

# USINA DE PELOTIZAÇÃO DA VALE – MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE CIRCUITO DE MOAGEM <sup>1</sup>

Vladmir Kronemberger Alves <sup>2</sup>  
Leonardo Monteiro <sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar e consolidar os estudos visando à avaliação de desempenho operacional do circuito de moagem de uma planta de pelotização da Vale em Tubarão operando em circuito aberto. Será apresentada a metodologia adotada pela Vale para levantamento de parâmetros de quebra e para a simulação de circuito em escala contínua. As etapas dos estudos foram: ensaios de moagem em escala de laboratório, levantamento de parâmetros de quebra, simulação para determinação das condições ótimas de operação do circuito industrial e validação dos resultados em planta piloto. Baseados nestes estudos foram definidas as condições ótimas de operação do circuito de moagem industrial.

**Palavras-chave:** Moagem; Otimização; Simulação; Pelotização.

## PELLET FEED PREPARATION PLANT OF VALE – MATHEMATICAL MODEL AND SIMULATION OF GRINDING CIRCUIT

## Abstract

The objective of this work is to present and consolidate studies aiming at the evaluation of the operational performance of a grinding circuit at a Vale pellet feed preparation plant in Tubarão, operating in open circuit. The methodology implemented for the estimation of selection and breakage function parameters is presented as well as the resulting simulation for the industrial scale open circuit. The study consists of the following steps: laboratory scale batch grinding tests for breakage parameters; industrial milling simulations for the determination of optimal performance conditions and; validation in pilot scale tests. Based on these results, optimal conditions have been determined for the industrial mill.

**Key words:** Grinding; Optimization; Simulation; Pellet feed preparation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

<sup>2</sup> MSc, Centro de Desenvolvimento Mineral – Vale – ROD. BR-262 - KM 296 Sta Luzia. E-mail: vladmir.alves@vale.com

<sup>3</sup> Departamento de Pelotização - Vale - Av. Dante Michelini 5500 Ponta de Tubarão. E-mail: leonardo.monteiro@vale.com

# 1 INTRODUÇÃO

A Vale possui atualmente sete plantas de pelotização localizadas no Complexo Industrial de Tubarão, em Vitória-ES, e que utilizam o processo de moagem a úmido do pellet feed através de moinhos de bolas em circuito fechado. Foram desenvolvidos alguns estudos com o objetivo de avaliar a viabilidade e o desempenho de um processo de moagem do pellet feed e insumos (calcário e antracito) em circuito aberto, visando à otimização dos parâmetros de operação deste circuito.

Este trabalho tem como objetivo apresentar e consolidar os estudos visando à avaliação de desempenho operacional do circuito de moagem de uma planta de pelotização da Vale em Tubarão operando em circuito aberto com um moinho de 5,5 x 12 m e 77% da velocidade crítica. A metodologia de escalonamento de circuitos de cominuição da Vale consta de etapas de ensaios de bancada, planta piloto e simulação.<sup>(1)</sup> Neste trabalho será descrita a metodologia utilizada para levantamento de parâmetros de quebra (função seleção e função quebra),<sup>(2-4)</sup> ensaios em planta piloto, validação e calibração dos modelos matemáticos e simulação do circuito industrial.

Foram utilizados os softwares: VKA Ball Mill Sizing 2.0, VKA WI Operacional, JKSimMet 5.1, ModSim 3.6.22 e Moly Cop Tools, BatchMill 1.4.0, para levantamento de parâmetros de quebra, avaliação do consumo específico de potência e simulação do circuito proposto.

Nos capítulos seguintes, será feita uma breve descrição dos ensaios realizados e metodologia de estudo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Ensaios em Moinho de Bancada

O moinho utilizado tem diâmetro e comprimento internos de 254 mm, revestido com 8 aletas igualmente espaçadas (Figura 1). As aletas fazem o papel de levantadores da carga (*lifters*). O teste em moinho de bancada requer amostras de material com a mesma distribuição granulométrica da alimentação do moinho industrial. As bolas também devem ter a mesma distribuição de tamanho do moinho que se deseja simular, no caso em questão, utilizou-se bolas com tamanho superior de 31,8 mm e 25,4 mm, simulando uma distribuição de carga balanceada de Bond. A amostra foi moída a úmido na mesma porcentagem de sólidos em massa do circuito piloto / industrial, nos seguintes tempos: 0,5 minutos; 2,0 minutos; 4,0 minutos; 8,0 minutos e 14,0 minutos. A rotina de trabalho foi organizada de forma que, ao término de cada moagem, uma alíquota representativa do conteúdo do moinho de aproximadamente 100 g fosse peneirada a úmido e retornada ao moinho para a continuação do teste, após secagem. O teste foi feito com carregamento de bolas de 35%, enchimento  $U = 100\%$  e um percentual da velocidade crítica de 77% e 68%. Como os resultados de cada tempo de moagem são obtidos rapidamente, o erro experimental é minimizado no laboratório.



**Figura 1** – Moinho 254 mm x 254 mm CDM padrão Austin et al – Vale.

## **2.2 Ensaios Piloto**

Foram enviadas para o Centro de Desenvolvimento Mineral da Vale (CDM) amostras de antracito, calcário e pellet feed. Com estes materiais foram compostas duas amostras, uma com antracito na granulometria natural (< 13,4 mm) e outra britada a 100% passante em 2 mm, as amostras foram blendadas na seguinte proporção: 1.000 kg de pellet feed, 49,5 kg de calcário e uma amostra com 14 kg de antracito < 2.mm e outra com 14 kg antracito com granulometria natural. As amostras foram utilizadas para testes piloto em circuito aberto, na unidade de moagem piloto do CDM, em Santa Luzia, sob condições controladas e conhecidas. Foram realizados 5 testes conforme a Tabela 1.

**Tabela 1:** Condições dos ensaios piloto de moagem - CDM

Teste	1	2	3	4	5
Diâmetro (m)	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
Comprimento (m)	0.406	0.406	0.406	0.406	0.406
% Enchimento	35	35	35	35	35
% Vc	77	77	77	68	77
% Sólidos	80	80	80	80	80
Bola (mm)	31.8	31.8	31.8	31.8	25.4
Granulometria Antracito	< 2 mm	< 2 mm	< 13,4 mm	< 13,4 mm	< 13,4 mm

Todos os dados relevantes foram cuidadosamente catalogados. Do ponto de vista do escalonamento de moinhos, os testes de moagem em batelada produzem estimativas dos parâmetros das funções quebra e seleção sob condições normais de quebra por impacto. Estes testes não produzem resultados que possam ser utilizados para a descrição dos efeitos de transporte na moagem contínua, tais como efeitos de classificação na descarga do moinho, distribuição de tempos de residência, e outros efeitos reológicos. Assim, sempre que um moinho de escala industrial é projetado com base na técnica de escalonamento via simulação, testes piloto são realizados para o estudo dos efeitos extra laboratoriais descritos acima. Seja qual for a técnica de escalonamento utilizada, deve-se realizar testes em escala piloto, com o objetivo de validar os dados obtidos em laboratório e obter-se dados que assegurem a acuracidade da técnica de escalonamento empregada.<sup>(3)</sup>

### 3 RESULTADOS

Foi conduzida uma campanha de ensaios em escala de laboratório e piloto para se avaliar o desempenho do circuito de moagem em configuração aberta.

Conforme descrito anteriormente foram preparadas 2 amostras uma com o antracito britado a 100% passante em 2 mm e outra com a antracito na granulometria natural (< 13,4 mm).

Foram realizados ensaios em moinho de bancada para levantamento de parâmetros de quebra.<sup>(2)</sup> Na tabela 2 são apresentados os valores de função seleção e quebra para a amostra estudada.

**Tabela 2:** Função seleção e função quebra

Teste	1	2	3	4	5	6	7	8
% Enchimento	35	35	35	35	35	35	35	35
% Vc	77	77	68	68	77	77	68	77
% Sólidos	80	80	80	80	80	80	80	80
Bola (mm)	31.8	25.4	31.8	25.4	31.8	25.4	31.8	25.4
Granulometria Antracito	< 13,4 mm	< 13,4 mm	< 13,4 mm	< 13,4 mm	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm
<b>Função Seleção</b>								
S1E	3.65	3.95	15.68	5.94	5.39	6.27	3.57	5.25
Z1	0.86	0.86	1.93	1.04	1.12	1.5	0.07	0.001
Z2	-0.19	-0.19	-0.001	-0.18	-0.16	-0.03	-0.53	-0.63
<b>Função Quebra</b>								
Gamma	0.5	0.5	0.5	0.5	0.74	0.5	0.5	0.5
Beta	4.87	4.34	5	4.4	3.38	4.55	4.55	5
Phi	1	0.95	0.93	1	1	0.93	0.9	1

Foi realizada uma campanha piloto de moagem em circuito aberto (mesma configuração do circuito industrial) em um moinho 0,406 m x 0,406 m (Figura 2) nas condições descritas na Tabela 1.



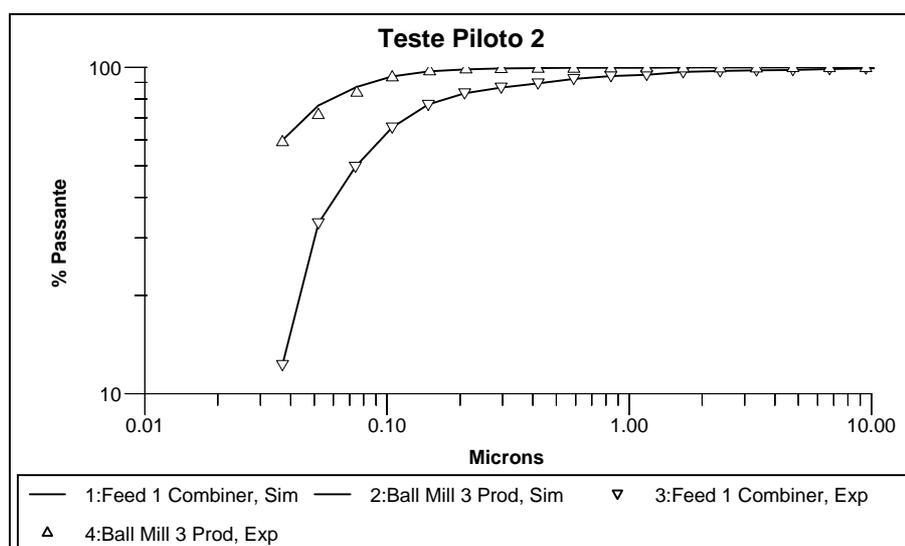
**Figura 2:** Moinho 0,406 m x 0,406 m - CDM.

Os resultados dos ensaios de moagem piloto são apresentados na Tabela 3.

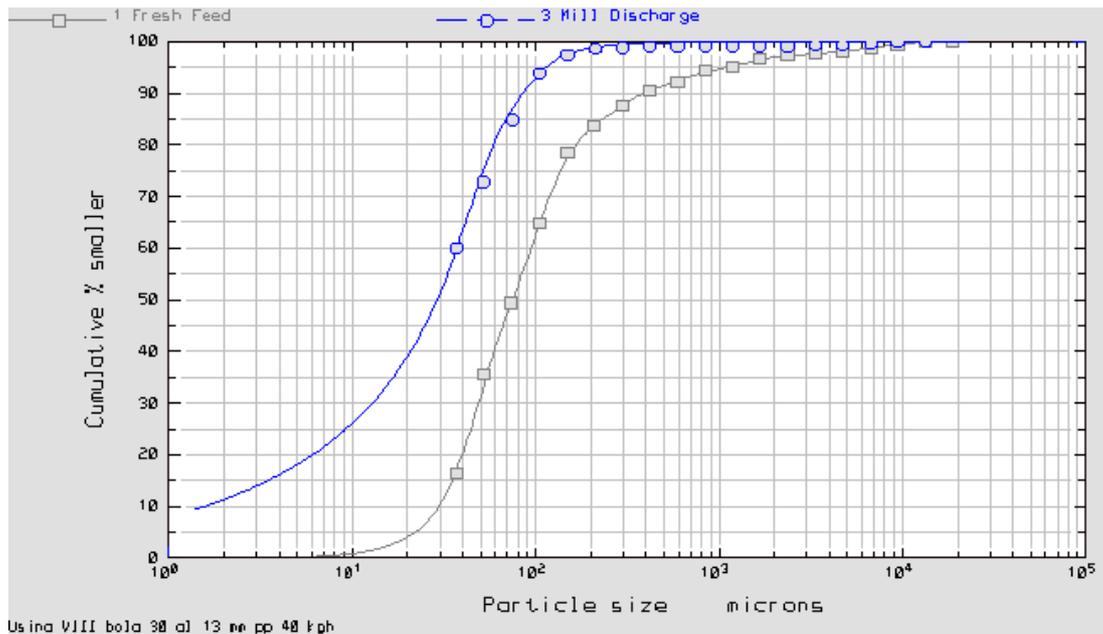
**Tabela 3:** Resultado dos ensaios piloto de moagem - CDM

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Potência líquida (kW)	0.49	0.49	0.49	0.44	0.48
Alimentação (kg/h)	75.00	45.00	40.00	40.00	40.00
Consumo específico (kWH/t)	6.53	10.89	12.25	11.00	12.00
Passante em 0,150 mm	94.39	97.85	97.39	97.82	98.12
Pssante em 0,044 mm	57.06	66.04	67.06	65.74	62.35

Baseado nos ensaios de bancada e piloto foram feitas simulações dos ensaios piloto utilizando os modelo de simulação de moagem disponíveis nos softwares ModSim 3.6.22 e JKSimMet 5.1. Nas Figuras 3 e 4 são apresentados dois exemplo das distribuição granulométricas obtidas nos ensaios piloto (pontos) e as previstas pelo modelo (linha).



**Figura 3:** Resultados do escalonamento para os testes piloto. Os gráficos mostram a distribuição de tamanhos no produto do moinho piloto, medida (símbolos) e prevista (linhas contínuas). Teste piloto 2 – JKSimMet 5.1.



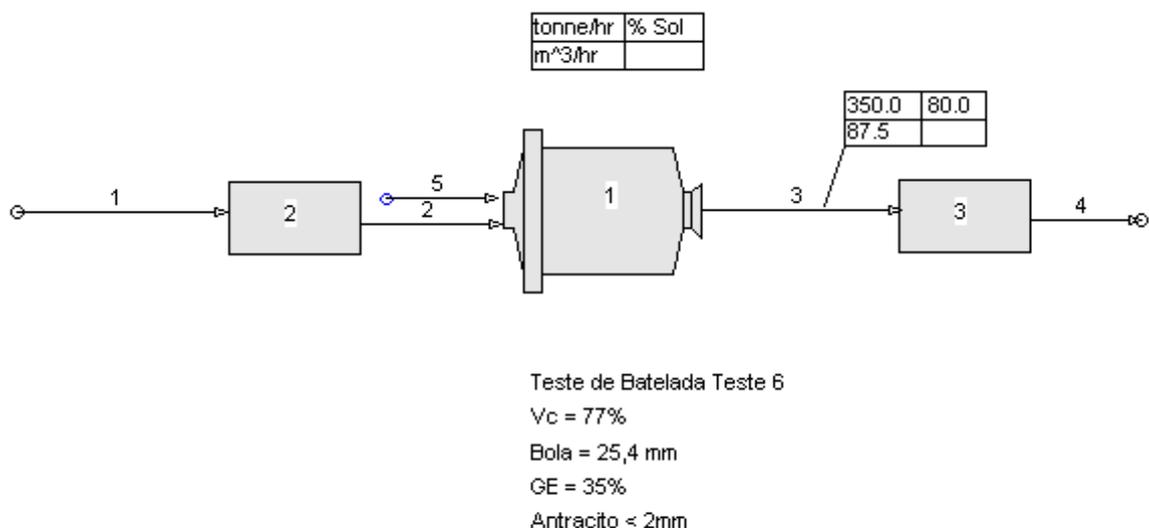
**Figura 4:** Resultados do escalonamento para os testes piloto. Os gráficos mostram a distribuição de tamanhos no produto do moinho piloto, medida (símbolos) e prevista (linhas contínuas). Teste piloto 3 – ModSim 3.6.22.

Vale ressaltar que os teste em escala piloto foram realizados focando um produto com uma % retida máxima em 0,150 mm de 2%.

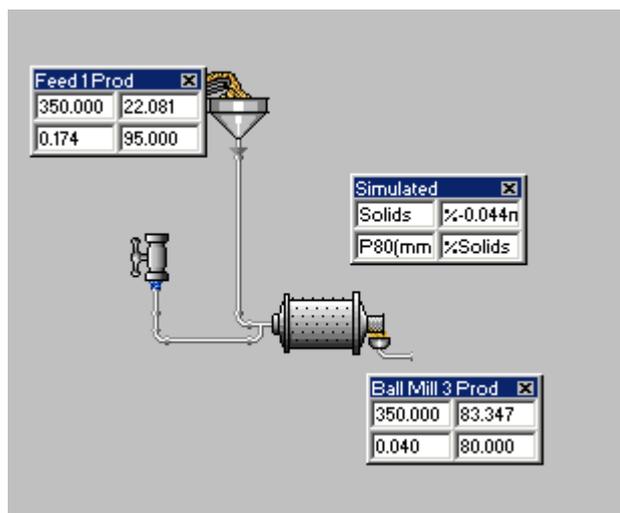
Recomenda-se realizar testes piloto em moinhos de maior escala para se validar os estudos.

#### 4 DISCUSSÃO

Observando-se as simulações do produto dos testes em escala piloto pode verificar que os modelos utilizados previram bem o desempenho do moinho em escala contínua, deste modo, foi realizada a simulação do circuito industrial utilizando-se os modelos acima (Figuras 5 e 6).



**Figura 5:** Simulação do circuito industrial – Software ModSim 3.6.22.



**Figura 6:** Simulação do circuito industrial – Software JKSimMet 5.1.

As simulações foram realizadas com uma taxa de alimentação nova do circuito de 350 t/h (mesma taxa de alimentação desejada no circuito industrial), os resultados estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4:** Resultados das simulações para previsão de desempenho do circuito de moagem industrial

Simulação	1	2	3
Diâmetro (m)	5.5	5.5	5.5
Comprimento (m)	12	12	12
% Enchimento	35	35	35
% Vc	77	77	77
% Sólidos	80	80	80
Bola (mm)	31.8	25.4	25.4
Granulometria Antracito	< 13,4 mm	< 13,4 mm	< 2 mm
Alimentação (t/h)	350	350	350
% Passante (0,150 mm)	99	99	98.5
% Passante (0,044 mm)	<62	70-73	73-80

No circuito industrial além de se ter um produto com no máximo 2% retido em 0,150 mm, objetiva-se também uma porcentagem passante em 0,044 mm de no mínimo 80%.

Baseado nas informações disponíveis até o momento recomenda-se operar o moinho com bolas de 25,4 mm, maior porcentagem de sólidos possível e britar o antracito < 2mm.

## 5 CONCLUSÃO

Baseados nos estudos de bancada e piloto com amostra da alimentação da Usina industrial recomenda-se: britar o antracito a 100% menor do que 2 mm, operar o moinho com bolas de 25,4 mm e maior porcentagem de sólidos possível. Estes dados devem ser confirmados em um moinho piloto de maior escala.

Recomenda-se fazer um estudo bem detalhado do perfil dos revestimentos a serem utilizados nos moinhos industriais, para se evitar quebra excessiva de revestimento causado pelo impacto das bolas, devido à elevada porcentagem da velocidade crítica destes moinhos (% 77 da velocidade crítica).

## REFERÊNCIAS

- 1 Alves, V.K. e Gonçalves, K.L.C. Methodology for scale up of grinding and flotation circuits of CVRD's new projects. Proc. XXXVIII Annual Meeting Canadian Mineral Processors, p. 567-576, Ottawa, Canada, 2006.
- 2 Galery, R., Andrade, D.G, Alves, V.K, 1994, Simulação de Circuitos de Moagem: Determinação de Parâmetros de Quebra, Anais XV CILAMCE, Belo Horizonte, 2p. 1005 – 1014;
- 3 Alves V.K., Galery R., Peres A E. C, Schneider C. L. "Optimization of Mill Charge Using Simulation", Comminution 2004, Perth, Australia, March 2004
- 4 Alves, V.K., Freitas R.,Vieira, J.R., Costa E., Bezerra H. "ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DO CIRUITO DE MOAGEM DE ANTRACITO DA VALE – PLANTA II", XXIII ENTMME – Gramado - RS, Setembro/Outubro 2009.
- 5 Austin, Klimple & Luckie, Process Engineering of Size Reduction, AIME/SME, 1984.