

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM BOA VISTA

**GOMES, W.L<sup>1</sup>, DELBONI JR., H.<sup>2</sup>, MORINIGO, E.C.<sup>3</sup>, MOURA JR, L.F.<sup>4</sup>, JATOBÁ, T.L.A.<sup>5</sup>, GIACON, V.P.<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo. email: wellingtonlacerdagomes@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo. email: hdelboni@usp.br

<sup>3</sup>CMOC International Brasil, Niobras. email: elyssa.morinigo@cmocbrasil.com

<sup>4</sup>CMOC International Brasil, Niobras. email: lenildo.moura@cmocbrasil.com

<sup>5</sup>Universidade de São Paulo. email: tjatonline@gmail.com

<sup>6</sup>VUniversidade de São Paulo. email: vgiacon@gmail.com

### RESUMO

O processo industrial de beneficiamento do minério de nióbio da usina Boa Vista, localizada na cidade de Ouvidor-GO, consiste em etapas de britagem, lavagem, separação magnética, moagem, classificação, deslamagem e flotação. Atualmente, há geração excessiva de ultrafinos nas etapas de moagem, que acarretam em grande perda de nióbio nas etapas de deslamagem e flotação. O presente trabalho visa estabelecer medidas de processo para as etapas de moagem e classificação que resultem na redução da geração de ultrafinos, de forma a aumentar a recuperação metalúrgica de nióbio nas etapas de deslamagem e flotação. Para tanto, inicialmente foi estabelecido um diagnóstico atualizado e detalhado do desempenho do circuito industrial. A base para tal diagnóstico foi uma amostragem global do respectivo circuito, a partir da qual foram realizadas calibrações de modelos matemáticos de processo para cada um dos equipamentos amostrados, bem como a integração dos mesmos representando assim a operação típica da do circuito, tal plataforma foi denominada de Caso Base. A partir do Caso Base foi realizada uma série de simulações, as quais consistiram no estudo de alternativas com modificações isoladas ou em conjunto das condições operacionais da usina Boa Vista que possibilitessem um aumento da recuperação metalúrgica de nióbio nas etapas de deslamagem e flotação. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo estudar e propor alternativas através de modelagem matemática e simulação para a operação da usina Boa Vista, de modo a aumentar a recuperação metalúrgica de nióbio.

**PALAVRAS-CHAVE:** moagem, classificação, modelagem, simulação.

### ABSTRACT

The industrial process of niobium ore beneficiation at plant Boa Vista, located in Ouvidor-GO, basically consists in the steps of crushing, scrubbing, magnetic separation, grinding, classification, desliming and flotation. Currently, there is an excessive generation of ultrafine particles in the grinding stages of the above-mentioned circuit, which lead to a large loss of niobium in the desliming and flotation steps. The present work aims to establish settings for the grinding stages process variables that result in the change of the particle size distribution of the industrial grinding circuit's final product, in order to increase the metallurgical recovery of the niobium in steps desliming, and flotation. Thus, it was initially established an updated

and detailed diagnosis of the performance of the industrial circuit. The basis for such diagnostic was a global sampling of the above mentioned circuit, from which were performed calibrations in the process' mathematical models for each of the sampled equipment, as well as their interactions, thus representing the typical operation of Boa Vista plant. Such a platform will be called the Base Case. Starting from the Base Case a series of simulations were performed, which consisted of alternatives analysis, with isolated or in combined modifications in Boa Vista plant operating and / or process conditions to enable an increase of the niobium metallurgical recovery in the stages of desliming and flotation. Thus, this study aimed to study and propose alternatives through mathematical modelling and simulation for the operation of the Boa Vista plant in order to optimize it and, consequently, increase the final recovery of niobium.

**KEYWORDS:** grinding, classification, modelling, simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo industrial de beneficiamento de minério de nióbio da usina Boa Vista, localizada na cidade de Ouvidor-GO, consiste essencialmente em etapas de britagem, lavagem, separação magnética, moagem, classificação, deslamagem e flotação. Atualmente, há geração excessiva de ultrafinos na etapa de moagem de bolas do respectivo circuito industrial, as quais acarretam em grande perda de nióbio nas etapas de deslamagem e flotação.

O presente trabalho visa estabelecer medidas de processo para a etapa de moagem de bolas que resultem na mudança da distribuição granulométrica do produto final do circuito de moagem industrial, de forma a aumentar a recuperação metalúrgica de nióbio nas etapas de deslamagem e flotação.

Para tanto, inicialmente foi estabelecido um diagnóstico atualizado e detalhado do desempenho do circuito industrial. A base para tal diagnóstico foi uma amostragem, a qual compreendeu as etapas de lavagem, separação magnética, moagem primária (moinho de barras), moagem secundária (moinhos de bolas) e classificação. A partir dos dados obtidos com a amostragem foram realizadas calibrações de modelos matemáticos de processo para cada um dos equipamentos do circuito, bem como a integração dos mesmos representando assim a operação típica da usina Boa Vista, tal plataforma foi denominada de Caso Base.

A partir do Caso Base foi realizada uma série de simulações, as quais consistiram no estudo de alternativas com modificações isoladas ou em conjunto das condições operacionais e/ou de processo da usina Boa Vista que possibilitassem um aumento da recuperação metalúrgica de nióbio nas etapas de deslamagem e flotação.

No presente trabalho denominado de “*Parte I: Moagem*” estão apresentados estudos de simulações para as etapas de moagem e classificação da usina Boa Vista, detalhando os aspectos da modelagem e simulação do circuito, assim como os pontos que possibilitem uma melhoria do processo e aumento da recuperação metalúrgica de nióbio.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Apesar da grande aplicação do método de Bond na indústria mineral para dimensionamento de novas instalações de moagem, o mesmo é limitado em alguns aspectos como: (a) o método é aplicado para parâmetros e condições pré-estabelecidas por Bond, (b) o consumo energético é calculado em função do  $P_{80}$  e  $F_{80}$  e, portanto, não prevê a distribuição granulométrica completa do produto, (c) assume que a classificação dos circuitos é fixa e não permite analisar a interação entre as diferentes unidades do circuito e realizar mudanças na configuração e tamanho dos equipamentos.

Mediante isto, para o trabalho proposto foram utilizadas as ferramentas de modelagem matemática e simulação. Em relação à moagem foi utilizado o *Perfect Mixing Model (PMM)* proposto por Whiten (1976) considerado um caso particular do *Population Balance Model (PBM)*, Epstein (1947).

O PMM baseia-se no equilíbrio de cada faixa granulométrica que compõe a carga do moinho, que está perfeitamente misturado. A carga do moinho está relacionada com o produto através de uma taxa de descarga para cada faixa granulométrica. Deste modo, a Equação 1 apresentada a seguir define matematicamente o PMM.

$$f_i - p_i \left( 1 - \frac{r_i}{d_i} (1 - a_{ii}) \right) + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \left( \frac{r_i}{d_i} \right) p_i = 0 \quad (1)$$

Onde:

- $f_i$  = vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente à  $i$ -ésima fração granulométrica (t/h);  
 $p_i$  = vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente à  $i$ -ésima fração granulométrica (t/h);  
 $r_j$  = função seleção correspondente à  $j$ -ésima fração granulométrica ( $h^{-1}$ );  
 $d_i$  = taxa de descarga do moinho, correspondente à  $i$ -ésima fração granulométrica ( $h^{-1}$ );  
 $a_{ij}$  = função distribuição de quebra, correspondente a fração da  $j$ -ésima faixa granulométrica, que aparece na  $i$ -ésima faixa granulométrica devido à fragmentação.

Em relação à classificação foi utilizado o modelo de Nageswararao (1978 e 1995), o qual foi desenvolvido diretamente a partir do modelo de Lynch e Rao (1975). O modelo baseia-se na curva de partição padrão de classificação e foi elaborado com base em dados experimentais obtidos a partir de testes em escala piloto. Nageswararao estimou expoentes empíricos para quatro equações referentes ao cálculo dos parâmetros, que descrevem o processo de classificação em hidrociclos, quais sejam, diâmetro mediano de partição, partição de água e de polpa ao underflow e vazão volumétrica da alimentação.

### 2.1. MÉTODO

Inicialmente foi estabelecido um diagnóstico atualizado e detalhado do desempenho do circuito de moagem global da usina Boa Vista, incluindo as etapas de lavagem,

separação magnética, moagem de barras, moagem de bolas e classificação. A base para tal diagnóstico foi a execução de uma campanha amostragem conduzida no respectivo circuito.

A partir dos dados obtidos foi realizada a calibração de modelos matemáticos para cada equipamento e a integração dos mesmos estabelecendo assim o Caso Base, o qual representa a operação típica da usina Boa Vista. O objetivo de se adotar um Caso Base foi estabelecer uma referência, um padrão para balizar todos os diferentes cenários estudados através das simulações.

A calibração dos modelos matemáticos de processo para os equipamentos individuais, bem como a integração dos mesmos e posteriores simulações foram realizadas com o auxílio do software *JKSimMet 6.1*.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o fluxograma e o sumário do balanço de massas global obtido no estabelecimento do Caso Base para o circuito de moagem global da usina Boa Vista.

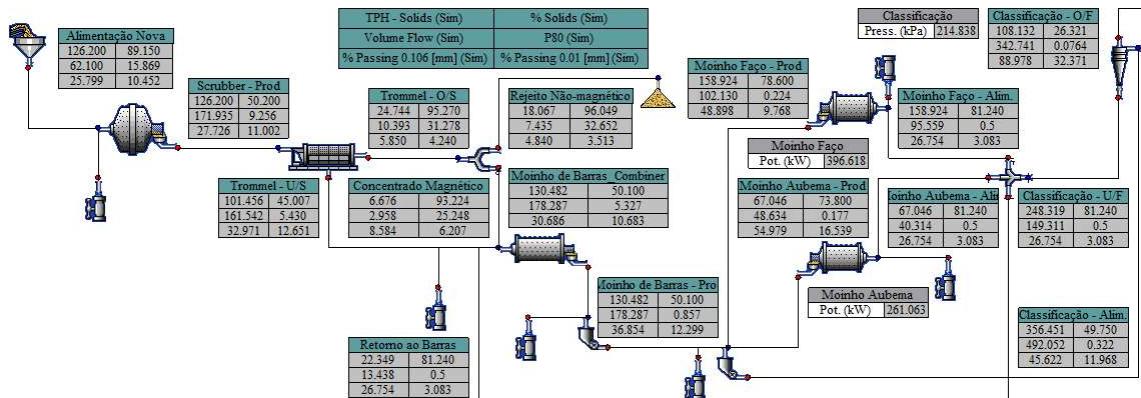


Figura 1. Modelagem do circuito de moagem Boa Vista – Caso Base.

Devido à baixa porcentagem de sólidos (45,0%) do *undersize* do trommel, parte da carga circulante (*underflow* da classificação) do circuito de moagem de bolas é reencaminhada à alimentação do moinho de barras para que esta eleve sua porcentagem de sólidos. Assim, 8,9% da carga circulante (22 t/h) são reencaminhados à alimentação do moinho de barras, a qual atinge porcentagem de sólidos de 50,1%.

O moinho de barras apresentou uma relação de redução de 6,2 com  $F_{80}$  e  $P_{80}$  de 5,33 mm e 0,857 mm, respectivamente. A alimentação e produto do moinho de barras apresentaram, respectivamente, 10,7% e 12,3% de material abaixo de 0,010 mm, indicando portanto que o moinho de barras não é responsável pela geração excessiva de lamas ( $<0,010$  mm) do circuito de moagem da usina Boa Vista. Este fato pode ser decorrente da baixa porcentagem de sólidos do moinho de barras, o que diminui o tempo de residência do material dentro do moinho.

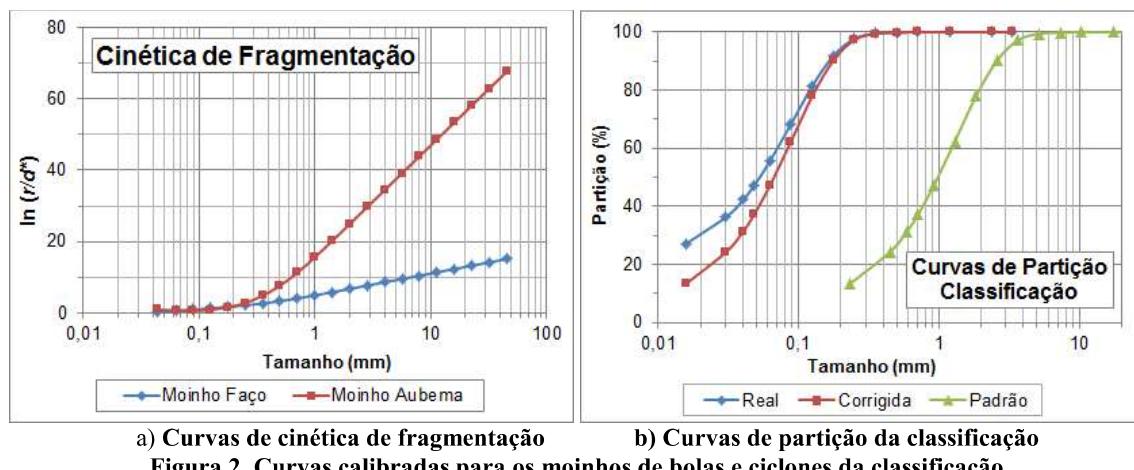
A carga circulante global do circuito de moagem de bolas para o Caso Base foi de 230%. A fração carga circulante encaminhada aos moinhos de bolas foi de 70% (159 t/h) para o moinho Faço e 30% (67 t/h) para o moinho Aubema.

O moinho Faço apresentou uma relação 2,2 com  $F_{80}$  e  $P_{80}$  de 0,500 mm e 0,224 mm, respectivamente. Enquanto, que o moinho Aubema indicou relação de redução de 2,8 com  $F_{80}$  e  $P_{80}$  de 0,500 mm e 0,177 mm, respectivamente. O circuito de moagem de bolas global indicou relação de redução de 11 com  $F_{80}$  (produto do moinho de barras) e  $P_{80}$  (*overflow* da classificação) de 0,857 mm e 0,076 mm, respectivamente.

A alimentação de ambos os moinhos de bolas (*underflow* da classificação) apresentaram 3,1% de material abaixo de 0,010 mm, enquanto que a descarga dos mesmos apresentaram 9,8% e 16,5% de material abaixo de 0,010 mm para os moinhos Faço e Aubema, respectivamente. Em termos globais o circuito de moagem de bolas indicou alimentação nova (produto do moinho de barras) e produto final (*overflow* da classificação) com 12,3% e 32,4% de material abaixo de 0,010 mm. Nota-se que o moinho Aubema tem maior contribuição na geração de lamas (< 0,010 mm) em relação ao moinho Faço.

Para o Caso Base, os moinhos Faço e Aubema indicaram potências de 397 kW e 261 kW, respectivamente, totalizando 658 kW. Portanto, para uma alimentação nova do circuito de moagem de bolas de 108 t/h foi indicado um consumo energético específico global de 6,09 kWh/t.

A Figura 2, a seguir, apresenta as curvas de cinética de fragmentação calibradas de ambos os moinhos de bolas, bem como as curvas de partição calibradas para a etapa de classificação.



a) Curvas de cinética de fragmentação

b) Curvas de participação da classificação

Figura 2. Curvas calibradas para os moinhos de bolas e ciclones da classificação.

Nota-se curvas ascendentes para ambos os moinhos de bolas. Como já observado o moinho Aubema apresentou capacidade de moagem muito maior do que o moinho Faço. Dois fatores podem explicar esta discrepança entre os moinhos bolas, quais sejam o baixo grau de enchimento do moinho Faço (22%) em contraste com o grau de enchimento do moinho Aubema de 35% e a baixa participação de material da carga circulante para o moinho Aubema de 30%, enquanto 70% é encaminhado ao moinho Faço.

A etapa de classificação apresentou partição de sólidos e água para o *underflow* de 69,7% e 15,9%, respectivamente. distribuição granulométrica do *underflow* da classificação indicou 26,8% passante na malha 0,106 mm (150# Tyler), assim a denominada fração *by pass*, ou seja, aquela que embora com granulometria de produto é reencaminhada ao moinho.

### 3.1. SIMULAÇÕES

Após análise e consolidação do Caso Base foi realizada a etapa de simulações, a qual consistiu no estudo de alternativas para os circuitos de moagem e classificação da usina Boa Vista, incluindo instalações de pré-classificações e reclassificações, bem como modificações das condições operacionais de ambos os moinhos de bolas. O objetivo dos cenários estudados para a usina Boa Vista foi reduzir a geração de lamas (<0,010 mm) por parte do circuito de moagem, de modo a possibilitar um aumento da recuperação mássica e de nióbio para as etapas subsequentes de deslamagem e flotação.

**Tabela 1. Descrição dos cenários simulados.**

Cenários	Descrição das Simulações
Caso Base	Modelagem e integração dos modelos calibrados individualmente
Cenário I	Pré-classificação antes à moagem de barras e exclusão do retorno da carga circulante à mesma
Cenário II	Pré-classificação após à moagem de barras
Cenário III	Reclassificação da carga circulante
Cenário IV	Redução da porcentagem de sólidos dos moinhos de bolas
Cenário V	Tamanho das bolas de reposição dos moinhos de bolas de 40 mm para 50 mm
Cenário VI	Tamanho das bolas de reposição dos moinhos de bolas de 40 mm para 65 mm
Cenário VII	Pré-classificação antes à moagem de barras, exclusão do retorno da carga circulante à mesma e reclassificação da carga circulante
Cenário VIII	Pré-classificação antes à moagem de barras, exclusão do retorno da carga circulante à mesma, reclassificação da carga circulante e mudança do tamanho das bolas de reposição dos moinhos de 40 mm para 65 mm
Cenário IX	Redução da porcentagem de sólidos dos moinhos de bolas e mudança do tamanho das bolas de reposição dos moinhos de 40 mm para 65 mm
Cenário X	Reclassificação da carga circulante, redução da porcentagem de sólidos dos moinhos de bolas e mudança do tamanho das bolas de reposição dos moinhos de 40 mm para 65 mm
Cenário XI	Pré-classificação antes à moagem de barras, exclusão do retorno da carga circulante à mesma, reclassificação da carga circulante, redução da porcentagem de sólidos dos moinhos de bolas e mudança do tamanho das bolas de reposição dos moinhos de 40 mm para 65 mm

**Tabela 2. Resultados globais dos cenários simulados.**

Cenários	Alimentação Nova da Usina		Produto do Circuito de Moagem		Diferença para o Caso Base t/h < 0,010 mm	% Ganha > 0,010 mm em relação ao Caso Base
	% Passante em 0,010 mm	t/h < 0,010 mm	% Passante em 0,010 mm	t/h < 0,010 mm		
<b>Caso Base</b>	<b>10,5</b>	<b>13,2</b>	<b>32,7</b>	<b>35,3</b>	-	-
Cenário I	10,5	13,2	29,6	32,0	3,3	9,3
Cenário II	10,5	13,2	29,5	31,9	3,4	9,6
Cenário III	10,5	13,2	29,1	31,5	3,8	10,8
Cenário IV	10,5	13,2	28,3	30,6	4,7	13,3
Cenário V	10,5	13,2	27,7	29,9	5,4	15,3
Cenário VI	10,5	13,2	25,7	27,8	7,5	21,2
Cenário VII	10,5	13,2	28,3	30,6	4,7	13,3
Cenário VIII	10,5	13,2	25,0	27,0	8,3	23,5
Cenário IX	10,5	13,2	24,6	26,6	8,7	24,6
Cenário X	10,5	13,2	24,5	26,5	8,8	24,9
Cenário XI	10,5	13,2	24,1	26,0	9,3	26,3

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, foi observado que todas as modificações propostas e quantificadas através da modelagem e simulação para o circuito de moagem Boa Vista (Cenários I a XI) acarretaram em produto final do circuito de moagem com ganho de material acima de 0,010 mm para as etapas subsequentes de deslamagem e flotação, possibilitando assim aumento das recuperações mássicas e metalúrgicas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

De modo geral, os cenários simulados propuseram mudanças para aumento do material >0,010 mm para o produto do circuito de moagem, tais como:

- *Maior eficiência da etapa de classificação com inclusão de pré-classificações e reclassificações:* deste modo reduz-se o *by-pass* de finos, ou seja, bem como a carga circulante de material que já atingiu granulometria de produto final para os moinhos, eliminando ou atenuando-se o fenômeno de sobremoagem – Cenários I; II; III; VII; VIII; X e XI;
- *Redução do tempo de residência com redução da porcentagem de sólidos dos moinhos de bolas:* desta forma reduz-se o tempo de residência do material no interior dos moinhos eliminando ou atenuando-se o fenômeno de sobremoagem – Cenários IV; IX; X e XI;
- *Aumento do tamanho de bolas de reposição:* é de conhecimento comum que o aumento do tamanho de bolas propicia a fragmentação de partículas mais grossas, com isto espera-se uma menor geração de material <0,010 mm com o para o produto final do circuito de moagem – Cenários V; VI; VIII; IX; X e XI.

#### **4. CONCLUSÕES**

O presente trabalho teve como objetivo propor alternativas de processo para o circuito de moagem Boa Vista de modo a propiciar uma menor geração de material <0,010 mm para o produto final do respectivo circuito, possibilitando maiores recuperações mássicas e metalúrgicas de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas etapas subsequentes de deslamagem e flotação.

Todas as alternativas simuladas propostas indicaram possibilidade de menor geração de material <0,010 mm e, consequentemente, aumento da recuperação mássica e de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. As alternativas propostas incluíram instalação de pré-classificações e reclassificações, redução do tempo de residência e aumento do tamanho de bolas dos respectivos moinhos.

O Cenário XI, o qual englobou todas as mudanças de processo propostas individualmente, indicou os melhores resultados com possibilidade de 26,3% de aumento de material >0,010 mm para as etapas subsequentes de deslamagem e flotação. Deste modo, indica-se para a operação da usina Boa Vista a mudança das variáveis de processo simuladas de modo individual, da mais simples para a mais complexa, propiciando um maior controle operacional do respectivo circuito.

#### **5. REFERÊNCIAS**

- EPSTEIN, B. The Material Description of Certain Breakage Mechanisms Leading to the Logarithmic-Normal Distribution. *J. Franklin Inst*, 1947.
- LYNCH, A. J.; RAO, T. C. Modelling and Scale-Up of Hydrocyclone Classifiers. *Proceedings XI Int Min Proc Congress*, Cagliari, 1975.
- NAGESWARARAO, K. Further developments in the modeling an scale up of industrial hydrociclones. PhD Thesis, University of Queensland (JKMRC), 1978.
- NAGESWARARAO, K. A generalized model for hydrocyclone classifiers. *AusIMM Proceedings*, Parkville, December 1995. v. 2, n. 300, 21 p.
- WHITEN, W. J. Ball mill simulation using small calculators. *Proceedings AusIMM*, 1976. p. 47-53.