



# AUMENTO DE PRODUTIVIDADE DOS ENSAIOS DE MOAGEM EM ESCALA DE LABORATÓRIO, UTILIZANDO EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SIMPLES\*

Tatiane Aparecida Rocha Gonçalves<sup>1</sup>

Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira<sup>2</sup>

Nilson Nedes de Paula<sup>3</sup>

Rodrigo Fina Ferreira<sup>4</sup>

Joaquim Donizetti Donda<sup>5</sup>

## Resumo

Dentro da caracterização tecnológica do minério de ferro, percebe-se o aumento da realização de ensaios de moagem em escala de laboratório, em função do empobrecimento das principais jazidas de minério de ferro e conseqüentemente redução do grau de liberação do quartzo. Esse é o principal mineral de ganga do minério de ferro, e para sua liberação é necessário moagem. O Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale tem como procedimento a execução de ensaios exploratórios de moagem para a definição do tempo necessário partindo de um *top size* de 2 mm até obter um produto com *determinado % retido em 0,15mm, a malha de controle da moagem primária*. A definição desse tempo era realizado por tentativa e erro, ou seja, fazia-se uma moagem em um tempo inicial, e posteriormente variava-se o mesmo até alcançar a granulometria desejada no produto moído. Este processo torna a atividade morosa, sendo necessário a realização em média de até 5 ensaios para a definição do tempo de moagem. De uma forma simples aplicando a equação de Donda-Rosa utilizando o tempo de moagem, a determinação do tempo de moagem para chegar à granulometria desejada é normalmente atingida na segunda moagem. Os resultados obtidos até o momento são promissores, mostrando ser possível a utilização dessa equação para prever o tempo de moagem. Com isto, obteve-se um ganho de produtividade uma vez que a quantidade média de ensaios exploratórios necessária reduziu-se de quatro para no máximo dois.

**Palavras-chave:** Moagem; Aumento produtividade; Equações matemáticas simples.

## INCREASE OF GRINDING LABORATORY TESTS PRODUCTIVITY BY USING SIMPLE MATH EQUATIONS

### Abstract

Within the iron ore technological characterization, we observe the trend of increasing the number of grinding laboratory tests, due to the impoverishment of the iron ore major deposits and consequently the reduction of quartz liberation degree. This is the iron ore main mineral gangue, and grinding is necessary to liberate it. Vale's Centro de Pesquisas Tecnológicas has a procedure to execute exploratory grinding tests to define the required time starting from a top size of 2 mm to obtain a product with a certain % retained on 0.15 mm, the control mesh of primary grinding. This time use to be performed by trial and error procedure, ie initially the grinding test is conducted by an initial time, and then this time is varied to achieve the desired particle size in the grinded product. As a result the process time become lagging, conducting on average up to five tests are necessary to obtain the required grinding time. By using the Donda-Rosa's equation, the grinding time to reach the desired particle size is normally achieved in the second grinding. The obtained results so far are promising, showing to be possible to use this equation to predict the grinding time. As a result, this new method gave a productivity gain once the average number of required exploratory tests were reduced from four to at the most two.

**Keywords:** Grinding; Increase productivity; Simple math equation.

<sup>1</sup> Engenheira de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Mina de Alegria, Vale, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Mina de Alegria, Vale, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Mina de Alegria, Vale, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Mina de Alegria, Vale, Brasil.

<sup>5</sup> Gerente Técnico, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Mina de Águas Claras, Vale, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

O contexto atual do mercado de minério de ferro consiste no empobrecimento de suas jazidas minerais, conseqüentemente redução do grau de liberação de seu principal mineral de ganga, o quartzo, sendo necessário a aplicação de processos de cominuição tais como a moagem para a liberação das associações minerais.

No Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale é realizado a caracterização tecnológica de novos minérios de ferro a serem explorados pela empresa e devido o novo cenário mundial deste minério, ensaios de moagem em bancada tornou-se uma atividade rotineira do laboratório.

Como cada minério apresenta uma malha de moagem adequada para alcançar a liberação das fases minerais, a definição do tempo a ser aplicado para obter a granulometria desejada era realizada por tentativa e erro. Este procedimento consistia em fazer uma moagem em um tempo inicial, e posteriormente alterava-se o mesmo até conseguir a distribuição granulométrica esperada no produto moído. Este processo torna a atividade morosa, sendo necessário a realização em média de 4 ensaios para definição do tempo de moagem.

De uma forma simples aplicando a equação de Donda-Rosa utilizando o tempo de moagem, a determinação do tempo de moagem para chegar à granulometria desejada é normalmente atingida na segunda moagem. Os resultados obtidos até o momento são promissores, mostrando ser possível a utilização dessa equação para prever o tempo de moagem. Com isto, obteve-se um ganho de produtividade uma vez que a quantidade média de ensaios exploratórios necessária reduziu-se de quatro para no máximo dois.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar a equação Donda-Rosa aplicada para a determinação do tempo de moagem em bancada necessário para alcançar a granulometria desejada, com intuito de aumentar a assertividade e produtividade desses ensaios no Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale.

## 1.3 Revisão da Literatura

Anteriormente o ensaio de moagem em bancada (*batch*) no Centro de Pesquisas Tecnológicas era realizado de acordo com o método padrão em que se determina um tempo inicial a ser aplicado para a primeira moagem e em seguida eleva-se o mesmo até alcançar a granulometria desejada no produto moído. O método é empírico e requer inúmeros ensaios para determinar o tempo de moagem, além da necessidade da realização de ensaios periféricos como distribuição granulométrica para cada ensaio executado, o que aumenta significativamente o tempo da atividade conseqüentemente afetando a produtividade do laboratório.

Atualmente aplica-se a equação Donda-Rosa [1], que se originou a partir da necessidade de previsibilidade de consumo específico de energia no processo de re(moagem). Este método foi desenvolvido em moinhos de bolas em escala de bancada e confirmado nas instalações industriais de Germano da empresa Samarco.

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



Grandy em 1974 utilizou a relação apresentada a seguir para quantificar as diferenças entre o requerimento energético na moagem dos diferentes tipos de minério da mina de Germano da Samarco, considerando a energia diretamente proporcional ao tempo de moagem em bancada (apud Donda e Rosa [1]).

$$R_p = R_f * e^{-k.t} \quad (1)$$

Sendo:

$R_p$  = porcentagem retida na malha de interesse do produto;

$R_f$  = porcentagem retida na malha de interesse de alimentação;

$t$  = tempo de moagem em moagem *batch*;

$K$  = parâmetro característico do minério para a malha de interesse naquela condição de moagem.

A partir da equação (1) chega-se na equação de Donda-Rosa, para o tempo de moagem:

$$t = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{R_f}{R_p}\right) \quad (2)$$

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para avaliar a aplicabilidade da equação Donda-Rosa na determinação do tempo de moagem necessário para alcançar a granulometria desejada, foram selecionados 105 amostras de minério de ferro em que se aplicou a metodologia padrão por tentativa e erro e para 103 amostras realizou-se o ensaio de moagem utilizando a equação Donda-Rosa.

### 2.2 Métodos

O procedimento para acertar o tempo de moagem em bancada (*batch*) consiste nas seguinte etapas:

- 1) Inicialmente determina-se o percentual retido em 0,15mm na alimentação da moagem ( $R_f$ );
- 2) Em seguida, a amostra deve ser moída em um tempo determinado  $t_1$ . Este tempo empírico é estimado de acordo com o percentual retido na malha de interesse e não deve ser elevado, para apenas uma estimativa inicial.
- 3) Determina-se o percentual retido no produto moído ( $R_p$ ) desta primeira moagem;
- 4) Com as informações do percentual retido na alimentação ( $R_f$ ) e produto moído ( $R_p$ ), calcula-se o parâmetro característico do minério para a malha de interesse naquela condição de moagem aplicando a equação Donda-Rosa,

$$k = \frac{1}{t_1} \ln\left(\frac{R_f}{R_p}\right)$$

- 5) Com as informações do  $K$ , consegue-se determinar o tempo da segunda moagem:

$$t_2 = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{R_f}{R_{pd}}\right)$$

Sendo:

$R_{pd}$  = percentual retido no produto desejado.

- 6) Realizar a segunda moagem neste tempo determinado anteriormente e se necessário fazer uma terceira moagem para acertar com precisão.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



A Tabela 1 a seguir apresenta o modelo aplicado para a definição do tempo de moagem a partir da equação Donda-Rosa.

**Tabela 1** – Parâmetros para determinação do tempo de moagem através da equação Donda-Rosa.

Informações Necessárias	% Retido Malha Moagem
Britado a 2,0mm	47,60
Produto Moído Moagem Tempo Fixo	28,94
Produto Moído Final Desejado	20,00
Tempo Moagem Tempo Fixo (minutos)	3,00
Tempo 1 <sup>a</sup> Moagem (minutos)	5,23
K	0,166

*Fonte: Relatório interno – Centro de Pesquisas Tecnológicas (Vale Ferrosos).*

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

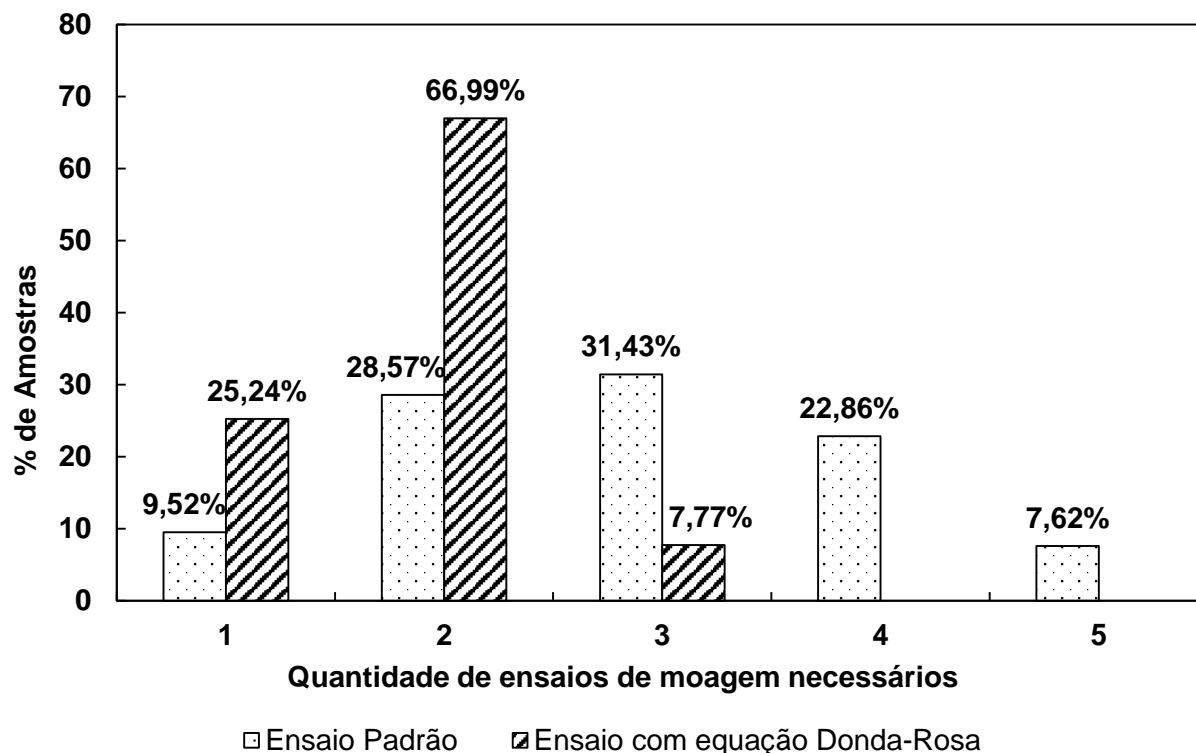
A partir dos resultados obtidos ao aplicar o método padrão de moagem em bancada e utilizando a equação Donda-Rosa, realiza-se uma análise estatística para avaliar a assertividade do método. A Tabela 2 a seguir apresenta a quantidade de ensaios necessários para alcançar a distribuição granulométrica desejada para os dois procedimentos. Verifica-se que aplicando a equação de Donda-Rosa não foi necessário quantidade superior a 3 ensaios de moagem.

**Tabela 2** – Resultados dos ensaios de moagem em bancada padrão e aplicando a equação Donda-Rosa.

Moagem	Quantidade de Amostras	Número de Ensaios de Moagem
Padrão	10,00	1
	30,00	2
	33,00	3
	24,00	4
	8,00	5
Aplicação equação Donda-Rosa	26,00	1
	69,00	2
	8,00	3

Ao analisar a Figura 01, percebe-se que o percentual de amostra que é necessário dois ensaios de moagem, eleva-se de 28,57% para 66,99%, enquanto a aplicação de 3 ensaios para obter a granulometria desejada reduz de 31,43% para 7,77%. Portanto a assertividade do método é comprovada, demonstrando elevada aplicabilidade para a previsão do tempo de moagem em bancada.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



**Figura 1** – Percentual de amostras distribuídas de acordo com a quantidade de ensaios necessários para alcançar a granulometria desejada.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados das análises estatísticas da aplicação do método padrão versus a utilização da equação Donda-Rosa para a determinação do tempo de moagem em bancada confirmam a assertividade deste último procedimento, reduzindo a quantidade de atividades para valores inferiores a 3 ensaios.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à gerência de Desenvolvimento de Tratamento de Minérios pela iniciativa da proposta e motivação ao desafio do estudo, à equipe técnica do Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale pelo apoio no desenvolvimento do trabalho e ao colega Joaquim Donda pelo incentivo na realização do estudo e implantação desta melhoria no laboratório.

## REFERÊNCIAS

- 1 Donda D, Rosa AC. A lei de moagem – Comprovação para minério de ferro. Fundação Gorceix. Ouro Preto, 2014, p.12-35.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.