

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS HIDROCICLONES DE 4" DA USINA DE BENEFICIAMENTO DA MINA DE MANGANÊS DO AZUL

V.S. Moreira<sup>1</sup>, J.P. Resplandes<sup>1</sup>, M.R. Neres<sup>1</sup>, R.S. de Paiva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará

Folha 17 Q. 04 L. Especial, S/N, Marabá, PA, 68505-080. e-mail:

[vinicius\\_engminas@hotmail.com](mailto:vinicius_engminas@hotmail.com)

## RESUMO

A Mina do Azul está localizada no município de Parauapebas - PA, distante 63 km de sua sede. Atualmente é a maior mina de manganês em operação do Brasil e pertence a Vale Manganês S.A. A usina do projeto consiste basicamente de processos de britagem, lavagem, peneiramento e classificação, gerando três produtos de diferentes granulometrias: o granulado (35-75 mm), o médio granulado (9-35 mm) e o sinterfeed (0,15 a 9 mm). Nesse contexto os hidrociclones têm papel fundamental na recuperação de sinterfeed, transformando em produto um material que seria direcionado à barragem de rejeitos. Dessa forma além de agregar valor ao minério, essa operação unitária permite um aumento da vida útil da barragem. Para garantir que esses equipamentos funcionem corretamente, ou seja, que direcione para o overflow apenas partículas menores que 0,15 mm, e ainda, que a partição de água para o underflow seja pequena, é necessário otimizar algumas variáveis operacionais e de projeto. A modelagem e simulação vêm a contribuir com este dimensionamento de forma rápida e menos onerosa. Visando a otimização do processo, a partir do modelo de Plitt, foram coletadas amostras da alimentação dos hidrociclones de 4" da usina para a realização dos ensaios em hidrociclone em escala piloto na UFPA, Campus de Marabá. A partir da análise granulométrica da alimentação, overflow e underflow desse hidrociclone foi possível a determinação da curva padrão de partição, assim como a partição de Plitt. Com posse desses dados determinou-se os valores das variáveis de forma a se obter o produto desejado.

**Palavras-chave:** Modelagem e simulação, classificação, hidrociclones, manganês.

## **1. INTRODUÇÃO**

A maior mina de manganês do Brasil se encontra no sudeste do Pará, mina do Azul, a cerca de 57 km do município de Parauapebas. O projeto conta com três minas, usina de beneficiamento, depósito de estéril e duas barragens, atualmente, uma de captação de água e a outra para despejo de rejeito da usina. Esta, por sua vez, é composta basicamente por operações de britagem, lavagem, peneiramento e classificação. Neste contexto, os hidrociclones têm papel fundamental no aproveitamento de partículas finas, de forma a aumentar a recuperação de minério e ainda, a vida útil da barragem, transformando em produto o que seria descartado. O funcionamento dos hidrociclones se baseia na ação da força centrífuga que a polpa adquire ao ser bombeada e na ação da gravidade. Estes equipamentos são relativamente simples e não possuem partes móveis, facilitando consideravelmente sua manutenção. Entretanto o consumo energético é superior a de outros equipamentos, uma vez que necessita do funcionamento ininterrupto de bombas (Chaves, 2006).

A modelagem e simulação de hidrociclonagem aparecem como importantes alternativas para garantir seu correto funcionamento, economizando tempo e dinheiro, recursos escassos em qualquer processo industrial. Uma vez criado um modelo que represente de forma fidedigna os processos da usina, para se observar os efeitos de modificações que venham a sanar algumas limitações da planta, é necessária apenas a realização de algumas simulações em computador. Não sendo, portanto, necessário que tais modificações propostas sejam realizadas na prática, o que necessitaria de deslocamento de mão-de-obra, gastos com amostragens e tempo de realização das análises.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Amostragem**

As amostras foram coletadas da alimentação dos hidrociclones de 4” da usina de beneficiamento de manganês do Azul. Cerca de 80 litros de polpa de minério foram coletados no dia 14/10/2010. Como na data da amostragem a usina estava processando minério detrítico, esta foi a litologia utilizada nos ensaios. Devido a problemas mecânicos com a bomba que direciona o material do tanque para a bateria de hidrociclones, não foi possível a coleta do material diretamente da saída do distribuidor desta bateria. Sendo assim, as amostras foram coletadas do tanque que recebe o overflow do classificador espiral. Para diminuição dos erros de amostragem foram coletados incrementos a cada 20 minutos, durante uma hora, de cerca de 20 litros de polpa. Totalizando 80 litros de material. Foram condicionadas em quatro galões de 20 litros e direcionadas à usina piloto da Universidade Federal do Pará, em Marabá, onde foram realizados os ensaios de hidrociclonagem.

### **2.2. Ensaios de Hidrociclonagem**

Antes da realização dos ensaios, primeiramente foram reguladas as geometrias do equipamento, de forma a se obter um hidrociclone com as proporções entre as geometrias iguais as da família Krebs, conforme a figura 15. Uma vez que os hidrociclones da usina do Manganês do Azul pertencem a esta família.

O procedimento para a realização dos ensaios foi seguido conforme recomenda Sampaio *et al.* (2007). Como a amostra já se encontrava na forma de polpa de minério, a vazão foi regulada com a própria polpa, e não com água, como recomenda o procedimento adotado. Para tanto os 80 litros de polpa do minério foi adicionada ao tanque de agitação, onde foi homogeneizada durante 10 minutos. Após este tempo, ligou-se a bomba, mantendo a válvula R2 fechada e a R1 aberta (figura 1), deixando o material circular. Logo após, fechou-se o registro R1 e, simultaneamente abriu-se o registro R2. Aguardou-se o hidrociclone entrar em regime estacionário, de forma que a pressão se mantenha constante. Verificou-se se o fluxo do underflow apresentava um pequeno ângulo, e não na forma de cordão ou guarda-chuva. Procedeu-se então a medição da vazão na alimentação, no underflow e overflow, através da contagem do tempo necessário para se adquirir um volume determinado, repetiu-se esse procedimento cinco vezes, para que se pudesse obter um valor confiável.

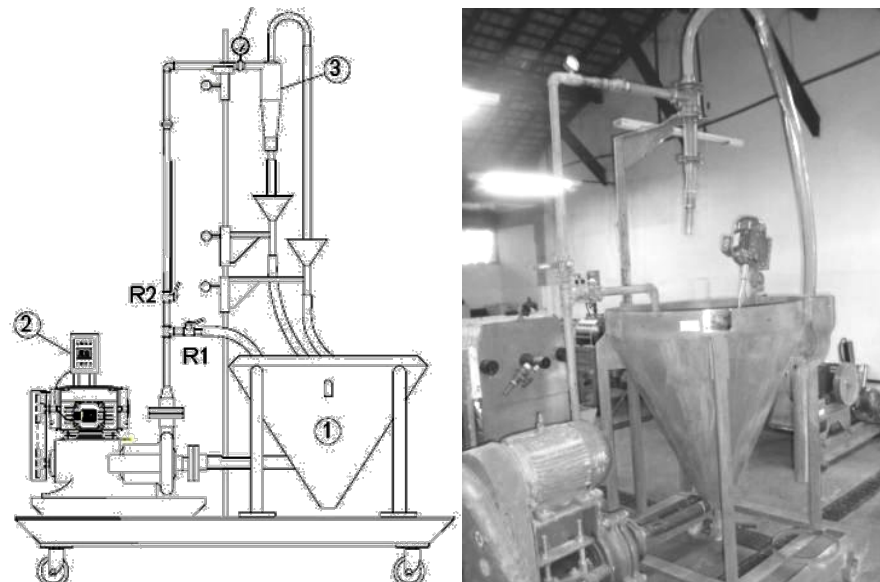


Figura 1: Imagem ilustrativa (Sampaio *et al.* 2007) e foto do equipamento utilizado nos ensaios. 1: Tanque de polpa. 2: Inversor de frequência. 3: Hidrociclone. R1: Registro de atalho. R2: Registro de alimentação.

A etapa seguinte foi a amostragem dos produtos do hidrociclone. Coletou-se amostras do underflow e overflow em curtos espaços de tempo, visando a não perturbação do sistema. Utilizou-se o mesmo procedimento utilizado para medição da vazão da alimentação (L/min) para a descarga do apex e vortex finder. As amostras foram dirigidas às análises granulométricas, de densidade e percentagem de sólidos.

### 2.3. Modelagem e Simulação de Hidrociclones

Para a realização deste trabalho foi adotado o modelo de Plitt devido sua grande aceitação e de fácil utilização. Conforme recomenda Chaves (2006), não foram utilizadas todas as constantes predeterminadas por Plitt, mas sim encontradas para o material utilizado, o minério detrítico de manganês da Mina do Azul.

Modelo de Plitt: Este modelo pode ser utilizado para scale-up de instalações industriais, uma vez que não necessita de dados experimentais. Isto se deve ao fato de todas as constantes já estarem calculadas através dos ensaios realizados por Plitt e outros autores. No entanto, Chaves (2006) recomenda que os parâmetros do modelo sejam calculados para cada material e instalação particular.

Todos os modelos possuem dois parâmetros: um que representa o tamanho da separação e outro que representa a eficiência do processo. O primeiro parâmetro, neste modelo, é o  $d_{50c}$  (diâmetro mediano da partição). Este por sua vez é função da geometria do hidrociclone (diâmetro da seção cilíndrica, do inlet, do vortex, do apex, da altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex), das características do minério (densidade do sólido), das condições operacionais (vazão no underflow, percentagem de sólidos na alimentação), conforme a equação (1):

$$D_{50c} = \frac{a D_c^b D_i^c D_o^d \exp(6,3\varphi)}{D_u^f h^g Q^i (\rho_s - \rho_f)^{0,5}} \quad (1)$$

Em que, segundo King (2001), os valores das constantes são:  $a = 39,7$ ;  $b = 0,46$ ;  $c = 0,6$ ;  $d = 1,21$ ;  $f = 0,71$ ;  $g = 0,38$ ;  $i = 0,45$ . E ainda:

$D_c$  = diâmetro do hidrociclone, em cm;

$D_i$  = diâmetro do inlet, em cm;

$D_o$  = diâmetro do vortex finder, em cm;

$\varphi$  = percentagem de sólidos na alimentação, em volume;

$D_u$  = diâmetro do apex, em cm;

$h$  = altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex, em cm;

$Q$  = vazão da alimentação, em l/min;

$\rho_s$  = densidade dos sólidos, em  $g/cm^3$ ;

$\rho_f$  = densidade da água, em  $g/cm^3$ .

O outro parâmetro, neste modelo, é encontrado através da equação (2). Em que a eficiência é dita alta para valores de “ $m$ ” superiores a 3 e baixa para valores inferiores a 2.

$$m = 1,08 e^{(0,58 - 1,58(Q_u/Q))} (D_c^2 h/Q)^{0,15} \quad (2)$$

Em que:

$Q_u$  = vazão do underflow, em l/min;

$Q$  = vazão da alimentação, em l/min;

$D_c$  = diâmetro do hidrociclone, em cm;

$h$  = altura da extremidade do vortex finder em relação ao topo do apex, em cm.

A partição de Plitt é função das características do fluxo da alimentação, das dimensões do hidrociclone, das características do mineral e das condições operacionais.

Esta partição pode ser definida conforme a equação (3), em que  $Y_i$  é a partição,  $d_i$  é o diâmetro considerado e  $d_{50}$  o diâmetro mediano da partição:

$$Y_i = 1 - e^{-0,693(d_i/d_{50})^m} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Ensaios de Hidrociclonagem

A figura 2 mostra o equipamento utilizado assim como o processamento dos ensaios. Observou-se a descarga do underflow em forma de chuva, mostrando que estava havendo classificação.

A pressão do equipamento foi de cerca de 18 psi e 19% foi percentagem de sólidos da alimentação, a densidade da polpa foi de  $1,15 \text{ g/cm}^3$  na alimentação, 1,2 no underflow e 1,12 no overflow. A geometria do hidrociclone foi dimensionada para se obter as mesmas proporções entre as geometrias do equipamento utilizado na usina, são eles: Diâmetro do ciclone: 7 cm; do inlet: 1,9 cm; do vortex finder: 2 cm; do apex: 1 cm; comprimento: 42 cm; comprimento da parte cilíndrica: 30 cm. As medições das vazões retornaram os seguintes resultados: no overflow: 33 L/min; no underflow: 16 L/min.

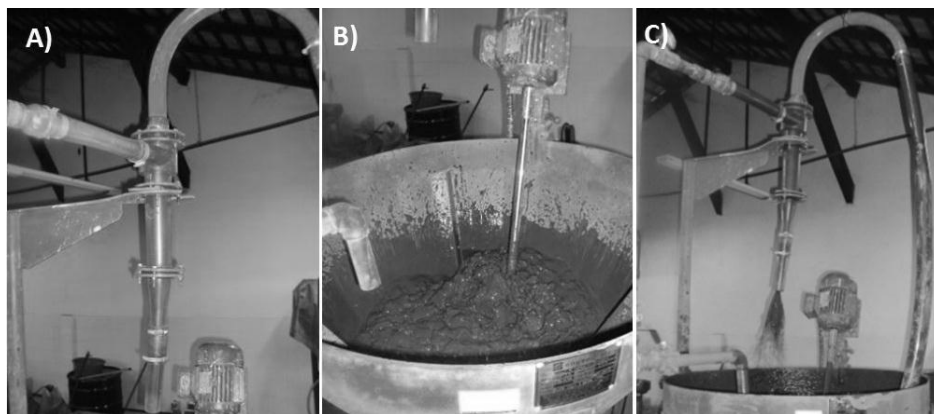


Figura 2: (A) Detalhe do hidrociclone utilizado; (B) Homogeneização da polpa; (C) Hidrociclone em funcionamento.

#### 3.2. Caracterização das Amostras

Através dos dados da análise granulométrica, o que permitiu a descoberta da partição de sólidos, foi realizado o balanço de massa e de água, uma vez que a partição de água é um dos parâmetros que medem a qualidade da classificação. A partição de água para o underflow foi de 36,8%, e segundo o critério de avaliação da qualidade da operação de ciclones de Napier-Munn (1996) *apud* Foggiatto (2009), se enquadra como de qualidade razoável, muito próxima de ser considerada pobre.

As análises granulométricas da alimentação, underflow e overflow foram realizadas com o objetivo de determinar a curva de partição corrigida, de forma a se encontrar o valor do  $d_{50}$  e, principalmente, do  $d_{95}$ , o qual vai mostrar se o hidrociclone está ou não mandando material acima de 0,15mm para o overflow. Dessa forma, pode-se perceber pela análise granulométrica do overflow que o valor do  $d_{95}$  é de 0,201 mm. Este valor mostra que partículas com diâmetro na faixa granulométrica do sinterfeed não estão sendo recuperadas pelo hidrociclone.

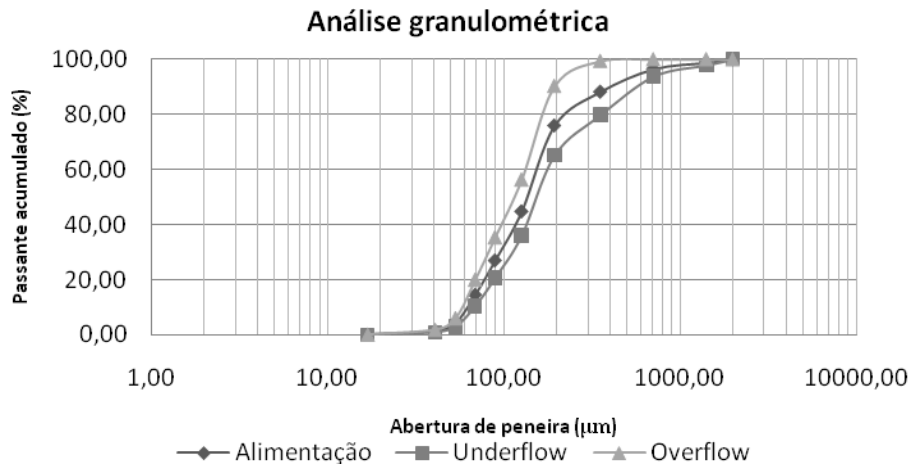


Figura 3: Análise granulométrica da alimentação, underflow e overflow.

### 3.3. Modelagem de Simulação de Hidrociclones

O valor encontrado para o parâmetro “m”, equação (2), experimental foi de 1,27. A relação entre as vazões volumétricas do underflow e overflow foi 0,499, a partição volumétrica para o underflow foi de 0,332. O  $d_{50\text{Plitt}}$  (0,120 mm) foi encontrado através da equação (1) e o  $d_{50\text{exp.}}$  (0,151 mm) através da análise granulométrica. Para o ajuste da função, encontrou-se um fator através de ajuste linear, cujo valor encontrado foi de 1,247 (número adimensional), encontrado através da relação  $d_{50\text{exp.}}/d_{50\text{Plitt}}$  de forma que:  $d_{50\text{corrigido}} = 0,151$  mm.

De acordo com esses valores foi possível a determinação da partição de Plitt na faixa granulométrica considerada, de acordo com a tabela 2:

Tabela I: Partição de Plitt.

Abertura de peneira ( $\mu\text{m}$ )	Partição de Plitt
2000	100,00
1000	100,00
500	99,89
250	83,76
150	49,68

106	29,85
75	16,76
63	12,33
45	6,70
37	4,66
-37	0,96

Através da análise granulométrica calcula-se o passante acumulado da alimentação, overflow e underflow. A partição experimental será a percentagem de cada fração granulométrica a se dirigir ao underflow. Devido ao efeito da curto-circuitagem, esta curva não passa pela origem. Para corrigir este efeito deve-se calcular o by-pass, que considera que parte de cada fração se dirigirá ao underflow, carreado pela água. A partição corrigida é calculada conforme a equação (1):

Tabela II: Partição experimental.

Abertura de peneira (µm)	Pass. Acumulado (%)			Partição	By-pass	Partição corrigida
	Alim.	Under	Over			
2000	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
1000	98,77	97,84	100,00	99,98	3,32	99,97
500	96,46	93,80	100,00	99,97	6,24	99,96
250	88,21	79,79	99,39	96,82	22,27	94,96
150	75,93	65,11	90,31	68,22	33,14	49,68
106	44,76	36,03	56,36	53,21	84,14	25,92
75	26,98	20,65	35,38	49,34	48,01	19,79
63	14,51	10,39	19,98	46,92	33,64	15,96
45	4,27	2,95	6,02	41,43	27,65	7,27
37	1,25	0,86	1,78	39,65	8,14	4,45
-37	0,00	0,00	0,00	38,92	3,39	3,29

Plotando a curva de partição de Plitt e a curva de partição corrigida, e colocando-se  $d/d_{50}$  no eixo do X, teremos a curva padrão de partição, que é invariante a geometria do equipamento e as condições operacionais (figura 23). Portanto esta curva é função apenas do material utilizado nos ensaios, no caso o minério detrítico de manganês.

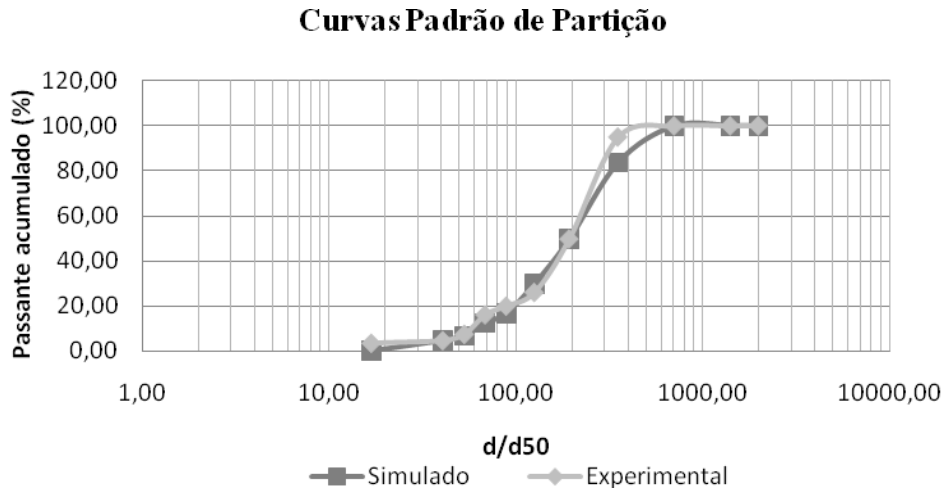


Figura 4: Curva padrão de partição simulada e experimental.

Como pode ser observado na figura 5, conseguiu-se um bom ajuste da curva simulada, através do modelo de Plitt, à curva de partição experimental.

#### 4. CONCLUSÃO

Após o trabalho de revisão de bibliografia, trabalho experimental e análise técnica, observou-se que : a partir as análises experimentais, encontrou-se;  $d_{50} = 0,15$  mm e  $d_{95} = 0,201$  mm. O modelo forneceu 0,12 mm para o  $d_{50Plitt}$ . Para se efetuar a correção deste valor utilizou-se ajuste linear, através da correção da constante “a” da equação (1). De acordo com o modelo adotado, para que o valor do  $d_{95}$  seja próximo a 0,15 mm, deve-se aumentar o comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, de 40 cm para 60 cm, uma vez que se necessita reduzir o diâmetro de corte ( $d_{95}$ ) de 0,201 mm para 0,15 mm e conforme mostra a literatura, porções cilíndricas maiores favorecem a esta redução. Outra modificação sugerida pelo modelo é diminuição da percentagem de sólidos da alimentação, que deve ser regulada a 10%. Isto se deve pelas constantes obstruções ocasionadas pela alimentação de polpas com alta percentagem de sólidos.

A desvantagem da modelagem, quando é necessário um ajuste mais preciso, está na grande quantidade de ensaios que devem ser feitos a fim de se encontrar todas as constantes da equação (1). No entanto, uma vez estabelecida, a modelagem e simulação se mostra uma importante alternativa na otimização de processos, economizando tempo e reduzindo custos. A grande maioria das operações unitárias pode ser simulada, para tanto há inúmeros softwares no mercado e, principalmente, as planilhas eletrônicas. Novos ensaios, a fim de calibrar o modelo, seriam necessários para confirmar sua exatidão. No entanto, por problemas de logística da mina em Parauapebas até a UFPA em Marabá, não foi possível a realização de novos ensaios.

Acredita-se que os resultados adquiridos representam, com uma margem de erro dentro do aceitável, a pesar da amostragem ter sido realizada diretamente do classificador espiral, a hidrociclonagem da usina. No entanto, para a comprovação e validação do modelo, sugere-se que as modificações propostas pelo modelo adotado sejam feitas e novas amostragens e ensaios em escala piloto sejam realizados. Sugere-se



ainda que os ensaios sejam realizados com todas as litologias, principalmente utilizando pelito tabular.

## **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Chaves, A.P. Teoria e Prática de Tratamento de Minérios. Signus Editora, 3ª edição. São Paulo-SP, 2006.

Foggiatto, B. Previsão do desempenho do circuito de moagem de Carajás. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2009.

King, R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA. Salt Lake City-USA. Butterworth-Heinemann, 2001.

Napier-Munn, T. J. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.

Sampaio, J.A.; França, S.C.A.; Braga, P.F.A. Tratamento de Minérios, Práticas Laboratoriais. Centro de Tecnologia Mineral-CETEM. Rio de Janeiro-RJ. 2007.