

## ESTUDO DE ELEVAÇÃO DA CAPACIDADE DO CIRCUITO DE MOAGEM W DA USINA DE VAZANTE DA VOTORANTIM METAIS

BECHIR, J. L. C<sup>1</sup>, DELBONI, H<sup>2</sup>, GOMES, W. L<sup>3</sup>, METSAVAHT, V<sup>4</sup>, MARTINS, E. L. C<sup>5</sup>, PINA, P<sup>6</sup>, SOUZA, A. D<sup>7</sup>, LOPES, L. M. C<sup>8</sup>, VARGAS, F<sup>9</sup>, SIQUEIRA, J<sup>10</sup>, LOPES, M. M<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Votorantim Metais. jorge.bechir@vmetais.com.br

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

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo. wellingtonlacerdagomes@gmail.com

<sup>4</sup>Votorantim Metais. valerio.metsavaht@vmetais.com.br

<sup>5</sup>Votorantim Metais. eder.martins@vmetais.com.br

<sup>6</sup>Votorantim Metais. pablo.pina@vmetais.com.br

<sup>7</sup>Votorantim Metais. adelson.souza@vmetais.com.br

<sup>8</sup>Votorantim Metais. lucas.lobes.ll1@vmetais.com.br

<sup>9</sup>Votorantim Metais. flavia.vargas@vmetais.com.br

<sup>10</sup>Votorantim Metais. juliana.siqueira@vmetais.com.br

<sup>11</sup>Votorantim Metais. marina.lobes@vmetais.com.br

### RESUMO

Atualmente a Votorantim Metais conta com duas minas de Zinco no Brasil representadas pelas unidades de Vazante e Morro Agudo. A unidade Vazante apresenta capacidade instalada de 1,4 Mt/ano e produção de 130.000 t/ano de Zinco contido, a qual é estratégica para a manutenção da Votorantim Metais como 4ª maior produtora de Zinco do mundo. A queda progressiva do teor de Zinco da mina de Vazante faz com que seja cada vez mais difícil manter os níveis de produção da planta. Com isso, foi realizado um estudo de otimização de circuito de moagem com intuito de elevar a capacidade do circuito e reduzir a granulometria do produto final. Para isso, foram realizadas simulações de alternativas utilizando o software JKSimMet. Foi realizada uma amostragem completa na usina para calibração dos modelos e definição dos parâmetros de simulação. As simulações consideraram diversos cenários e equipamentos, tanto para britagem quanto para moagem. Após a realização dos estudos foi selecionado um moinho vertical de 3000 HP de potência para aumento de capacidade do circuito de moagem W da usina de Vazante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Moinho, Vazante, simulação, granulometria.

### ABSTRACT

Currently Votorantim Metals has two zinc mines in Brazil represented by Vazante and Morro Agudo unit. The Vazante unit has an installed capacity of 1.4 Mt / year and a production of 130,000 t / year of Zinc and is strategic for the maintenance of Votorantim Metais as the 5th largest producer of Zinc in the world. The progressive drop in zinc grade at Vazante mine makes it very difficult to maintain the plant production levels. Thus, an optimization study of the grinding circuit was carried out to increase the capacity of the circuit and reduce the granulometry of the final product., Simulations of crushing and grinding alternatives were performed using JKSimMet simulator. A complete sampling program was performed at the Vazante grinding plant to calibrate the models and to define the simulation parameters. The simulations carried out considered different scenarios and equipment, for both crushing and grinding circuits. A 3000 HP vertical mill was selected to increase the W grinding circuit capacity of the Vazante plant.

**KEY WORDS:** Mill, Vazante, simulation, grain size.

### LISTA DE SIGLAS

PAF: Peneiras de alta frequência

CIC: Ciclonos

## 1.0 INTRODUÇÃO

Atualmente a Votorantim Metais conta com duas minas de Zinco no Brasil representadas pelas unidades de Vazante e Morro Agudo. A unidade Vazante apresenta capacidade instalada de 1,4 Mt/ano e produção de 130.000 t/ano de Zinco contido, a qual é estratégica para a manutenção da Votorantim Metais como 4ª maior produtora de Zinco do mundo. A concentração de Willemita - mineral do minério de zinco na unidade de Vazante é realizada em duas usinas, denominadas C e W. A usina W consiste em britagem com quatro estágios, moagem em moinho de bolas, classificação por PAF, flotação, espessamento, filtragem e expedição (Figura 1).

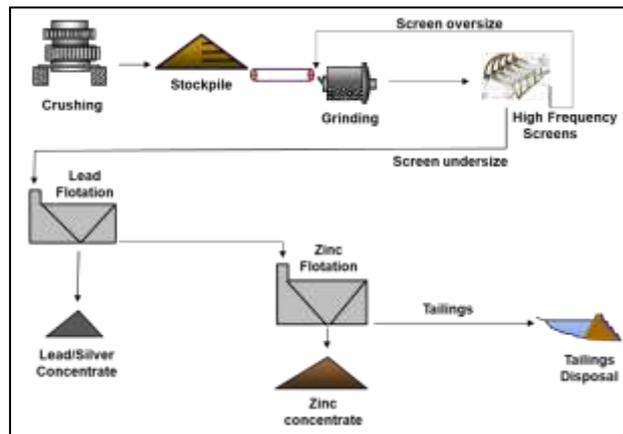


Figura 1. Fluxograma da usina de concentração W

Informações de sequenciamento de lavra de longo-prazo contidas no planejamento estratégico identificaram uma redução do teor de Zinco do minério lavrado (Figura 1).

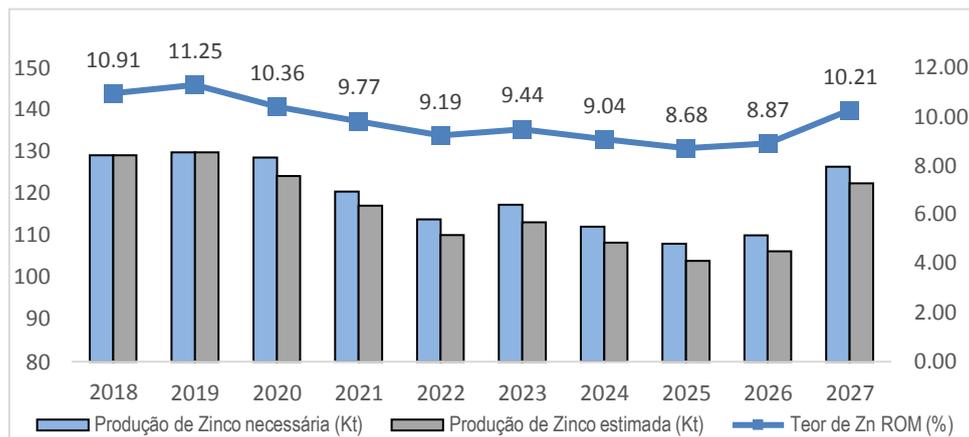


Figura 2 - Variação do teor de Zinco no ROM ao longo dos anos

De acordo com essas estimativas, a partir de 2020 haverá uma queda no teor de Zinco que se manterá até o ano de 2027. Isso pode gerar um *gap* de produção entre o valor previsto nas diretrizes de crescimento da empresa (coluna em azul) e sua real capacidade produtiva (coluna em cinza). Com isso, é necessário investigar a

elevação da capacidade produtiva da usina W com o objetivo de cumprir a produção esperada pela Votorantim Metais e evitar o possível gap de produção.

Bechir *et al.* (2016) realizaram estudos de liberação do minério Willemítico da mina de Vazante por meio de microscopia automatizada, bem como ensaios de flotação em bancada, para amostras com diferentes malhas de moagem (Tabela 1).

**Tabela 1 – Resultados de flotação em escala de bancada por faixa granulométrica. Adaptado de Bechir *et al.*, 2016.**

<b>Grinding product size</b>	<b>Zinc concentrate grade (%)</b>	<b>Zinc recovery (%)</b>	<b>Mass recovery (%)</b>
24% > 0,15 mm	38,51	65,20	20,16
18% > 0,15 mm	38,30	69,49	21,51
12% > 0,15 mm	38,12	78,51	24,51
6% >0.15 mm	38,27	80,33	25,15

De acordo com a Tabela 1, a diminuição da massa retida na malha de controle (0,15 mm) proporcionada pela moagem, resulta em aumento progressivo tanto da recuperação em massa quanto da recuperação metalúrgica de Zinco nos correspondentes ensaios de flotação, enquanto o teor de Zinco nos concentrados se mantiveram em patamares aceitáveis. Portanto, o estudo de elevação da capacidade do circuito de moagem W também considerou a possibilidade de reduzir a granulometria do produto, além do já citado aumento da capacidade de moagem.

## 2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A base para os estudos de aumento de capacidade da usina foi o estabelecimento de um Caso Base, ou seja, um balanço mássico e metalúrgico que representa a operação atual do circuito. Para tanto foi planejada e executada uma amostragem nas etapas de britagem e moagem do circuito W da usina de Vazante.

O fluxograma do circuito de moagem de W de Vazante consiste em estágio único de moagem em moinho de bolas em circuito fechado, configurado em modo direto com peneiras de alta frequência. Assim, a alimentação nova, proveniente de uma pilha de homogeneização do minério britado segue diretamente para o moinho de bolas, cujo produto verte sobre uma caixa de bombas e desta, é bombeado para as peneiras de alta frequência. A fração retida nas peneiras é encaminhada por gravidade para a alimentação do mesmo moinho, enquanto que a fração passante se constitui como produto final da etapa de moagem que é encaminhado para a flotação de Zinco.

Os fluxos amostrados na britagem e moagem foram:

1. Produto da britagem primária – Tag: 031TC-01;
2. Alimentação do peneiramento primário – Tag: 031TC-02;
3. Undersize do peneiramento primário – Tag: 031TC-04;
4. Produto da britagem terciária + Undersize do peneiramento primário – Tag: 031TC-05;
5. Produto da britagem quaternária – Tag: 031TC-12;
6. Oversize do 1º deck do peneiramento secundário – Tag: 031TC-06;
7. Produto final do circuito de britagem (Undersize do peneiramento secundário) – Tag: 031TC
8. Oversize do 2º deck do peneiramento secundário – Tag: 031TC-09.

9. Alimentação nova do circuito de moagem;
10. Descarga do moinho de bolas;
11. Alimentação das peneiras de alta frequência (PAF);
12. Oversize das peneiras de alta frequência (PAF);
13. Produto final do circuito de moagem (Undersize das peneiras de alta frequência).

As amostras obtidas foram enviadas ao laboratório de processos da unidade Vazante para serem peneiradas. O processamento dos dados e informações mediante o emprego do simulador JKSimMet resultou em um balanço de massa integrado do circuito de cominuição e, na sequência, da calibração dos respectivos modelos de equipamentos de processo, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 2. O resultado desta etapa foi, portanto, um modelo integrado denominado Caso Base. Os modelos matemáticos utilizados para calibrar os equipamentos do circuito de moagem da usina foram o Perfect Mixing Model, PMM (WHITEN, 1976) para o moinho de bolas; o modelo de Nageswararao (1978 e 1995) para hidrociclones e o modelo de Yoshioka e Hotta (1955) para peneiras.

O Perfect Mixing Model é um modelo de balanço populacional, no qual assume-se que todo o material no interior do moinho está perfeitamente misturado. Deste modo, o moinho se comporta como um equipamento de transformação de granulometria onde o material alimentado na  $i$ -ésima fração mais o material moído das frações mais grossas até o tamanho da  $i$ -ésima fração é igual ao produto da  $i$ -ésima fração somado ao material fragmentado da  $i$ -ésima fração.

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

O modelo de Yoshioka e Hotta (1955) para as peneiras consiste na parametrização da curva de partição padrão por meio do diâmetro mediano de partição ( $d_{50}$  corrigido) e coeficiente de inclinação ( $\alpha$ ) no segmento próximo ao  $d_{50}$  corrigido.

**Tabela 2 – Parâmetros de equipamentos, operacionais e de processo – Moagem W**

Parâmetros de Operação e Processo		Parâmetros do Moinho	
WI (kWh/st)	18,9	Potência (kW)	1950
Sólidos na Flotação (%)	28 a 32	Diâmetro (mm)	4400
F <sub>80</sub> Britagem (mm)	7,3	Comprimento (m)	6110
Densidade do Minério (t/m <sup>3</sup> )	3,1	% da Velocidade Crítica (%)	73,85
Abertura das PAF (mm)	0,15	Grau de enchimento (%)	39-41
Taxa máxima da britagem (t/h)	200	Diâmetro de bola de reposição (mm)	70

Após definição do Caso Base foram conduzidas simulações, segundo seis cenários específicos, cujo objetivo foi comparar diferentes alternativas para elevação da capacidade atual de moagem. Os cenários simulados consistiram em:

1. Inclusão de um britador Barmac em série, após o quarto estágio de britagem;

2. Inclusão de um britador Barmac em paralelo com o britador quaternário existente;
3. Inclusão de HPGR (High Pressure Grinding Roll) substituindo os britadores terciários e quaternários;
4. Inclusão de um moinho de bolas em série com o moinho atual;
5. Inclusão de um moinho vertical em série com o moinho atual e classificação com ciclones;

### 3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caso Base

A Figura 3 apresenta o fluxograma de processo e os resultados de vazões, porcentagem de sólidos e granulometria do Caso Base.

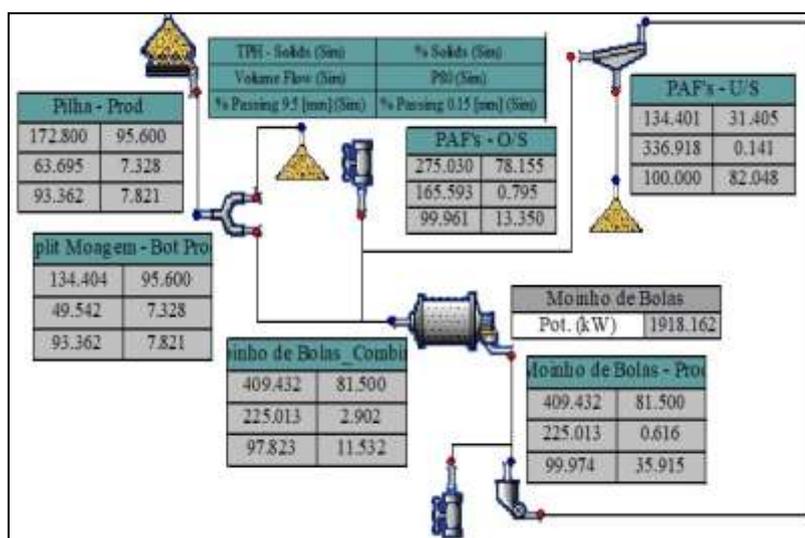


Figura 3 – Caso base consolidado

De acordo com a Figura 3, a vazão de sólidos de alimentação do circuito de moagem do Caso Base foi de 134 t/h, com granulometria apresentando praticamente 18% retido na malha 0,15 mm no produto. A mesma Figura 3 aponta uma vazão de sólidos na carga circulante que, neste caso é representada pela fração retida nas peneiras de alta frequência, de 275 t/h, que equivale a 205% em relação à vazão de alimentação nova do circuito.

#### 3.2 Resultados das simulações

As simulações foram realizadas em duas etapas distintas. Na primeira foram analisados os cenários descritos anteriormente para elevação da capacidade do circuito de moagem mantendo-se, porém, a malha de moagem, visando avaliar possíveis benefícios de britagem mais fina, bem como diferentes tipos de moinhos. A Tabela 3 apresenta os resultados das simulações preliminares realizadas. O modelo de Nageswararao *apud* Delboni (2003) foi empregado para simulação de ciclones.

**Tabela 3 – Resultados das simulações - Primeira etapa**

ID	Simulação	Vazão moagem (t/h)	Produto da Britagem	Produto Moagem		Equipamento de Classificação
			Passante em 9,5mm	(+ 0,15 mm)	(-0,037 mm)	
0	Caso Base (Cenário Atual)	153	94,0	18,0	41,8	NA
1	Barmac em série	153	97,7	24,0	38,3	Peneiramento
2	Barmac em paralelo	153	97,7	24,0	38,3	Peneiramento
3	HPGR	153	99,3	21,5	41,5	Peneiramento
4	Moinho de Bolas (800 kW)	153	94,0	18,3	44,1	Hidrociclone
5	Moinho Vertical (1180 kW)	153	94,0	18,2	44,1	Hidrociclone

Os resultados listados na Tabela 3 indicam que a simples diminuição da malha de britagem proporcionada pela inclusão de britador Barmac ou mesmo HPGR no atual circuito não resultou em diminuição na malha de moagem considerando-se o aumento de capacidade do circuito, de 134 t/h do Caso Base para 153 t/h.

Para ilustrar este aspecto (Figura 3), utilizou-se a equação de Bond (1952), conforme mostrada abaixo, para estimar a variação da energia necessária para realizar o trabalho de moagem, segundo variações no  $F_{80}$  o produto da britagem que, neste caso, é a alimentação da moagem. Os exercícios foram conduzidos mantendo-se constantes o  $P_{80}$  em 140  $\mu\text{m}$  e WI em 18 kWh/t.

$$E = 10WI \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

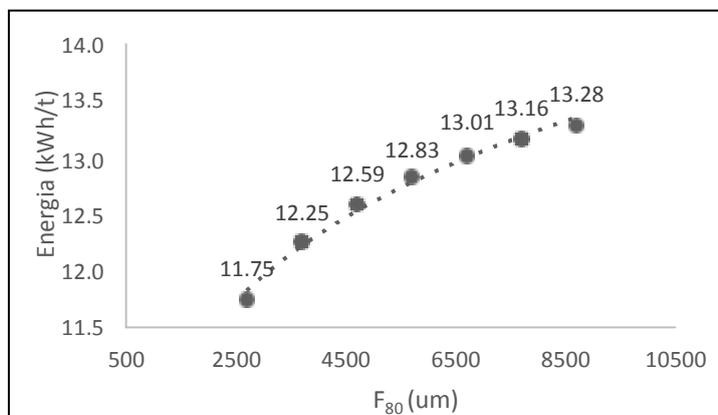
E: Energia (kWh/t)

WI: Work Index (kWh/t)

$F_{80}$ : Malha na qual passam 80% da alimentação ( $\mu\text{m}$ )

$P_{80}$ : Malha na qual passam 80% do produto ( $\mu\text{m}$ )

Neste gráfico nota-se que somente reduções significativas de  $F_{80}$  resultam em diminuições relevantes na energia necessária para moer um minério específico a uma determinada granulometria.



**Figura 4 - Energia necessária para cominuição em função do  $F_{80}$**

As demais alternativas simuladas na fase preliminar indicaram potencial de aumento de capacidade do circuito mantendo-se a granulometria do produto da moagem que foi registrada no Caso Base. Embora fosse considerada tecnicamente viável, a alternativa de implantação de um moinho horizontal de bolas resultou em impossibilidade de acomodação de um equipamento com dimensões nominais de 3,4 m de diâmetro por 5,4 m de comprimento nas instalações industriais existentes.

A alternativa de moagem em um segundo estágio de moagem com moinho vertical foi, portanto, selecionada, devido à relativa pequena área para sua instalação. Com isso, na segunda etapa das simulações (Tabela 4) foram investigados diferentes tamanhos de moinhos verticais, bem como diferentes condições de operação do equipamento e o circuito, com a utilização de ciclones ou peneiras de alta frequência para fechamento do segundo estágio de moagem. Nesta mesma segunda etapa foram adotados os seguintes parâmetros-alvo em relação a granulometria do produto da moagem: 6% retido na malha 0,15 mm e máximo de 55% passante na malha 0,037 mm. Em cada caso foram avaliadas as capacidades máximas sustentáveis do circuito, incluindo um Fator de Projeto de 1,2.

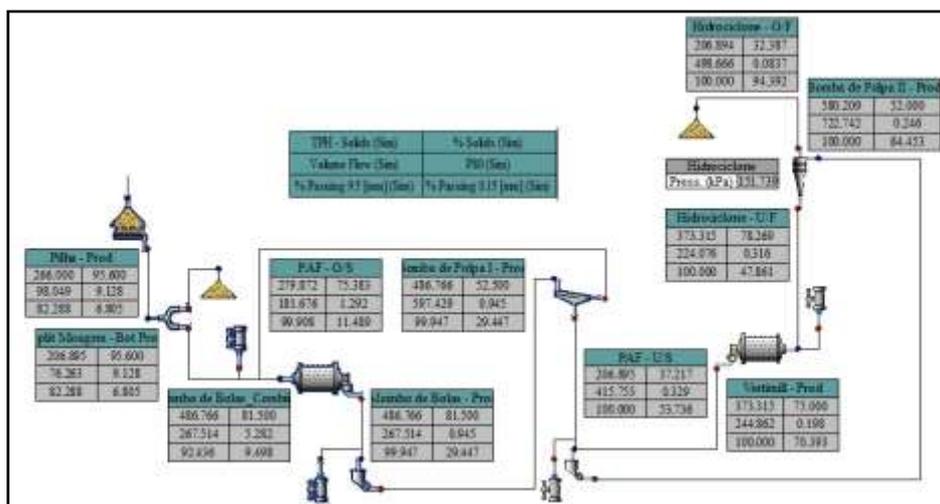
**Tabela 4 – Resultados das simulações - Segunda etapa**

Simulação	Potência do Moinho (HP)	Taxa de moagem (t/h)	Granulometria do Produto Final da Moagem (%)		Potência utilizada (HP)	Grau de Enchimento (%)	Abertura PAFs Atuais ( $\mu\text{m}$ )	CIC ou PAF ( $\mu\text{m}$ )
		Nominal/Projeto	(+150 $\mu\text{m}$ )	(-37 $\mu\text{m}$ )				
6	1500	137/164	6	57	1500	100	250	CIC
7	1500	140/168	6	51	1500	100	250	PAF (150 $\mu\text{m}$ )
8	3000	140/168	6	54	2200	73	500	CIC
9	3000	147/177	6	53	2300	77	500	CIC
10	3000	172/206	6	55	3000	100	500	CIC

A Tabela 4 indica que foram considerados dois tamanhos e respectivas potências instaladas de moinho vertical, respectivamente de 1500 HP e 3000 HP.

As simulações 6 e 7 mostram que a utilização de moinho com potência de 1500 HP resultou em capacidades nominais de 137 t/h e 140 t/h, respectivamente para emprego de ciclones e PAFs, segundo as especificações granulométricas estipuladas. No entanto, o emprego de moinho vertical de 3000 HP mostrou capacidades progressivamente mais altas em função do aumento do grau de enchimento do equipamento. Neste caso, todas as simulações foram executadas com variação da malha das telas da PAFs existentes, assim como emprego de ciclones para fechamento do circuito da segunda etapa de moagem. Este equipamento apresentou, portanto, flexibilidade de operação, pois sua capacidade máxima (172 t/h) é superior à estipulada para o projeto (153 t/h). A granulometria de 6% retido em 0,15mm e de no máximo 55% passante na malha de 0,037 mm foi atingida em todas as simulações realizadas com o moinho de 3000 HP.

A Figura 5 mostra o fluxograma do circuito de moagem completo simulado com o moinho vertical incluído (dados da simulação 10).



#### 4.0 CONCLUSÃO

O estudo de otimização do circuito de moagem W da usina de Vazante da Votorantim metais contemplou amostragem e calibração do Caso Base para simulação de diferentes cenários dos estágios de britagem, moagem e classificação. Os resultados das simulações preliminares nos processos de britagem indicaram pequeno potencial de expansão do circuito. Já as simulações do circuito de moagem indicaram que a instalação de um novo moinho vertical de potência de 3000 HP e capacidade modulada em função do seu grau de enchimento, inclusive excedendo o valor nominal estipulado, confere flexibilidade ao circuito, de forma a atingir a principal especificação granulométrica do produto do futuro circuito de moagem, de 6% retido na malha 0,15 mm.

#### 5.0 REFERÊNCIAS

- BECHIR, J. L. C et al. Determination of ideal grinding product size for zinc flotation in Vazante unit – WMC 2016. Votorantim Metais. 2016.
- BOND, F. C. The Third Theory of Comminution. Transactions AIME, May 1952. p. 484-494.
- DELBONI JR, H. Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação. Apostila do curso PMI-5004. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- LYNCH, A. J.; RAO, T. C. Modelling and Scale-Up of Hydrocyclone Classifiers. Proceedings XI Int Min Proc Congress, Cagliari, 1975.
- NAGESWARARAO, K. A generalized model for hydrocyclone classifiers. AusIMM Proceedings, Parkville, December 1995. v. 2, n. 300, 21 p.
- NAGESWARARAO, K. Further developments in the modeling an scale up of industrial hydrociclones. PhD Thesis, University of Queensland (JKMRC), 1978.
- NAPIER-MUNN, T.J; MORRELL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland. 2005. 413p.
- WHITEN, W. J. Ball mill simulation using small calculators. Proceedings AusIMM, 1976. p. 47-53.
- YOSHIOKA, N.; HOTTA, Y. Liquid cyclone as a hydraulic classifier. Chemical Engineering, Japan, 1955. p. 632-640.