

## INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS NA ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE CONCENTRADOR OTIMIZADO

S. M. GONÇALVES<sup>1\*</sup>, F. F. SALVADOR<sup>1</sup>, L. G. M. VIEIRA<sup>1</sup>, M. A. S. BARROZO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

\*e-mail: sugoncalves.m@gmail.com

### RESUMO

Pertencentes a classe de equipamentos destinados a separação de particulados, os hidrociclones são separadores de grande uso industrial devido sua versatilidade e simplicidade operacional. Quanto ao seu caráter, podem classificar partículas ou concentrar correntes, e ainda quanto a geometria, apresentar parede porosa ou impermeável. Uma família de equipamentos concentradores, desenvolvida para aumentar a capacidade operacional apresentou também altas eficiências. O desempenho do Hidrociclone Concentrador Otimizado foi estudado mediante a variação do diâmetro de *underflow* e da concentração mássica da alimentação para diferentes quedas de pressão. Foram comparadas as respostas relacionadas a hidrociclonagem como número de Euler, eficiência total, razão de líquido e concentração volumétrica de sólidos no *underflow* para os fatores estudados. Resultados experimentais comprovam a eficiência em concentrar correntes de maneira econômica. Para o menor diâmetro de *underflow* estudado em concentração diluída, a razão de líquido é de cerca de 0,7%, o número de Euler aproximadamente de 853 e poder de concentração de 40 vezes a concentração inicial. Além disso, a equação de projeto segundo Massarani foi devidamente escrita para o Hidrociclone Concentrador Otimizado, confirmando seu poder concentrador.

### 1 INTRODUÇÃO

A demanda por processos mais eficientes e de baixo gasto energético tem impulsionado diversos estudos na confecção de novos equipamentos e na otimização operacional dos mesmos na indústria.

Em relação aos equipamentos destinados a separação de suspensões sólido-líquido, os hidrociclones se destacam por sua simplicidade, baixo custo e por sua facilidade de operação e manutenção. Além disso são versáteis, dependendo do objetivo de aplicação, podem ser utilizados tanto na clarificação do líquido, no espessamento de correntes, como na classificação de partículas. (SVAROVSKY, 2000)

Utilizados em diversas indústrias como as do setor alimentício, de processamento mineral e petroquímico, os hidrociclones tem como base de seu funcionamento a formação de um campo centrífugo em seu interior. A alimentação, dotada de energia cinética, adquire um movimento espiral descendente, de forma que, as partículas maiores são arrastadas para a parede e coletadas no orifício de *underflow*. As partículas menores formam um movimento ascendente, contrário ao anterior, e são descarregadas no orifício de *overflow*.

A concepção de uma geometria não-convencional, constituída de parede porosa, foi objeto de patente pelo Departamento de Engenharia Química da UFU em 1991. Diversas pesquisas posteriores foram

conduzidas com o Hidrociclone Filtrante. Vieira (2006) estudou a modalidade cônico-filtrante e concluiu que, a geometria do equipamento deve ser escolhida a depender da demanda industrial.

Silva (2014) desenvolveu, através de técnicas de Superfície de Resposta e um algoritmo de Evolução Diferencial, três geometrias a partir de objetivos diferentes de otimização. Uma das configurações, além de ir de encontro ao objetivo inicial de minimização de gastos energéticos, também apresentou baixa resposta de razão de líquido. A alta capacidade de processamento, acoplada ao poder de concentração deste hidrociclone, despertou o interesse do presente estudo.

Com o intuito de melhorar o desempenho desta geometria desenvolvida por Silva (2014), foram feitas alterações no diâmetro de *underflow* e na concentração mássica da corrente de alimentação em ensaios experimentais em diferentes quedas de pressão. Além disso, a parte cônica porosa do equipamento original foi trocada por uma impermeável, para que os efeitos inerentes a filtração não influenciassem a modelagem da Equação de Projeto de Massarani (1989).

Deste modo, foram estudadas as respostas doravante especificadas: número de Euler, eficiência total, razão de líquido, concentração mássica do *underflow* e diâmetro de corte reduzido para o Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) em sua configuração convencional.

### 1.1 Número de Euler

A capacidade de processamento de um hidrociclone pode ser quantificada através do cálculo do adimensional de Euler. É a relação entre a queda de pressão pela energia cinética por unidade de volume na parte cilíndrica como mostrado na Equação (1).

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho}{2} \left( \frac{4Q}{\pi D_C^2} \right)^2} \quad (1)$$

### 1.2 Eficiência Total

O percentual mássico de sólidos coletados no *underflow* frente a quantidade alimentada representa a eficiência total do hidrociclone. Conforme a Equação (2), é necessário conhecer as vazões mássicas das correntes de alimentação ( $W_A$ ) e *underflow* ( $W_U$ ), e suas respectivas concentrações mássicas para seu cálculo.

$$\eta = \frac{C_{WU} W_U}{C_{WA} W_A} \quad (2)$$

### 1.3 Razão de Líquido

Uma das formas de avaliar o aumento do percentual mássico da corrente alimentada é através da resposta razão de líquido. Esta relaciona a quantidade de líquido inicialmente alimentada pela fração coletada no duto de *underflow*. Conforme a Equação (3), o cálculo da razão de líquido depende das vazões volumétricas das correntes de alimentação ( $Q_A$ ) e *underflow* ( $Q_U$ ) com suas respectivas concentrações volumétricas.

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

Para o cálculo das concentrações volumétricas das correntes, tem-se a Equação (4), onde  $i$  representa uma corrente genérica (alimentação, *underflow* ou *overflow*).

$$C_{Vi} = \frac{1}{\left[ \frac{\rho_s}{\rho} \left( \frac{1}{C_{Wi}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (4)$$

### 1.4 Diâmetro de Corte

Em relação ao poder de classificação de um hidrociclone, tem-se o diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) que é o diâmetro da partícula ( $d_p$ ) coletada com eficiência granulométrica ( $G$ ) de 50% (Vieira, 2006). Logo partículas maiores que o diâmetro de corte terão maior probabilidade de serem coletadas com eficiência granulométrica maior que 50%.

Enquanto isso, o diâmetro de corte reduzido ( $d_{50}'$ ) considera apenas a atuação da força centrífuga na separação de partículas. É o diâmetro da partícula que é coletada com eficiência reduzida ( $G'$ ) de 50%. Pode ser estimado através da substituição, na Equação (5), de um modelo de distribuição granulométrica ( $X_U = f(d_P)$ ) e eficiência granulométrica reduzida ( $G'$ ) igual a 0,5.

$$G' = \frac{\eta \frac{dX_U}{dX} - R_L}{1 - R_L} \quad (5)$$

### 1.5 Equação de Projeto

Segundo a metodologia de Massarani (1989), pode-se estimar o diâmetro de corte reduzido a partir de estudos experimentais incorporando efeitos de concentração de sólidos e razão de líquido. Como mostrado nas Equações (6) e (7), dados experimentais de diâmetro de corte reduzido, razão de líquido e concentração volumétrica de sólidos na alimentação são usados para a determinação dos parâmetros A, B, C D e K da Equação de Projeto desta família de hidrociclones.

$$\frac{d'_{50}}{D_C} = K \left( \frac{\mu D_C}{Q(\rho_S - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{(1 + AR_L)} \exp(DC_{VA}) \quad (6)$$

$$R_L = B \left( \frac{D_U}{D_C} \right)^C \quad (7)$$

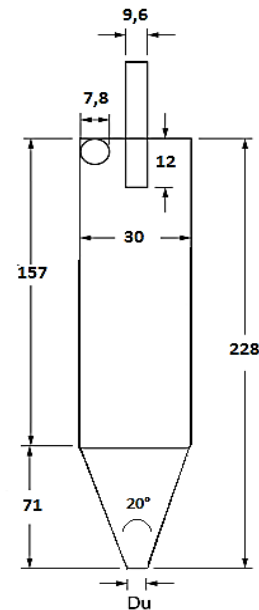
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Unidade Experimental

A unidade experimental encontra-se no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da Faculdade de Engenharia Química da UFU, dotada dos principais acessórios para reproduzir as mesmas condições industriais durante a hidrocyclonagem (reservatório, agitador mecânico, bomba centrífuga, *flowmeter*, manômetro digital etc.).

A Figura (1) mostra as dimensões geométricas do Hidrociclone Concentrador Otimizado (HCO) em milímetros.

**Figura 1** – Dimensões geométricas do Hidrociclone Concentrador Otimizado em milímetros



Fonte: Autor (2015).

### 2.2 Material Utilizado

O material particulado utilizado, quartzito, é composto predominantemente por silício ( $\text{SiO}_2$ ). Este material foi cedido pela ANEX Mineração, sediada em Itabirito – MG. Apresenta densidade média de  $2,69 \text{ g/cm}^3$  e distribuição granulométrica regida pelo modelo RRB (*Rosin-Rammlet-Bennet*), com parâmetros  $d_{63,2} = 13,23 \text{ }\mu\text{m}$  e  $n = 0,88$ .

### 2.3 Procedimento Experimental

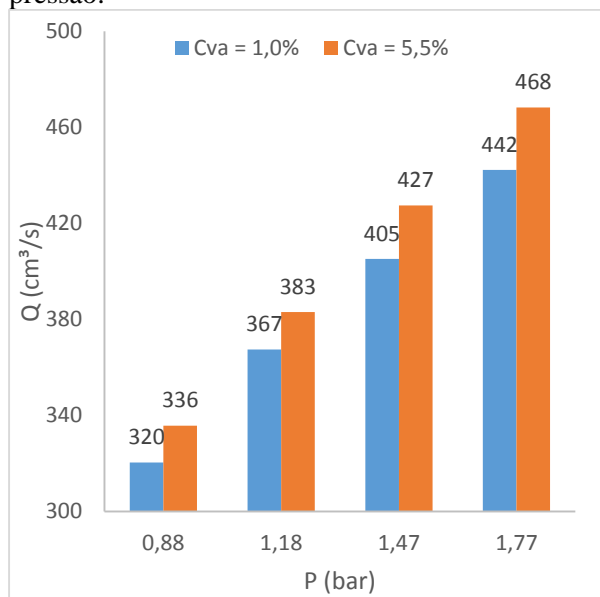
Na montagem do equipamento foram utilizadas as dimensões características descritas na Figura (1) combinadas com os diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm. Para cada configuração do hidrociclone (HCO) foram combinadas duas concentrações diferentes para a suspensão aquosa de quartzito, 1,0 e 5,5% em volume. Os testes foram realizados em quatro níveis de queda de pressão: 0,88; 1,18; 1,47 e 1,77 bar.

As concentrações mássicas das principais correntes do hidrociclone foram determinadas por técnicas de gravimetria. As distribuições granulométricas das principais correntes do hidrociclone foram determinadas por difração a *laser* no Mastersizer da Malvern. As vazões mássicas das principais correntes do hidrociclone foram determinadas pelo medidor eletromagnético do tipo Coriolis.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade de processamento de um hidrociclone é a vazão observada em uma dada queda de pressão. Os resultados experimentais para esta resposta estão ilustrados na Figura (2).

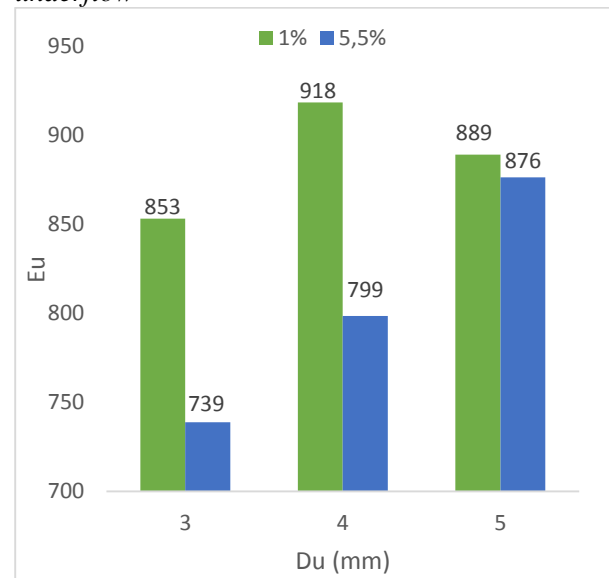
**Figura 2** – Vazão de alimentação em função da concentração alimentada e da queda de pressão.



Sabe-se que quanto maior a queda de pressão aplicada, maior é a vazão alimentada no hidrociclone. Para os ensaios conduzidos usando alimentação a 5,5% em volume, a capacidade de processamento foi cerca de 5,2% maior que nos casos utilizando concentração de 1,0% na alimentação.

Tomando como referência a média dos dados coletados em diferentes pressões para cada diâmetro de *underflow*, o gráfico representado na Figura (3) foi construído tendo como ordenada a resposta número de Euler e a abscissa os diâmetros estudados de 3,4 e 5 mm.

**Figura 3** – Número de Euler em função da concentração alimentada e do diâmetro de *underflow*

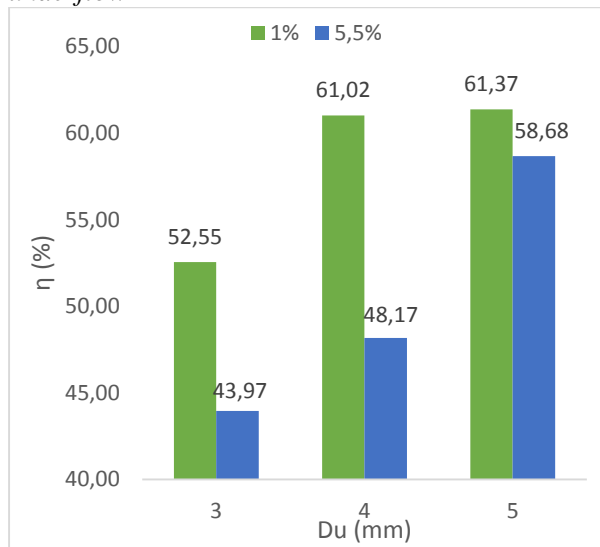


Pode-se observar valores menores para o número de Euler, em todas geometrias, quando a concentração da alimentação é de 5,5%v. Nesta condição operacional maior foi a capacidade de processamento e portanto menor gasto energético.

Era esperado maior número de Euler para o menor orifício de *underflow*, pois quanto maior a restrição ao escoamento, maior é o consumo de energia. Entretanto, um comportamento contrário ao previsto foi observado experimentalmente para o  $D_u = 3$  mm. Acredita-se que o número de Euler para o HCO não foi influenciado apenas pelo efeito isolado do diâmetro de *underflow*. Outras dimensões geométricas, como o comprimento do *vortex finder* ( $l = 12$  mm) e o comprimento da parte cilíndrica ( $L = 157$  mm) podem ser responsáveis por este efeito inesperado.

A Figura (4) representa a resposta Eficiência Total do HCO em função dos diferentes diâmetros de *underflow* usados, para as duas concentrações alimentadas.

**Figura 4** – Eficiência Total função da concentração alimentada e diâmetro de *underflow*

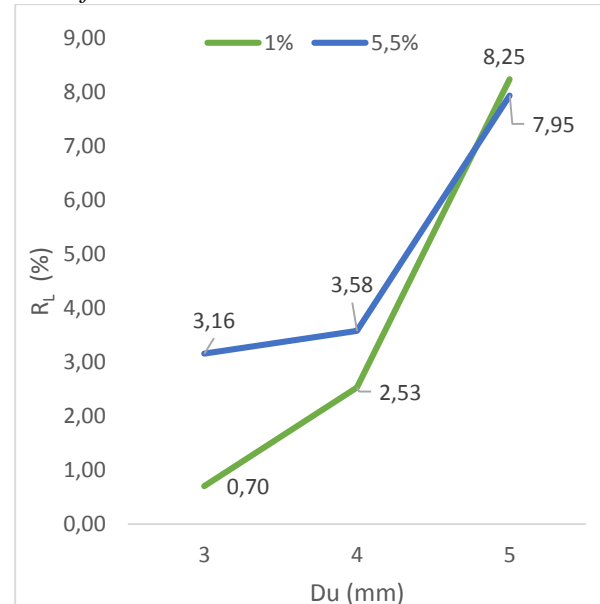


Houve um decréscimo na eficiência total do HCO quando a concentração da solução de quartzo alimentada passou de 1,0% para 5,5%. Este decréscimo se sobressai no menor orifício de *underflow*. Todavia, os valores observados, nas duas concentrações, utilizando  $D_U$  de 5 mm foram próximos, e representam bons valores para eficiência de hidrociclones destinados a concentração de correntes.

Ainda pode-se observar que a configuração de  $D_U$  de 4 mm, em solução diluída ( $C_{VA} = 1,0\%$ ), apresentou eficiência total muito próxima a configuração de  $D_U$  de 5 mm, mas desvantagem operacional em relação ao gasto energético ( $E_u = 918$ ).

A Razão de Líquido está relacionada a quantidade de material que é coletada na corrente de *underflow*, portanto é de suma importância para representar a capacidade de espessamento do hidrociclone. A Figura (5) mostra os resultados experimentais para esta resposta em função da concentração da alimentação e do diâmetro de *underflow*.

**Figura 5** – Razão de Líquido em função da concentração alimentada e diâmetro de *underflow*



Quanto maior é a área de escoamento maior é a quantidade de material que passa por ela, portanto como esperado, os valores de razão de líquido são crescentes com o aumento do diâmetro de *underflow*.

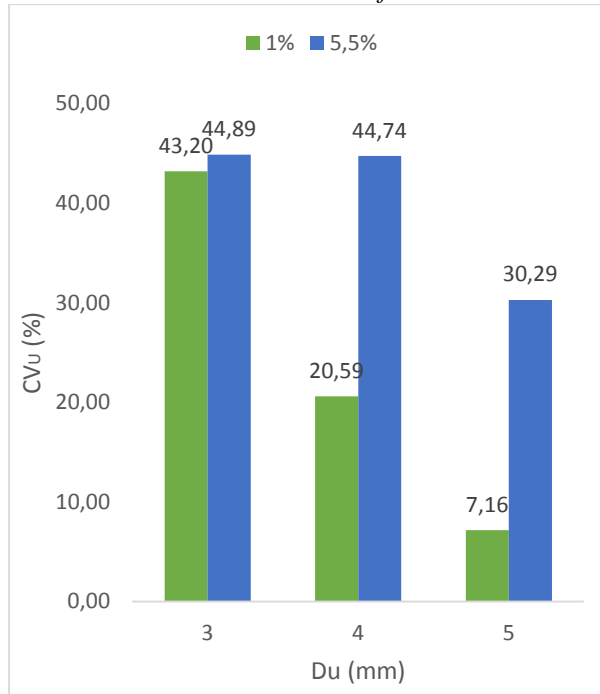
O menor valor para a razão de líquido, cerca de 0,7%, foi observado usando a alimentação diluída, a 1,0%v. e no menor diâmetro de *underflow*. Este comportamento pode ser justificado pelo alto valor do denominador da razão em consequência da baixa concentração da alimentação. Nesta mesma geometria,  $D_U = 3$  mm, porém na concentração de 5,5%v, a razão de líquido foi 3,5 vezes maior que a anterior.

Para o maior diâmetro de *underflow* estudado,  $D_U = 5$  mm, os valores de razão de líquido se assemelham assim como as respostas Número de Euler e Eficiência Total explanadas anteriormente.

Por meio da Figura (6), gráfico da concentração volumétrica do *underflow* em função do diâmetro de *underflow*, o efeito de espessamento da suspensão aquosa pode ser melhor visualizado.



**Figura 6** – Concentração Volumétrica do *underflow* em função da concentração alimentada e diâmetro de *underflow*



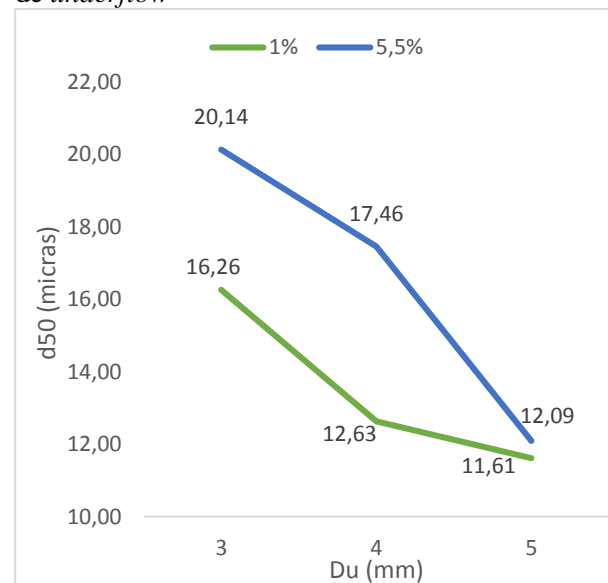
É possível observar que os resultados de concentração do *underflow* foram melhores para os ensaios com o HCO sendo alimentado com 5,5% v. de suspensão de quartzito.

Na configuração de 3 mm de diâmetro de *underflow*, o HCO atingiu aproximadamente a mesma concentração volumétrica no *underflow* tanto para alimentação com  $C_{VA}$  de 1,0% quanto de 5,5%, entretanto, o aumento percentual foi maior na condição inicial diluída pois a concentração foi majorada mais de 40 vezes enquanto para a  $C_{VA}$  de 5,5% o aumento quantificado foi cerca de 8 vezes.

Caso a opção de  $D_U$  de 3 mm fosse escolhida, qualquer uma das duas condições operacionais de concentração de alimentação reproduziria bons resultados, mesmo após verificação dos resultados anteriores de razão de líquido. Deve-se ponderar tal escolha pois o gasto energético utilizando  $C_{VA}$  de 5,5% é menor ( $E_u = 739$ ) que usando  $C_{VA}$  de 1,0% ( $E_u = 853$ ), entretanto a eficiência total é menor, cerca de 44%, mas a razão de líquido continua sendo baixa ( $R_L = 3,16\%$ ).

Quando ao poder de classificar partículas, a resposta diâmetro de corte concede bom direcionamento ao projeto. Neste sentido, a Figura (7) apresenta os resultados experimentais do Diâmetro de Corte Reduzido em função do diâmetro de *underflow* usado.

**Figura 7** – Diâmetro de Corte Reduzido em função da concentração alimentada e diâmetro de *underflow*



Aplicando o conceito de eficiência granulométrica (G) ao se observar a Figura (7), pode-se dizer que, certamente as partículas maiores que 21 micras serão coletadas com eficiência granulométrica superior a 0,5 no *underflow* do HCO usando a  $C_{VA}$  de 5,5%. Já para os ensaios com alimentação diluída, certamente as partículas maiores que 17 micras serão coletadas com eficiência granulométrica maior que 50%.

Frente ao poder concentrador do HCO discutido anteriormente, e dos resultados que comprovam sua capacidade de classificar partículas, pode-se ressaltar a versatilidade deste hidrociclone como uma de suas melhores vantagens. Além disso, sua alta capacidade de processamento e razoável eficiência fazem do HCO um equipamento de grande potencial industrial.

Após a discussão anterior e cálculo experimental das variáveis razão de líquido e diâmetro de corte reduzido, pode-se ajustar os dados do equipamento HCO a equação de projeto de Massarani (Equações 6 e 7).

Na Tabela (1) encontram-se os valores estimados dos parâmetros K, A e D, da Equação (6), através do ajuste não linear com nível de significância de 5%. O coeficiente de correlação, r, foi de 0,8750.

**Tabela 1** – Parâmetros da Equação (6) para o HCO

Parâmetro	Valor estimado
K	$0,090 \pm 0,004$
A	$8,34 \pm 1,65$
D	$6,24 \pm 1,01$

O parâmetro K pode ser usado como um indicador do poder de aumentar o percentual mássico da suspensão alimentada no hidrociclone. Por exemplo, o valor de K para a tradicional família de hidrociclones concentradores Rietema é de 0,039; enquanto para o Hidrociclone Concentrador Otimizado, o valor de K é de 0,090. Este fato comprova a característica de concentrar correntes do HCO.

Na Tabela (2) encontram-se os valores estimados dos parâmetros B e C, da Equação (7), através do ajuste não linear com nível de significância de 5%. O coeficiente de correlação, r, foi de 0,9366.

**Tabela 2** – Parâmetros da Equação (7) para o HCO

Parâmetro	Valor estimado
B	$48,01 \pm 34,06$
C	$3,57 \pm 0,38$

Para cada diâmetro de *underflow* estudado foram quantificados valores próximos para a resposta razão de líquido, o que justifica a ordem de grandeza dos desvios padrão. E por serem baixos tais valores de razão de líquido, os coeficientes de correlação atingidos foram relativamente baixos.

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo comprovou o poder de concentração de correntes do HCO através da determinação da resposta Razão de Líquido e da estimativa dos parâmetros da Equação de Projeto de Massarani. Usando como alimentação uma suspensão de 5,5% em volume, pode-se alcançar valores razoáveis de eficiência, baixas razões de líquido, baixo consumo energético, e, no menor orifício de *underflow* (3 mm) alcançar concentração volumétrica de partículas no *underflow* de cerca de 45%

## NOMENCLATURA

$C_{VA}$  - 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* (-)  
 $d_{50}$  - diâmetro de corte (L)  
 $d_{50}'$  - diâmetro de corte reduzido (L)  
 $d_{63,2}$  - parâmetro ajustado do modelo RRB (L)  
 $D_C$  - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (L)  
 $d_p$  - diâmetro da partícula (L)  
 $D_U$  - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (L)  
 $Eu$  - número de Euler (-)  
 $G$  - eficiência granulométrica (-)  
 $G'$  - eficiência granulométrica reduzida (-)  
 $\eta$  - eficiência total (-)  
 $L$  - comprimento total da seção cilíndrica do hidrociclone (L)  
 $l$  - comprimento do *vortex finder* (L)  
 $n$  - parâmetro ajustado  $n$  do modelo RRB (-)  
 $Q$  - vazão volumétrica da corrente de alimentação ( $L^3T^{-1}$ )  
 $Q_U$  - vazão volumétrica da corrente de *underflow* ( $L^3T^{-1}$ )  
 $R_L$  - razão de líquido (-)

$W_A$  - vazão mássica da alimentação ( $MT^{-1}$ )  
 $W_U$  - vazão mássica da corrente de *underflow* ( $MT^{-1}$ )  
 $-\Delta P$  - queda de pressão no hidrociclone ( $ML^{-1}T^{-2}$ )  
 $\rho$  - densidade do fluido ( $ML^{-3}$ )  
 $\rho_s$  - densidade do sólido ( $ML^{-3}$ )  
 $\mu$  - viscosidade do fluido ( $ML^{-1}T^{-1}$ )

Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte na execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. **Anais do XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos**, São Carlos. [S.l.: s.n.], 1989. p. 125-136.

LANNA, A. E.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. **Revista Ciência & Engenharia**, p. 175-186, 1992.

SILVA, N. K. G. **Estudo da Otimização da Configuração Do Hidrociclone Filtrante**. [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia; 2014.

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 de Doutorado]. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia; 2006.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes como órgão de fomento da pesquisa e ao Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) da Faculdade de Engenharia Química da