$	$\varepsilon [-]$
Cone	6,63	0,100
Cilindro	1,71	0,138

Com relação ao material particulado utilizado, foi escolhido o concentrado de rocha fosfática para a realização deste trabalho, tendo em vista sua grande importância econômica na região. Todo o concentrado de rocha fosfática empregado foi gentilmente cedido pela empresa Vale Fértil S/A, localizada em Patos de Minas (MG).

Este material foi o mesmo previamente utilizado por Façanha (2012), cujo peso específico foi determinado através da técnica de picnometria a Hélio e seu valor encontrado foi de, aproximadamente, 2860 kg/m^3 .

A distribuição granulométrica do material foi obtida no equipamento *Mastersizer*, que utiliza o princípio da difração de raios *laser* para obter o diâmetro volumétrico da partícula. O modelo de distribuição granulométrica que melhor se adequou aos dados experimentais foi o de *Rosin-Rammler-Bennet* (RRB), no qual a fração mássica de partículas (X) menor que certo diâmetro (d_p) são correlacionados - Equação 1.

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

Os parâmetros desse modelo, $d_{63,2}$ e n , foram obtidos por regressão não-linear (coeficiente de correlação quadrático igual a 0,99) com valores iguais a, respectivamente, $9,34 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ e 0,8 (FAÇANHA, 2012). A Figura 4 traz os dados experimentais ajustados ao modelo RRB.

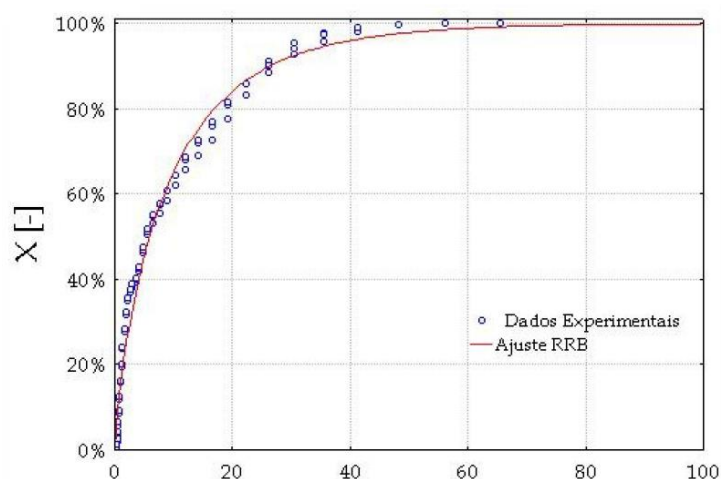


Figura 4. Ajuste dos dados experimentais de distribuição granulométrica segundo o modelo RRB.

No que concerne à unidade experimental, esta era constituída de um tanque para armazenamento da suspensão de concentrado de rocha fosfática, bem como de chicanas e um agitador mecânico acoplado a um motor cuja função era homogeneizar a suspensão. Uma bomba do tipo helicoidal foi

utilizada para alimentar a suspensão no hidrociclone. Para medir a queda de pressão, foi utilizado um manômetro de *Bourdon* digital, instalado na linha de alimentação do hidrociclone, cujo limite superior era de 700 kPa. As condições de queda de pressão utilizadas nos ensaios experimentais foram as mesmas de Vieira (2006): 88, 118, 147 e 177 kPa. Assim como a concentração volumétrica do material particulado, que foi mantida em aproximadamente 1%.

Todas as vazões volumétricas e as concentrações mássicas das correntes foram obtidas através de técnicas gravimétricas a partir de amostras devidamente coletadas e secas em estufa. A variável de interesse deste trabalho, o número de Euler (Eu), foi calculada a partir das vazões e concentrações das correntes, por procedimentos clássicos da literatura (MASSARANI, 1989 e SVAROVSKY, 1984). As Equações 2 e 3 mostram como o adimensional de Euler foi obtido.

$$u_c = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_c^2} \quad (2)$$

$$Eu = \frac{(-\Delta P)}{\frac{\rho \cdot u_c^2}{2}} \quad (3)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os principais resultados experimentais, a filtração aplicada simultaneamente à separação centrífuga diminuiu o número de Euler do hidrociclone convencional (HCon). Os dados experimentais de vazão de alimentação, necessários para cálculo do adimensional de Euler, encontram-se na Tabela III, enquanto os respectivos números de Euler são apresentados na Tabela IV.

Tabela III. Dados experimentais de vazão de alimentação para os hidrociclones.

HCon		HCoF	HCiF	HCiCoF
$-\Delta P$ [kPa]	$Q \cdot 10^{-6}$ [m³/s]	$Q \cdot 10^{-6}$ [m³/s]	$Q \cdot 10^{-6}$ [m³/s]	$Q \cdot 10^{-6}$ [m³/s]
88	256	283	296	251
118	289	316	330	280
147	310	341	352	309
177	335	368	373	339

Tanto na modalidade do hidrociclone HCoF quanto na do HCiF, a presença da filtração fez com que tais equipamentos apresentassem decréscimos no número de Euler quando comparados ao equipamento convencional (HCon). Em comparação a este último equipamento, houve um decréscimo médio no número de Euler em torno de 17% para o hidrociclone HCoF. Já para o hidrociclone HCiF, a filtração acarretou uma diminuição média de aproximadamente 22% em relação ao equipamento convencional.

Entre os equipamentos filtrantes, o número de Euler do separador HCiF foi, em média, cerca de 6% menor do que aquele apresentado pelo HCoF. Em se tratando do hidrociclone totalmente filtrante (HCiCoF), a filtração simultaneamente pelas partes cônica e cilíndrica pouco alterou o consumo energético deste equipamento. A diferença média do adimensional de Euler do HCiCoF foi de aproximadamente 3% maior do que o hidrociclone HCon.

Tabela IV. Comparativo de desempenho energético entre os hidrociclones.

HCon		HCoF		HCiF		HCiCoF	
$-\Delta P$ [kPa]	Eu [-]	Eu [-]	Diferença HCon [%]	Eu [-]	Diferença HCon [%]	Eu [-]	Diferença HCon [%]
88	1317	1105	-16,1%	1012	-23,2%	1404	6,6%
118	1408	1178	-16,3%	1086	-22,9%	1502	6,7%
147	1533	1266	-17,4%	1190	-22,4%	1548	1,0%
177	1573	1310	-16,7%	1271	-19,2%	1542	-2,0%
Média	1458	1215	-16,7%	1140	-21,8%	1499	2,8%

De acordo com os resultados experimentais anteriores, verificou-se que não somente a filtração foi capaz de influenciar o desempenho energético do hidrociclone convencional (HCon) como também a localização na qual ocorria a retirada do filtrado. Acredita-se que a retirada de filtrado se feita isolada ou simultaneamente, pode alterar especificamente a fluidodinâmica de cada separador. Dentre os hidrociclones estudados, o hidrociclone HCiF foi aquele que se mostrou mais viável tecnicamente, haja vista apresentar as maiores capacidades de processamento de suspensão aquosa em um menor custo energético. Acredita-se que no caso do hidrociclone HCiCoF, que apresentou os piores resultados dentre as três modalidades filtrantes, a presença de diferentes permeabilidades em seu cone e cilindro pode ter perturbado drasticamente a fluidodinâmica do separador, bem como mudado a transferência de fluido entre seus vórtices (interno e externo).

4. CONCLUSÕES

De acordo com as principais informações experimentais levantadas neste trabalho foi possível constatar que a filtração é uma operação unitária que influenciou o desempenho energético de um hidrociclone de geometria convencional. Verificou-se que a filtração quando aplicada isoladamente à região cônica ou cilíndrica do hidrociclone foi capaz de reduzir o consumo energético das modalidades filtrantes em 17 e 22%, respectivamente, nas mesmas condições operacionais do hidrociclone HCon. Por sua vez, a utilização conjunta de cone e cilindro poroso praticamente não trouxe benefícios energéticos para o hidrociclone, inclusive, apresentando um acréscimo nesta grandeza de aproximadamente 2% em relação ao equipamento convencional. Dentre os separadores, o hidrociclone filtrante do tipo HCiF seria o separador mais indicado no quesito "energia", pois apresenta as maiores capacidades de tratamento e, conseqüentemente, os menores custos energéticos (menores Números de Euler).

5. NOMENCLATURA

- $d_{63,2}$ – parâmetro do modelo RRB [L]
- d_p – diâmetro volumétrico da partícula [L]
- D_c – diâmetro da seção cilíndrica do hidrociclone [L]
- D_i – diâmetro do duto de alimentação [L]
- D_o – diâmetro do orifício de *overflow* [L]
- D_u – diâmetro do orifício de *underflow* [L]
- Eu – número de Euler [-]
- H11 – geometria otimizada por Vieira (2006) [-]
- k – permeabilidade do meio filtrante [L²]
- l – comprimento do *vortex finder* [L]

L – comprimento total do hidrociclone [L]
L₁ – comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone [L]
n – parâmetro do modelo RRB [-]
Q – vazão volumétrica de suspensão na corrente de alimentação [L³T⁻¹]
u_c – velocidade da suspensão com base na seção reta cilíndrica do hidrociclone [LT⁻¹]
X – fração mássica de partículas na alimentação cujo diâmetro é igual ou inferior a d_p [-]
ε – porosidade do meio filtrante [-]
-ΔP – queda de pressão no hidrociclone [ML⁻¹T⁻²]
ρ – densidade do líquido [ML⁻³]
θ – ângulo de abertura da parte cônica do hidrociclone [°]

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Evento Científico ou Tecnológico (PCE-00019-13), bem como ao CNPq pelo apoio financeiro para concepção e execução deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

- BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R.; SILVA, C. A. J.; VIEIRA, L. G. M. A Study of the Fluid Dynamics Behavior of Filtering Hydrocyclone. *Separation and Filtration Technology*, v. 28, p. 282-287, 2007.
- FAÇANHA, J. M. F. Incorporação de um Cilindro Filtrante na Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 85 p., 2012.
- MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. In: *Anais do XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos*, São Carlos. [S.l.: s.n.], p. 125–136, 1989.
- SOUZA, F. J. S.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Analysis of the Influence of the Filtering Medium on the Behaviour of the Filtering Hydrocyclone. *Powder Technology*, v. 107, p. 259-267, 2000.
- SVAROVSKY, L. *Hydrocyclone*, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, 198p, 1984.
- VIEIRA, L. G. M. Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 297 p., 2006.