

MODELO EMPÍRICO PARA CÁLCULO DO DIÂMETRO DE CORTE CORRIGIDO DE HIDROCICLONES

André Carlos Silva ¹
Elenice Maria Schons Silva ²
Jainer Diogo Vieira Matos ³

Resumo

Os hidrociclones são equipamentos amplamente utilizados no processamento mineral, realizando operações de deslamagem, classificação, classificação seletiva, espessamento e pré-concentração. Um hidrociclone é composto por uma peça cilíndrica solidária a uma peça tronco-cônica, sem nenhuma peça móvel em seu interior e capaz de realizar a separação gravimétrica de materiais granulares em presença de água. O mecanismo de separação das partículas minerais atuantes em um hidrociclone é complexo e sua modelagem matemática é, normalmente, empírica. O modelo mais utilizado para o cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclones é o modelo proposto por Plitt, sendo que ao longo dos anos foram propostas várias modificações e correções para tal modelo. O presente trabalho apresenta uma modificação na constante do modelo original de Plitt, obtida pela regressão exponencial de dados simulados para três geometrias diferentes de hidrociclones: Rietema, Bradley e Krebs. Para a validação do modelo proposto são usados dados da literatura obtidos de ensaios com minério de fosfato para quinze diferentes geometrias de hidrociclones. O modelo proposto apresenta uma correlação entre o diâmetro de corte corrigido experimental e o calculado, de 88,2%, ao passo que a correlação entrada segundo o modelo de Plitt é de 11,5%.

Palavras-chave: Hidrociclones; Classificação; Diâmetro; Corte.

EMPIRICAL MODEL FOR HYDROCYCLONES CORRECTED CUT SIZE CALCULATION

Abstract

Hydrocyclones are devices worldwide used in mineral processing for desliming, classification, selective classification, thickening and pre-concentration. A hydrocyclone is composed by one cylindrical and one conical section joint together, without any moving parts and it is capable of perform granular material separation in pulp. The mineral particles separation mechanism acting in a hydrocyclone is complex and its mathematical modelling is usually empirical. The most used model for hydrocyclone corrected cut size is proposed by Plitt. Over the years many revisions and corrections to Plitt's model were proposed. The present paper shows a modification in the Plitt's model constant, obtained by exponential regression of simulated data for three different hydrocyclones geometry: Rietema, Bradley and Krebs. To validate the proposed model literature data obtained from phosphate ore using fifteen different hydrocyclones geometry are used. The proposed model shows a correlation equals to 88.2% between experimental and calculated corrected cut size, while the correlation obtained using Plitt's model is 11.5%.

Key words: Hydrocyclones; Classification; Size; Cut.

¹Engenheiro de Minas, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor do Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás – UFG, Campus Catalão, Av. Doutor Lamartine Pinto de Avelar, 1120, Setor Universitário, Cep 75704-020, Catalão, GO, Brasil.

E-mail: andrecarlos@catalao.ufg.br

²Química Industrial, Mestre em Engenharia Mineral, Professora do Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás – UFG, Campus Catalão, Av. Doutor Lamartine Pinto de Avelar, 1120, Setor Universitário, Cep 75704-020, Catalão, GO, Brasil.

E-mail: elenice@catalao.ufg.br

³Aluno do Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás – UFG, Campus Catalão, Av. Doutor Lamartine Pinto de Avelar, 1120, Setor Universitário, Cep 75704-020, Catalão, GO, Brasil. E-mail: jainerdeng@yahoo.com.br

I INTRODUÇÃO

Embora a existência dos hidrociclones reporte a 1890, somente a partir de 1940 iniciou-se a fabricação desse equipamento com tecnologias avançadas.⁽¹⁾ Nos anos seguintes, milhares de hidrociclones foram instalados e hoje esses equipamentos são considerados como o equipamento padrão para o fechamento de circuitos de moagem em muitas empresas e o equipamento mais usado para a classificação de materiais com granulometria fina, de $2\ \mu\text{m}$ a $837\ \mu\text{m}$. Trata-se de um equipamento versátil, de capacidade elevada e sem partes móveis.

Os hidrociclones têm a sua maior aplicação como equipamentos de classificação granulométrica fechando circuitos de moagem, mas também se destacam em operações de deslamagem, classificação seletiva, espessamento e pré-concentração. Podem também ser atribuídas aos hidrociclones funções de filtragem de água, de efluentes líquidos e, em casos específicos, alguns tipos de bactérias. Seu princípio básico de separação é a sedimentação centrífuga, e o desempenho desses equipamentos influenciado por sua geometria, dimensões, variáveis operacionais e propriedades físicas, tanto dos sólidos quanto da polpa. Os mecanismos de separação e a hidrodinâmica atuantes nos hidrociclones são complexos e de difícil modelagem teórica, sendo comum a adoção de modelos empíricos baseados em ensaios laboratoriais para a previsão do seu desempenho. O modelo empírico mais utilizado para o cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclones é o modelo proposto por Plitt,⁽²⁾ que sofreu mudanças e adaptações ao longo dos anos. O presente artigo apresenta uma análise estatística onde é comparado o modelo de Plitt com cinco outros modelos derivados do original. Desta análise é proposto um novo modelo, validado com

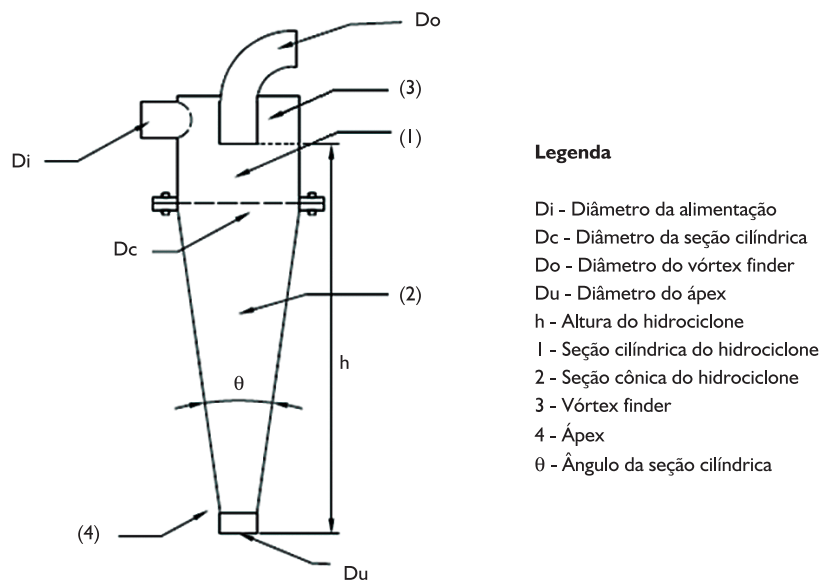
dados experimentais gerados em laboratório para polpas de minério de fosfato testado em quinze diferentes geometrias de hidrociclones. Os resultados obtidos pelo modelo proposto apresentam um coeficiente de correlação aproximadamente oito vezes maior que o do modelo de Plitt.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Hidrociclones

Um hidrociclone consiste de um cilíndrico afixado a um tronco de cone (Figura 1). A polpa pressurizada é alimentada tangencialmente à seção cilíndrica. A abertura no vértice da seção cônica, denominada ápex, é responsável pela descarrega do material afundado (*underflow*), sendo o material transbordado (*overflow*) removido por um tubo coaxial denominado *vórtex finder*.

Segundo Valadão e Araújo,⁽³⁾ o hidrociclone é um equipamento desprovido de partes móveis onde a alimentação da polpa é realizada sob pressão, criando um fluxo descendente em espiral ao longo da sua parede interna. Um fluxo ascendente é criado pela formação de uma região de baixa pressão na parte central do hidrociclone. A energia potencial armazenada na polpa, em razão do bombeamento, é transformada em energia cinética que, devido à geometria do hidrociclone, gera um movimento rotacional da polpa. As partículas de diâmetros maiores tendem a ocupar as regiões periféricas da seção cilíndrica e, conseqüentemente, da seção cônica. As partículas de diâmetros menores são deslocadas para a região central do hidrociclone. Segundo Kelly e Spottiswood,⁽⁴⁾ a região próxima à parede do hidrociclone é ocupada, preferencialmente, por polpa com predominância de partículas grossas e a região central, por polpa com predominância de partículas finas.



Legenda

- Di - Diâmetro da alimentação
- Dc - Diâmetro da seção cilíndrica
- Do - Diâmetro do vórtex finder
- Du - Diâmetro do ápex
- h - Altura do hidrociclone
- 1 - Seção cilíndrica do hidrociclone
- 2 - Seção cônica do hidrociclone
- 3 - Vórtex finder
- 4 - Ápex
- θ - Ângulo da seção cilíndrica

Figura 1. Principais partes de um hidrociclone.

De acordo com Mular e Jull,⁽⁵⁾ durante a hidrocliclonagem ocorre uma classificação granulométrica das partículas na qual se obtêm duas classes granulométricas. Teoricamente, o material transbordado seria composto apenas por partículas de menor diâmetro e o material afundado apenas por partículas de maior diâmetro. Na prática, contudo, tal partição não ocorre perfeitamente e o material transbordado pode conter uma alta porcentagem de partículas grossas e o material afundado uma alta porcentagem de partículas finas. O desempenho de uma operação de hidrocliclonagem pode ser avaliado pela massa de partículas finas que se dirigem erroneamente para o fluxo de material afundado. Geralmente, as operações de hidrocliclonagem são realizadas por baterias de hidrociclones, que possuem alta capacidade em relação à área que ocupam dentro da usina, manutenção simples e baixos custos de aquisição e operação.

2.2 Modelos Empíricos da Hidrocliclonagem

Dentre os modelos empíricos utilizados para o dimensionamento de hidrociclones, o mais utilizado é o modelo de Plitt,⁽²⁾ que foi obtido por meio de um programa de regressão linear múltipla que testou diferentes tipos de formas funcionais das variáveis (linear, potencial e exponencial) e de suas diferentes combinações, onde apenas variáveis com grau de significância maior ou igual a 99% foram incluídas no modelo. As variáveis consideradas são: diâmetro de corte, divisão de fluxo, capacidade, eficiência de separação, bem como variáveis geométricas e operacionais do hidrociclone. Tal modelo pode ser utilizado sem a necessidade da obtenção de dados experimentais adicionais para a predição da operação de hidrociclones para uma ampla faixa de condições operacionais, devido ao volume de dados experimentais utilizados na validação e pela inclusão das variáveis supracitadas no modelo. Na validação de seu modelo, Plitt utiliza 297 ensaios individuais em hidrociclones, dos quais 123 ensaios foram realizados por Lynch e Rao⁽⁶⁾ em hidrociclones Krebs de 20" de diâmetro, trabalhando com lamas e porcentagem de sólido variando de 15% a 70%.

O diâmetro de corte corrigido (em μm) é dado por:

$$d_{50c} = \frac{50,5D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (1)$$

onde:

- D_c é o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone [cm];
- D_i é o diâmetro de alimentação do hidrociclone [cm];
- D_o é o diâmetro do vórtex [cm];
- D_u é o diâmetro do ápex [cm];
- h é a altura livre do hidrociclone, medida desde o ápex até a parte inferior do vórtex *finder* [cm];
- Q é a vazão volumétrica de polpa na alimentação [L/min];

- ρ_l é a massa específica da fase líquida (normalmente água) [g/cm³];
- ρ_s é a massa específica do sólido [g/cm³];
- ϕ é a porcentagem de sólidos em volume na polpa de alimentação [%].

Ao longo dos anos o modelo de Plitt⁽²⁾ sofreu modificações e correções. Plitt, Finch e Flintoff⁽⁷⁾ propõem a adição da viscosidade dinâmica do fluido (representada pelo símbolo μ e dado em cP) ao modelo original, resultando na expressão:

$$d_{50c} = \frac{50,5D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}\mu^{0,5}e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (2)$$

Flintoff, Plitt e Turak,⁽⁸⁾ apresentam uma modificação na constante da Equação 2, de modo a inserir um fator de calibração (k_1) dependente do sólido alimentado no hidrociclone assim como uma constante (α) que depende do regime de escoamento ao qual é submetida a polpa na alimentação. Para regime laminar adota-se $\alpha = 0,5$.

$$d_{50c} = k_1 \frac{39,7D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}\mu^{0,5}e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}\left(\frac{\rho_s - \rho_l}{1,6}\right)^\alpha} \quad (3)$$

De acordo com Valadão e Araújo,⁽³⁾ a Equação 4 pode ser utilizada para prever o desempenho de hidrociclones de grande diâmetro alimentados com polpa com porcentagens de sólidos elevada. Nota-se que, na Equação 4, a diferença entre a massa específica do sólido e da água tem expoente unitário (e não 0,5 como no modelo original):

$$d_{50c} = \frac{14,8D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s - \rho_l)} \quad (4)$$

Gupta e Yan⁽⁹⁾ apresentam um modelo matemático empírico para o diâmetro de corte obtido pelo estudo de suspensões de sílica pura em hidrociclones laboratoriais, dado por:

$$d_{50c} = k_2 \frac{2,6892D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}\mu^{0,5}e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (5)$$

onde k_2 é um fator de calibração do modelo considerado igual a 1,0 quando existirem dados disponíveis.

Luz⁽¹⁰⁾, ao demonstrar a conversibilidade entre distribuições probabilísticas usadas em modelos de hidrociclones, sugere a Equação 6, que diverge do modelo original de Plitt⁽²⁾ apenas no valor da constante de calibração:

$$d_{50c} = \frac{52,45D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}\mu^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (6)$$

2.3 Geometrias Típicas dos Hidrociclones

Os hidrociclones podem ser agrupados em famílias, de acordo com suas características geométricas. As três principais famílias de hidrociclones são: Bradley, Krebs e Rietema.⁽¹⁾ A Tabela 1 apresenta as relações geométricas das três famílias.

Observações: l é o comprimento do vórtex *finder* e L representa o comprimento total do hidrociclone ($h = L - l$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Proposição do Modelo Matemático

Para a geração do modelo matemático procedeu-se a simulações da operação de hidrociclonação utilizando os modelos supracitados, adotando-se uma geometria de hidrociclone para cada família ($D_c = 10$ cm) e mesmas condições operacionais. A polpa adotada era composta por minério de ferro ($\rho_s = 3,53$ g/cm³) e água ($\rho_l = 1,00$ g/cm³). A porcentagem de sólidos (ϕ) apresentou onze valores diferentes: 0,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45 e 50%. Foram adotadas dez diferentes vazões volumétricas de polpa na alimentação, variando de 0,5 a 5,0 m³/h, com um incremento de 0,5 m³/h. A Tabela 2 apresenta as dimensões adotadas para os três hidrociclones.

Foram realizadas 330 simulações (110 simulações para cada geometria). De posse do diâmetro de corte corrigido calculado em cada simulação foi realizada uma

regressão exponencial, a fim de recalculer os coeficientes da equação de Plitt,⁽¹⁾ propondo um modelo que melhor se ajuste aos valores obtidos. A Equação 7 apresenta o modelo proposto, que difere do modelo original de Plitt na sua constante de calibração e pela adoção da viscosidade dinâmica do fluido, de acordo como o modelo de Plitt, Finch e Flintoff.⁽⁷⁾ A Figura 2 apresenta uma comparação entre o modelo proposto (linha vermelha) e os dados simulados (pontos negros), para um hidrociclone da família Rietema, operando com polpa de minério de ferro e vazão volumétrica de polpa igual a 4,5 m³/h e variando-se a porcentagem de sólidos. Para outros valores de vazão volumétrica e geometria do hidrociclone os resultados encontrados são semelhantes aos apresentados na Figura 2.

$$d_{50c} = \frac{2,54D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}\mu^{0,5}e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (7)$$

Tabela 1. Principais geometrias de hidrociclones

Família	D_i/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L/D_c	θ
Bradley	0,133	0,200	0,330	6,850	9,0°
Krebs	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
Rietema	0,280	0,340	0,400	5,000	15-20,0°

Tabela 2. Dimensões dos hidrociclones utilizados nas simulações

Família	D_c [cm]	D_i [cm]	D_o [cm]	D_u [cm]	h [cm]	θ [°]
Bradley	10,0	1,33	2,00	1,00	65,20	9,0
Krebs	10,0	2,67	1,59	1,00	54,74	12,7
Rietema	10,0	2,80	3,40	2,50	46,00	20,0

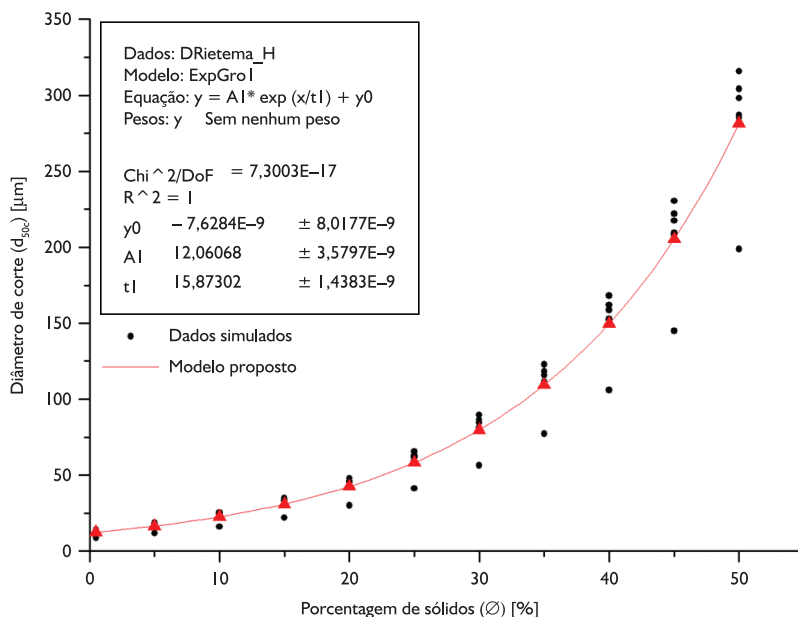


Figura 2. Curva de regressão do modelo proposto (linha vermelha) e os dados simulados (pontos negros), para um hidrociclone da família Rietema, operando com polpa de minério de ferro e vazão volumétrica (Q) igual a 4,5 m³/h.

3.2 Validação do Modelo

Para a validação do modelo proposto são usados dados experimentais de sessenta ensaios de hidrociclonagem com polpas de minério de fosfato ($\rho_s = 2,98 \text{ g/cm}^3$), em diversas porcentagens de sólidos e vazões de alimentação.⁽¹²⁾ Os ensaios foram realizados com quinze hidrociclones diferentes, sendo que, para cada hidrociclone, foram realizados quatro ensaios com diferentes vazões volumétricas. A Tabela 3 apresenta as variáveis geométricas e a porcentagem de sólidos dos quinze hidrociclones utilizados.

Para o conjunto de dados experimentais extraído de Vieira⁽¹²⁾, é calculado o diâmetro de corte corrigido utilizando o modelo de Plitt.⁽²⁾ A Figura 3 apresenta a correlação entre o diâmetro de corte corrigido, calculado pelo modelo

de Plitt,⁽²⁾ e o experimental. O coeficiente de correlação encontrado para os sessenta ensaios de hidrociclonagem considerados é igual a 11,5%, indicando uma fraca correlação entre os dados experimentais e calculados. Nota-se que, em vinte ensaios, o diâmetro de corte corrigido, calculado pelo modelo de Plitt,⁽²⁾ é superior a $75 \mu\text{m}$, sendo que o diâmetro de corte corrigido experimental em nenhum ensaio é superior a $10 \mu\text{m}$. Os ensaios com os piores resultados pelo modelo de Plitt foram obtidos para baixas vazões volumétricas de alimentação. A Figura 4 apresenta a mesma correlação anterior expurgando os vinte ensaios cujo diâmetro de corte corrigido calculado pelo modelo de Plitt é superior a $75 \mu\text{m}$. O coeficiente de correlação encontrado igual a 26,73%, ainda indica uma fraca correlação entre os dados experimentais e calculados.

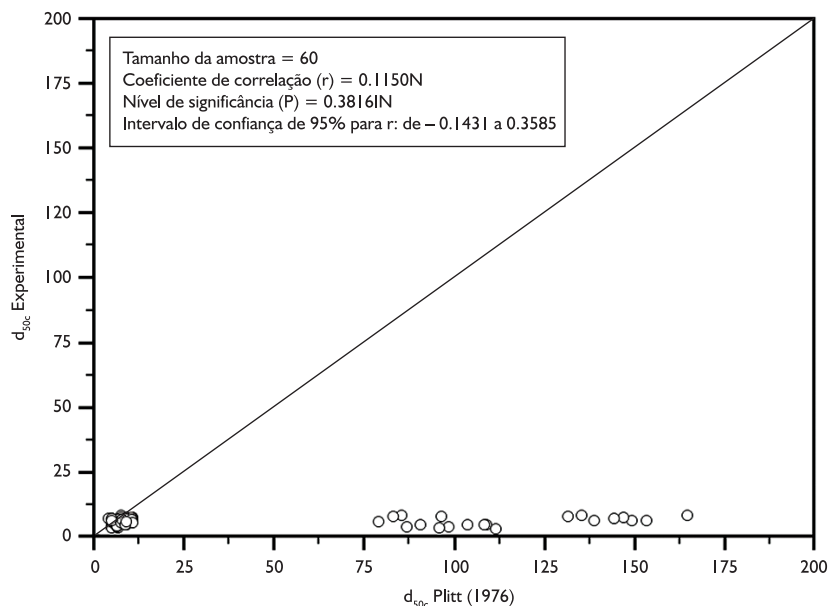


Figura 3. Correlação entre o d_{50c} experimental e calculado pelo modelo de Plitt,⁽¹⁾ para sessenta ensaios de hidrociclonagem.⁽¹²⁾

Tabela 3. Variáveis operacionais adotadas nos ensaios experimentais para a validação do modelo proposto (adaptado de Vieira⁽¹²⁾)

Hidrociclone	D_c [cm]	D_i [cm]	D_o [cm]	D_u [cm]	h [cm]	θ [°]	ϕ [%]
1	3,0	4,8	6,6	5,0	13,0	11,2	0,73
2	3,0	4,8	6,6	5,0	13,0	17,8	0,88
3	3,0	4,8	6,6	5,0	19,5	17,8	0,83
4	3,0	4,8	9,6	5,0	13,0	11,2	0,73
5	3,0	4,8	9,6	5,0	19,5	11,2	0,85
6	3,0	4,8	9,6	5,0	19,5	17,8	0,80
7	3,0	7,8	9,6	5,0	19,5	17,8	0,83
8	3,0	7,8	9,6	5,0	13,0	17,8	0,88
9	3,0	7,8	9,6	5,0	19,5	11,2	0,85
10	3,0	7,8	9,6	5,0	19,5	17,8	0,83
11	3,0	3,9	8,1	5,0	16,2	14,5	0,82
12	3,0	8,7	8,1	5,0	16,2	14,5	0,82
13	3,0	6,3	8,1	5,0	16,2	14,5	1,05
14	3,0	6,3	8,1	5,0	16,2	9,0	0,83
15	3,0	6,3	8,1	5,0	16,2	20,0	0,80

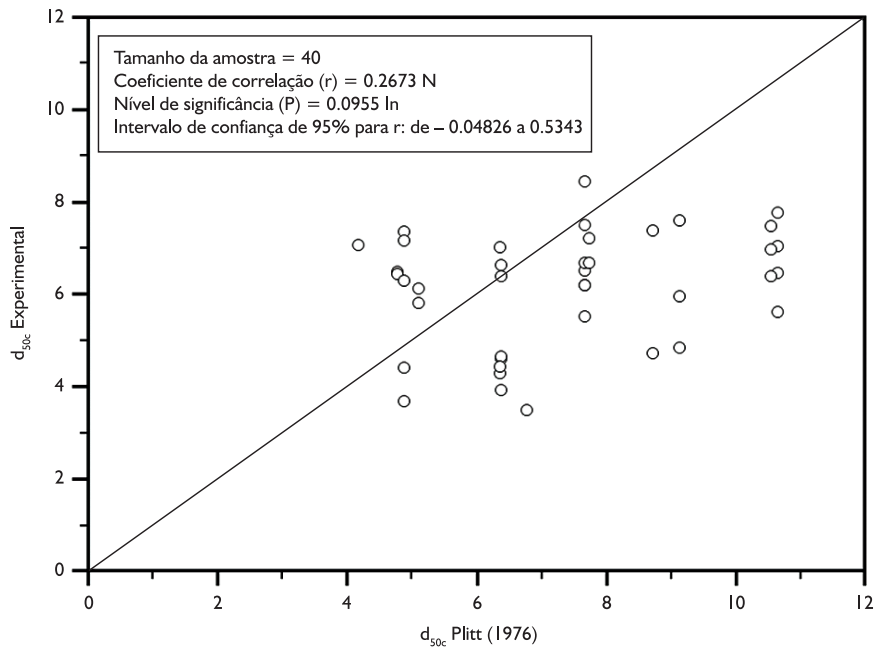


Figura 4. Correlação entre o d_{50c} experimental e calculado pelo modelo de Plitt,⁽²⁾ para quarenta ensaios, de hidrociclonação (excluindo-se os valores de $d_{50c} > 75 \mu\text{m}$). Dados experimentais de Vieira.⁽¹²⁾

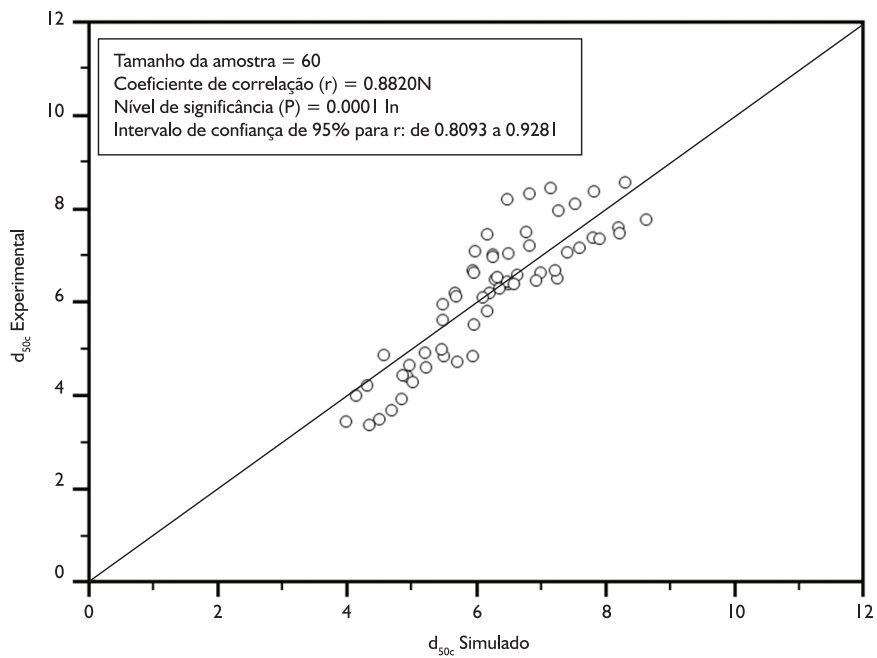


Figura 5. Correlação entre o d_{50c} experimental e calculado pelo modelo proposto para sessenta ensaios de hidrociclonação.⁽¹²⁾

A Figura 5 apresenta a correlação entre o diâmetro de corte corrigido, calculado pelo modelo proposto neste trabalho, e o experimental. O coeficiente de correlação encontrado para os sessenta ensaios de hidrociclonação realizados, obtidos por Vieira,⁽¹²⁾ é 88,20%, indicando a forte correlação entre os dados experimentais e calculados. Nota-se que em nenhum ensaio são encontrados resultados anômalos, como ocorre com a aplicação do modelo de Plitt.⁽²⁾

4 CONCLUSÕES

Pelo estudo dos modelos para cálculo do diâmetro de corte corrigido de hidrociclones, baseados no modelo originalmente proposto por Plitt,⁽²⁾ é possível a proposição de um novo modelo empírico, muito semelhante ao modelo original. Para a proposição do modelo foram simuladas polpas de minério de ferro operando em três

geometrias diferentes de hidrociclones. Para a validação do modelo proposto foram utilizados ensaios de hidrociclones realizados em laboratório, com polpas de minério de fosfato com baixa porcentagem de sólidos, utilizando quinze diferentes geometrias de hidrociclones. O modelo proposto apresenta resultados superiores aos obtidos pelo modelo de Plitt, quando comparados os coeficientes de correlação entre os diâmetros de corte corrigidos experimentais e calculados.

Este estudo permite verificar que o modelo de Plitt não é capaz de realizar uma boa estimativa do diâmetro de corte corrigido de polpas com baixa porcentagem de sólidos operando com baixas vazões volumétricas, incapacidade esta que modelo proposto não apresenta.

Trabalhos futuros ainda se mostram necessários a fim de testar mudanças mais amplas nas variáveis operacionais, tais como polpas de sólidos com diferentes massas específicas, viscosidade dinâmica do fluido, vazão de alimentação e temperatura da polpa, de modo a modificar a viscosidade do fluido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás – FAPEG, pelos apoios financeiros para a realização deste trabalho, bem como à Universidade Federal de Goiás – UFG, Campus Catalão.

REFERÊNCIAS

- 1 SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, O. A. Ensaio de classificação em hidrociclone. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (Ed). *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p.139-54.
- 2 PLITT, L. R. A mathematical model of the hydrocyclone classifier. *CIM Bulletin*, v. 69, n. 776, p. 114-23, 1976.
- 3 VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- 4 KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. *Introduction to mineral processing*. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- 5 MULAR, A. L.; JULL, N. A. The selection of cyclone classifiers, pumps and pump boxes for grinding circuits. In: MULAR, A. L.; BHAPPU, R. B. (Ed.) *Mineral processing plant design*. 2. ed. New York: Society of Mining Engineers, 1978. p. 376-403.
- 6 LYNCH, A. J.; RAO, T. C. Modelling and scale up of hydrocyclone classifiers. In: INTERNACIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11., 1975, Cagliari. *Proceedings...* S.n.t. p.245-69.
- 7 PLITT, L. R.; FINCH, J. A.; FLINTOFF, B. C. Modelling the hydrocyclone classifier. In: EUROPEAN SYMPOSIUM PARTICLE TECHNOLOGY, 1980, Amsterdam. *Proceedings...* S.n.t. p. 790-804.
- 8 FLINTOFF, B. C.; PLITT, L. R.; TURAK, A. A. Cyclone modelling: a review of present technologies. *CIM Bulletin*, v. 80, n. 905, p. 39-50, 1987.
- 9 GUPTA, A.; YAN, D. S. *Mineral processing design and operation: an introduction*. London: Elsevier, 2006.
- 10 LUZ, J. A. M. Conversibilidade entre distribuições probabilísticas usadas em modelos de hidrociclones. *REM: Revista da Escola de Minas*, v. 58, n. 1, p. 89-93, jan.-mar. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672005000100015>
- 11 SVAROVSKY, L. *Solid-liquid separation*. 2. ed. London: Butterworths, 2000. PMID:20478191.
- 12 VIEIRA, L. G. M. Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes. 2006. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

Recebido em: 26/06/2012

Aceito em: 19/10/2012