

## **Avaliação da razão de líquido e do diâmetro de corte de um hidrociclone concentrador de baixo gasto energético**

### **Evaluation of liquid ratio and cutting diameter of a concentrator hydrocyclone with low energy expenditure**

DOI:10.34115/basrv6n1-012

Recebimento dos originais: 13/01/2022

Aceitação para publicação: 10/02/2022

#### **Suélen Mara Gonçalves**

Doutora em Engenharia Química - Departamento de Química  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - Campus I - Belo Horizonte-MG  
E-mail: suelengoncalves@cefetmg.br

#### **Yanne Novais Kyriakidis**

Doutora em Engenharia Química - Faculdade de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Uberlândia-MG  
Av João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Campus Santa Mônica - Uberlândia-MG  
E-mail: yanne@ufu.br

#### **Fernanda Falqueto Salvador**

Doutora em Engenharia Química - Departamento de Engenharia Rural  
Universidade Federal do Espírito Santo - ES  
Alto Universitário, S/N - Guararema - Alegre-ES  
E-mail: Fernanda.salvador@ufes.br

#### **Marcos Antonio de Souza Barrozo**

Doutor em Engenharia Química - Instituição: Faculdade de Engenharia Química  
Universidade Federal de Uberlândia - MG  
Av João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Campus Santa Mônica - Uberlândia-MG  
E-mail: masbarrozo@ufu.br

#### **Luiz Gustavo Martins Vieira**

Doutor em Engenharia Química - Faculdade de Engenharia Química  
Universidade Federal de Uberlândia - MG  
Av João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Campus Santa Mônica - Uberlândia-MG  
E-mail: luizgustavo@ufu.br

#### **RESUMO**

Hidrociclones são equipamentos que utilizam a força centrífuga para separação e classificação de partículas. A classificação e o espessamento de suspensões são importantes para diversos setores industriais, como o mineral onde a presença de finos e o excesso de água desfavorecem a produção. Uma nova geometria otimizada para minimização de gastos energéticos apresentou resultados interessantes quanto ao aumento pronunciado da concentração da suspensão. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a separação e a classificação de partículas no Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) através de testes experimentais conduzidos com suspensão aquosa de quartzito a 10,0%v. As respostas razão de líquido, diâmetro de corte e número de

Euler foram avaliadas para diferentes diâmetros de underflow. Para o diâmetro de underflow de 5 mm e queda de pressão de 1,47bar, foram alcançados valores de diâmetro de corte de aproximadamente 17,5 $\mu$ m, razão de líquido de cerca de 6,7% e número de Euler de 796.

**Palavras-chave:** hidrociclonagem, Euler, concentração, deslamagem.

## ABSTRACT

Hydrocyclones are equipments that use centrifugal force to separate and classify particles. The classification and thickening of suspensions are important for several industrial sectors, such as the mineral one, where the presence of fines and the excess of water disfavor the production. A new geometry optimized to minimize energy expenditure presented interesting results regarding the pronounced increase of the suspension concentration. Thus, the objective of this work was to evaluate the particle separation and classification in the Optimized Concentrating Hydrocyclone (OCH) through experimental tests conducted with quartzite aqueous suspension at 10.0% v. The liquid ratio, cut-off diameter and Euler number responses were evaluated for different underflow diameters. For the underflow diameter of 5 mm and pressure drop of 1.47bar, cutting diameter values of approximately 17.5 $\mu$ m, liquid ratio of about 6.7%, and Euler number of 796 were achieved.

**Keywords:** hydrocycloning, Euler, concentration, de-laminating.

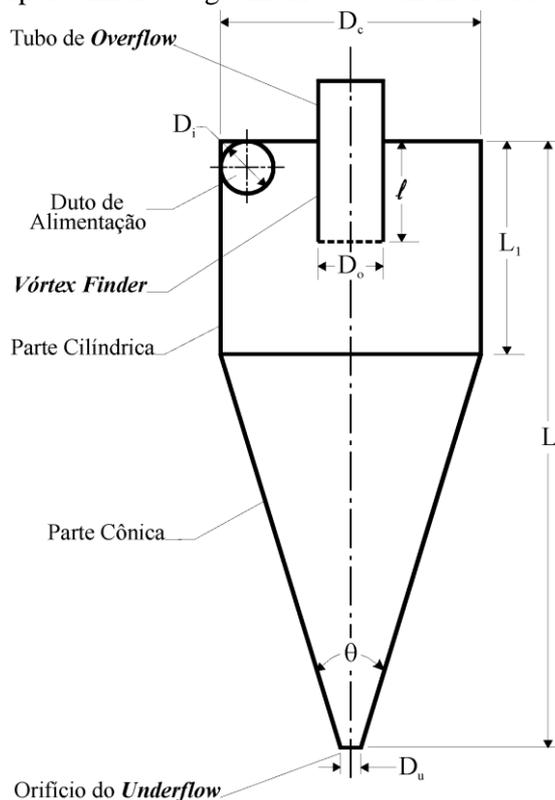
## 1 INTRODUÇÃO

Hidrociclones são equipamentos cônico-cilíndricos utilizados na separação de uma fase dispersa de uma fase contínua. Estes separadores são comumente utilizados na separação sólido-líquido ou líquido-líquido, na qual a diferença de densidade entre as fases é mais acentuada, visto que seu mecanismo de separação tem como princípio o campo centrífugo gerado pela alimentação tangencial ao equipamento e sob pressão (Cavalcante et al., 2019).

Os hidrociclones podem ser empregados com o intuito de classificar partículas ou de concentrar uma das correntes efluentes do equipamento. Como não possuem partes móveis, eles se tornam uma alternativa economicamente mais viável do que as centrífugas industriais e sedimentadores (Pereira e Góis, 2020). Assim, versáteis e de baixo custo de instalação e manutenção, este tipo de equipamento pode ser encontrado nas mais diversas atividades industriais, como na indústria têxtil, alimentícia, farmacêutica, mineradora (Cunha et al., 2021).

Dada a sua importância no contexto industrial, a pesquisa acerca destes separadores tem especial relevância, visto que são equipamentos extremamente sensíveis às mudanças nas suas relações geométricas, isto é, respostas do processo tais como a concentração das correntes, a classificação, o gasto energético, dentre outras, estão intimamente relacionadas às dimensões do equipamento. A Figura 1 mostra o esquema de um hidrociclone convencional.

Figura 1 – Principais dimensões geométricas de um hidrociclone (Vieira, 2006)



Neste contexto, Silva (2014) estudou a otimização geométrica de hidrociclones não convencionais que possuíam troncos de cone porosos, a partir de resultados de ensaios experimentais conduzidos com suspensão diluída a 1,0%v. previamente realizados na FEQUI/UFU, instituição que sempre se mostrou vocacionada aos estudos de hidrociclonagem (Vieira, 2006; Almeida, 2008; Silva, 2012; Salvador, 2013; Silva 2014; Kyriakidis, 2014).

Silva (2014) utilizou técnicas de Superfícies de Respostas aliadas ao Algoritmo de Evolução Diferencial para definir uma geometria ótima de hidrociclone filtrante que proporcionasse uma maior capacidade de processamento, ou seja um menor gasto energético, a um nível aceitável de eficiência de separação. Foram avaliadas as variáveis geométricas  $D_i/D_c$ ,  $D_o/D_c$ ,  $L/D_c$  e  $\theta$ . A essa geometria otimizada foi atribuído o nome de HFOT3, correspondente ao terceiro caso de otimização realizado por Silva (2014).

O hidrociclone HFOT3 foi concebido aliando-se o fenômeno da filtração ao processo de hidrociclonagem. Entretanto, a configuração não-filtrante (com peças maciças e não porosas) e o uso de alimentação com concentração acima de 1,0%v. não foram objeto de estudo no trabalho desenvolvido por Silva (2014). Sabe-se que é preferível trabalhar com suspensões diluídas para se alcançar maior eficiência de separação (Svarovsky, 2000), entretanto nem sempre é aconselhável diluir a suspensão a ser separada em virtude do aumento da quantidade

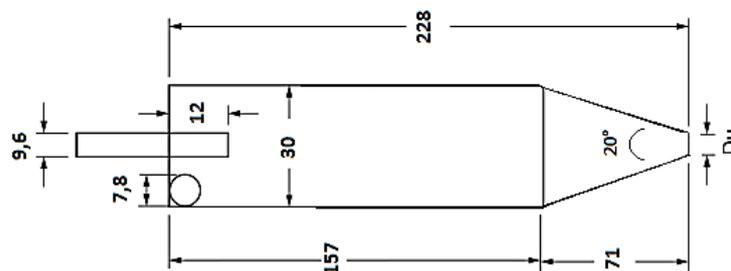
de água adicionada ao processo e por consequência da quantidade de rejeitos gerados.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a geometria HFOT3 desacoplando o efeito da filtração ao processo, ou seja, empregando-se peças com paredes totalmente impermeáveis, e ainda utilizando alimentação com 10,0% v. de sólidos suspensos. Assim, o objetivo principal foi avaliar, a partir de alimentação não diluída, os efeitos da variação do diâmetro do duto de underflow ( $D_U$ ) nas respostas razão de líquido ( $R_L$ ), diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e número de Euler ( $Eu$ ) no novo hidrociclone obtido, o qual foi chamado de Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As dimensões ótimas encontradas por Silva (2014) para a minimização do gasto energético no processo de hidrociclonagem são apresentadas na Figura 2. Essas dimensões correspondem tanto à geometria do hidrociclone HFOT3 quanto à geometria do hidrociclone HCO, o qual foi objeto de estudo deste trabalho. Já para o duto de underflow ( $D_U$ ), seu diâmetro foi variável, podendo assumir os valores de 3, 4 ou 5 mm.

Figura 2 – Dimensões geométricas do hidrociclone HCO dadas em milímetros

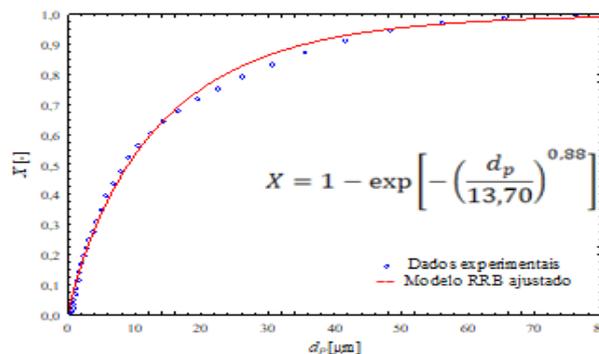


O material particulado empregado nos experimentos era formado predominantemente de óxido de silício, material resistente à abrasão, cuja densidade real foi aferida em picnômetro a gás Hélio e seu valor corresponde a 2,69 g/cm<sup>3</sup>. Sua distribuição granulométrica foi determinada por meio de técnicas de difração de raios laser e foi ajustada ao modelo RRB (Rossin-Rammler-Bennet) com coeficiente de determinação igual a 0,99. A distribuição granulométrica e o modelo ajustado encontram-se na Figura 3.

A unidade experimental utilizada encontra-se devidamente instalada no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER-FEQUI/UFU). Esta era provida de um tanque para armazenamento da suspensão de material particulado concentrada a 10% (v/v), bem como de chicanas e um agitador mecânico acoplado a um motor cuja função era homogeneizar a

suspensão. Uma bomba centrífuga foi empregada para alimentar a suspensão no hidrociclone, ao passo que para aferir a queda de pressão foi utilizado um manômetro de Bourdon digital, instalado na linha de alimentação do hidrociclone, e para determinar a vazão de alimentação foi empregado um medidor de vazão do tipo Coriolis imediatamente antes do hidrociclone, na linha de alimentação.

Figura 3 – Distribuição granulométrica do material particulado



Na metodologia empregada, primeiramente era fixada a queda de pressão e então as vazões volumétricas de alimentação e as concentrações mássicas das correntes eram obtidas através de técnicas gravimétricas, sendo que as concentrações eram aferidas a partir de amostras devidamente coletadas, pesadas em balança semi-analítica e secas em estufa por 24h. Além dessas amostras, também eram coletadas alíquotas da suspensão de alimentação e da corrente de underflow a fim de estimar a distribuição granulométrica das duas correntes. Este procedimento foi realizado para as quedas de pressão de 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar.

Assim, as respostas razão de líquido ( $R_L$ ) e diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e número de Euler ( $Eu$ ) puderam ser calculadas por meio de procedimentos clássicos da literatura (Massarani, 1989; Svarovsky, 1984; Svarovsky, 2000), como mostram as Equações 1, 2 e 3.

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{VU})}{Q(1 - C_{VA})} \quad (1)$$

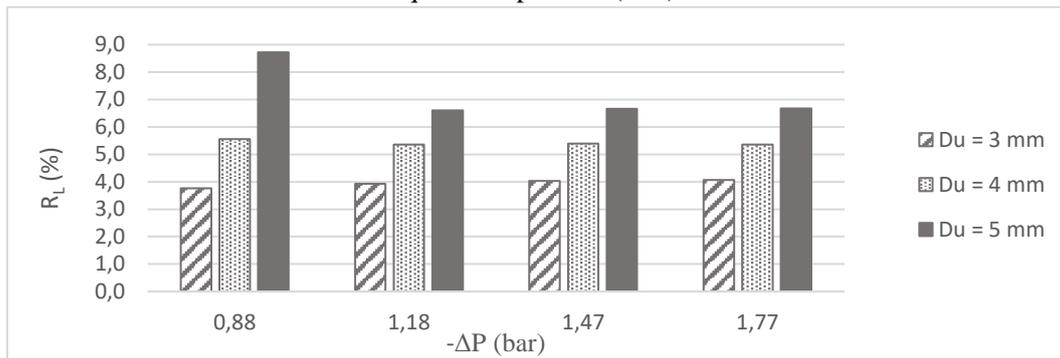
$$0,5 = \eta \left\{ \frac{\left(\frac{d_{50}}{d_{63,2U}}\right)^{n_U} n_U \exp\left[-\left(\frac{d_{50}}{d_{63,2U}}\right)^{n_U}\right]}{\left(\frac{d_{50}}{d_{63,2A}}\right)^{n_A} n_A \exp\left[-\left(\frac{d_{50}}{d_{63,2A}}\right)^{n_A}\right]} \right\} \quad (2)$$

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho}{2} \left(\frac{4Q}{\pi D C^2}\right)^2} \quad (3)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A razão de líquido ( $R_L$ ) está diretamente relacionada ao poder de espessamento dos hidrociclones, portanto quanto menor seu valor, mais concentrada será a corrente de underflow. A Figura 1 ilustra a resposta razão de líquido ( $R_L$ ) obtida para o hidrociclone HCO nas quatro quedas de pressão experimentadas. Os resultados para os diferentes diâmetros de underflow de 3, 4 e 5 mm estão representados pelos padrões diagonal, pontilhado e sólido, respectivamente.

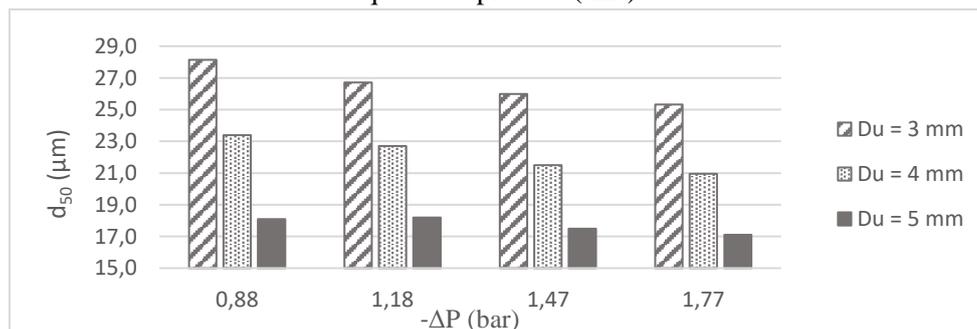
Figura 4 – Razão de Líquido ( $R_L$ ) do hidrociclone HCO para diferentes diâmetros de *underflow* ( $D_U$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ )



Pode-se observar através da Figura 1 que a razão de líquido média do HCO foi de aproximadamente 3,9; 5,4 e 7,2% para os diâmetros de underflow de 3, 4 e 5 mm, respectivamente. Tais resultados revelam o poder de espessamento do HCO. Verificou-se que, para todas quedas de pressão, quanto menor o diâmetro de underflow menor a razão de líquido observada já que maior é a restrição ao escoamento.

Para avaliar o poder de coleta de partículas do HCO frente a alterações no diâmetro de underflow tem-se a resposta diâmetro de corte ( $d_{50}$ ), representada pela Figura 2. O diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) é o diâmetro da partícula ( $d_p$ ) que é coletada com eficiência granulométrica ( $G$ ) de 50% (Vieira, 2006), ou seja, representa o poder de classificação do equipamento.

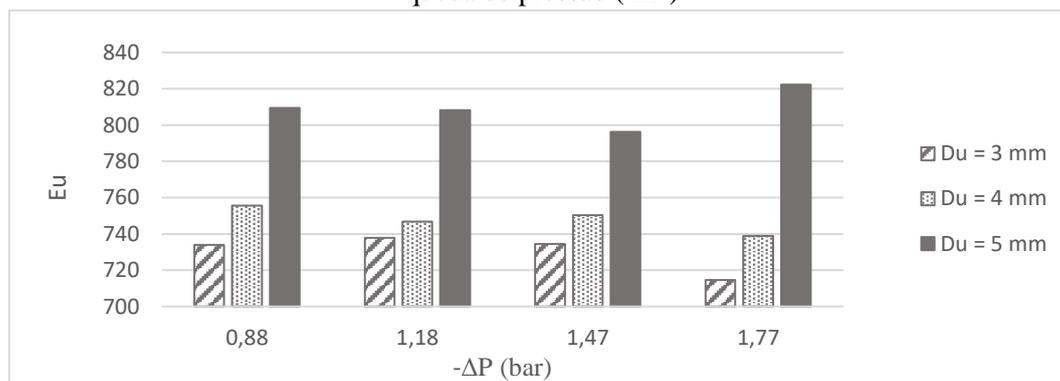
Figura 5 – Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) do hidrociclone HCO para diferentes diâmetros de *underflow* ( $D_U$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ )



Com base nos resultados expressos na Figura 2, pode-se observar que o diâmetro de corte mínimo ocorreu na condição de  $D_U = 5$  mm e  $-\Delta P = 1,77$  bar, portanto nesta condição, certamente partículas maiores que  $17,1$   $\mu\text{m}$  serão coletadas com eficiência granulométrica maior que 50%. Quanto maior o orifício de underflow menor foi o diâmetro de corte obtido pois uma maior quantidade de partículas finas pôde ser coletada na corrente de underflow.

Sabe-se que o número de Euler ( $Eu$ ) avalia a capacidade de operação de um hidrociclone, ou seja, o consumo energético do equipamento através da razão entre a queda de pressão e a energia cinética por unidade de volume na parte cilíndrica (SILVA, 2012). A Figura 3 mostra a resposta número de Euler do equipamento HCO frente modificações no diâmetro de underflow e condições operacionais de queda de pressão.

Figura 6 – Número de Euler ( $Eu$ ) do hidrociclone HCO para diferentes diâmetros de *underflow* ( $D_U$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ )



Através da Figura 3 nota-se que o número de Euler para o hidrociclone HCO esteve entre 715 e 822. Quanto menor o valor do número de Euler, menor é a perda de carga para uma mesma vazão, o que leva a um menor consumo energético (SILVA, 2012). Foi possível verificar que para o HCO o aumento da restrição ao escoamento da corrente de *underflow*, através do uso de menor  $D_U$ , diminuiu o consumo energético. Era esperado que a restrição ao escoamento aumentasse a perda de carga do equipamento, entretanto o oposto foi observado. Este comportamento distinto está associado a geometria característica do equipamento HCO que foi previamente otimizado para minimização do número de Euler.

Independente da condição operacional, os valores da resposta número de Euler do HCO são baixos comparados a outros equipamentos. Por exemplo, a família de hidrociclones Rietema possui número de Euler de 1200 e é conhecida por apresentar baixo gasto energético (Vieira, 2006). Todavia, o número de Euler médio do HCO ( $Eu = 762$ ) foi cerca de 36% menor que o resultado da tradicional família Rietema, o que confirma sua característica otimizada de baixo

gasto energético.

#### 4 CONCLUSÃO

Através do estudo experimental proposto, pôde-se concluir que o Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO), operando com suspensão a 10,0% em volume de sólidos, independente do diâmetro de *underflow* ou queda de pressão aplicada, apresentou baixa razão de líquido, entre 3,8 e 8,7%, e baixo número de Euler, entre 713 e 822.

Portanto, para o hidrociclone HCO pode-se eleger a condição ótima para maximização da coleta de finos como sendo a operação à 1,77 bar e diâmetro de *underflow* de 5 mm. Nesta condição o diâmetro de corte alcançado foi de 17,1  $\mu\text{m}$ , número de Euler de 822 e razão de líquido de 6,7%, ou seja, mesmo trabalhando com suspensão não diluída, foi possível aliar à alta eficiência de coleta ao baixo consumo energético e elevada capacidade de espessamento no hidrociclone HCO.

#### 5 NOMENCLATURA

$C_{VA}$  - Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação,  $[\text{M}^0\text{L}^0\text{T}^0]$

$C_{VU}$  - Concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow*,  $[\text{M}^0\text{L}^0\text{T}^0]$

$Eu$  - Número de Euler,  $[\text{M}^0\text{L}^0\text{T}^0]$

$d_{50}$  - Diâmetro de Corte,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$d_{63,2A}$  - Parâmetro do modelo RRB para a corrente de alimentação,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$d_{63,2U}$  - Parâmetro do modelo RRB para a corrente de *underflow*,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$D_C$  - Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$D_i$  - Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$D_O$  - Diâmetro do duto de *overflow* do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$d_P$  - Diâmetro da partícula,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$D_U$  - Diâmetro do duto de *underflow* do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$G$  - Eficiência Granulométrica,  $[\text{M}^0\text{L}^0\text{T}^0]$

$L$  - Comprimento total do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$L_1$  - Comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$\ell$  - Comprimento do *vortex finder*,  $[\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^0]$

$n_A$  - Parâmetro do modelo RRB para a corrente de alimentação,  $[\text{M}^0\text{L}^0\text{T}^0]$

$n_U$  - Parâmetro do modelo RRB para a corrente de *underflow*,  $[\text{M}^0\text{L}^0\text{T}^0]$

$Q$  - Vazão volumétrica da alimentação do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^3\text{T}^{-1}]$

$Q_U$  - Vazão volumétrica da corrente de *underflow* do hidrociclone,  $[\text{M}^0\text{L}^3\text{T}^{-1}]$

$R_L$  - Razão de líquido,  $[M^0L^0T^0]$

$X$  - Fração mássica cumulativa,  $[M^0L^0T^0]$

$\rho$  – Densidade do fluido de trabalho,  $[M^1L^{-3}T^0]$

$\theta$  - Ângulo da parte cônica do hidrociclone,  $[^\circ]$

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG (EV/PCE/00068-16) pelo apoio financeiro durante a realização do trabalho e ao Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da FEQUI/UFU.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. A. K. Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 2008.

CAVALCANTE, I. R. M.; STORTI, F. C.; COSTA FILHO, J. A.; NOLETO, L. G. Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone via CFD. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 5, n. 9, p. 15362-15378, sep. 2019. DOI:10.34117/bjdv5n9-122

CUNHA, M. V.; ALVES, J. V. S.; OLIVEIRA, M. S. Avaliação da deslamagem de minério fosfático utilizando diferentes geometrias de hidrociclone. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 30314-30330, mar. 2021.

KYRIAKIDIS, Y. N. Análise do Efeito de Variáveis Geométricas sobre o Desempenho de Hidrociclones Otimizados. 2014. 148f. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia, MG, 2014.

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.], 1989. p. 125-136.

PEREIRA, E. F. S.; GÓIS, L. M. N.; Avaliação de um tanque de decantação de sólidos utilizando fluidodinâmica computacional. *Braz. Ap. Sci. Rev.* Curitiba, v. 4, n. 3, p.1183-1191 mai./jun.2020.

SALVADOR, F. F. Estudo Experimental do Comportamento de um Hidrociclone com Cone e Cilindro Filtrantes. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, MG, 2013.

SILVA, D. O. Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2012.

SILVA, N. K. G. Estudo de Otimização da Configuração do Hidrociclone Filtrante. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado) UFU, Uberlândia, MG, 2014.

SVAROVSKY, L. *Hydrocyclone*, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK, 1984. 198p.

SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. 4th Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.

VIEIRA, L. G. M. Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes. 2006. 297 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, MG, 2006.