

SIMULAÇÃO DE MOAGEM DE TALCO UTILIZANDO SEIXOS

63

**REGINA COELI C. CARRISSO
MARIO VALENTE POSSA**

PRESIDENTE DA REPÚBLICA

Itamar Franco

MINISTRO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

José Israel Vargas

PRESIDENTE DO CNPq

Lindolpho de Carvalho Dias

DIRETOR DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

José Ubirajara Alves

DIRETOR DE PROGRAMAS

Eduardo Moreira da Costa

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

DIRETOR

Roberto C. Villas Bôas

DIRETOR ADJUNTO

Peter Rudolf Seidl

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS - DTM

Adão Benvindo da Luz

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRATIVA - DME

Juliano Peres Barbosa

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE QUÍMICA INSTRUMENTAL - DQI

Roberto Rodrigues Coelho

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ESTUDOS E DESENVOLVIMENTO - DES

Ana Maria B. M. da Cunha

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO - DAD

Denyr Pereira da Silva

SIMULAÇÃO DE MOAGEM DE TALCO UTILIZANDO SEIXOS

Regina Coeli C. Carrisso*
Mario Valente Possa**

* Eng^o Metalúrgica, (PUC/RJ), Pós-Graduada em Engenharia Metalúrgica (PUC/RJ).

** Eng^o de Minas (UFRGS), Pós-Graduado em Tratamento de Minérios (UFRGS).

FICHA TÉCNICA

COORDENAÇÃO EDITORIAL
Francisco R. C. Fernandes

REVISÃO
Dayse Lúcia M. Lima

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA
Maria de Fátima Mello

ILUSTRAÇÃO
Jacinto Frangella

Pedidos ao:
CETEM - Centro de Tecnologia Mineral
Departamento de Estudos e Desenvolvimento - DES
Rua 4 - Quadra D - Cidade Universitária - Ilha do Fundão
21541590 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
Fone: (021) 260-7222 - Ramal: 218 (BIBLIOTECA)
Fax: (021) 2602837/2909196

Solicita-se permuta.
We ask for change.

Carriso, Regina Coeli C.
Simulação de moagem de talco utilizando seixos / Regina Coeli C.
Carriso e Mario Valente Possa. - Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1993.

24 p. - (Série Tecnologia Mineral, 63)

1. Talco - Metodos de simulaçã. 2. Moagem. 3. Seixos. I. Possa,
Mario Valente. II. Centro de Tecnologia Mineral. III. Título. IV. Série.
ISBN 85-7227-036-1
ISSN 0103-7382

CDD 622.3676

SIMULAÇÃO DE MOAGEM DE TALCO UTILIZANDO SEIXOS

63

**REGINA COELI C. CARRISSO
MARIO VALENTE POSSA**

APRESENTAÇÃO

A modelagem e simulação de circuitos minero-metalúrgicos vêm recebendo crescente atenção da indústria mineral no mundo.

Após os trabalhos pioneiros de desenvolvimento realizados pela Mount Isa, na Austrália, coordenados pelo Prof. Lynch, da University of Queensland, Brisbane, e que deram surgimento ao JK Mineral Research Center em Indooroopilly, Austrália, todos os grandes centros acadêmicos ou de tecnologia voltados à atividade minero-metalúrgica vêm se dedicando ao assunto.

No Brasil, alguns trabalhos de modelagem de circuitos minero-metalúrgicos têm sido desenvolvidos na COPPE/UFRJ, tanto no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, dos quais tive a oportunidade de participar como Professor Orientador de algumas teses, quanto no Departamento de Engenharia Química, notavelmente na área de ciclones e hidrociclones, pelo Prof. Massarani.

Quanto à aplicação de utilitários voltados à simulação, o CETEM vem se dedicando a esta atividade, bem como outras universidades e empresas minero-metalúrgicas, em especial a CVRD.

Este trabalho, de autoria de dois profissionais que vêm de longa data atuando na simulação, apresenta a aplicação da modelagem para a moagem com seixos e deverá encontrar uma boa aceitação por parte do leitor interessado.

Rio de Janeiro, 17 de junho de 1993

ROBERTO C. VILLAS BÔAS
Diretor

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------|----|
| RESUMO/ABSTRACT | 1 |
| 1. INTRODUÇÃO | 3 |
| 2. MODELO MATEMÁTICO | 4 |
| 3. TRABALHO EXPERIMENTAL | 6 |
| 3.1 Amostragem | 6 |
| 3.2 Ensaio de Laboratório | 7 |
| 4. CALIBRAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS | 8 |
| 4.1 Moagem em laboratório | 8 |
| 4.2 Moagem Contínua | 19 |
| 5. CONCLUSÕES | 23 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 24 |

RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático para moagem com seixos levando em consideração a variação da função taxa de quebra com o tempo, o que não é observado nos modelos tradicionais de moagem.

O estudo envolveu ensaios de moagem em escalas de laboratório e piloto com minério de talco proveniente de diferentes minas.

Os valores obtidos por simulação reproduziram aqueles conseguidos experimentalmente, vindo a confirmar a validade do modelo estabelecido.

ABSTRACT

A mathematical model for talc of the pebble-mill was developed considering the breakage rate variation with the time, a parameter that is not observed in other steady-state grinding models.

In the approach of this study batch laboratory and pilot tests were conducted with talc ore from different mines.

The simulated results reproduced the experimental values, confirming the established model.

1. INTRODUÇÃO

A realização do estudo de simulação de moagem de talco com seixos foi motivada a partir da execução, pelo CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, de um trabalho de beneficiamento de talco do Estado do Paraná, em escala piloto, onde fazia parte do circuito a operação de moagem com seixos.

Este trabalho teve por objetivo simular a moagem de talco utilizando seixos.

Tendo por base um modelo de moagem com bolas ⁽¹⁾, foi desenvolvido um modelo para moagem com seixos que levou em consideração a variação da função taxa de quebra com o tempo de moagem.

O trabalho constou das seguintes etapas:

- amostragem;
- ensaios de moagem;
- calibração do modelo matemático a partir da determinação dos parâmetros obtidos nos ensaios de moagem em laboratório e em usina piloto.

O minério de talco estudado foi proveniente da Mina Ferradinho, do Município de Bocaiúva do Sul; Mina Flor, do Município de Castro, e Minas Barra Moura, Barra Moura I, Barra Moura II e Mineiro 3, do Município de Ponta Grossa.

Os resultados obtidos por simulação reproduziram aqueles conseguidos experimentalmente, confirmando a validade do modelo estabelecido.

2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo utilizado para simular a moagem com bolas é um modelo cinético derivado de balanço populacional.⁽²⁾

Para que o modelo possa ser aplicado, dois tipos de informações são basicamente necessárias: a cinética de quebra das partículas e o tempo de residência médio das partículas no interior do moinho.

A cinética de quebra das partículas é convenientemente descrita, considerando-se a taxa com que os diferentes intervalos granulométricos perdem material devido à fragmentação – função taxa de quebra (**S**) – e a quantidade de material que sai de um intervalo granulométrico e se distribui nos intervalos inferiores – função distribuição de quebra (**B**).

A variação de massa retida para uma fração granulométrica i é dada por:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = -S_i M_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} S_j M_j(t) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad [1]$$

onde:

$M_i(t)$ é a fração de material remanescente na fração granulométrica i após um tempo t de moagem;

S_i , valores da matriz função taxa de quebra no intervalo i , durante o tempo t ;

$b_{i,j}$, valores da matriz função distribuição de quebra, sendo $i = j + 1, j + 2, \dots, n$

A Equação 1 representa o modelo cinético de primeira ordem para moagem descontínua.

Através da função distribuição de tempo de residência $h(t)$, o modelo cinético pode ser estendido para descrever a moagem contínua e ser representado pela equação:⁽³⁾

$$p_i = \int_0^{\infty} h(t) M_i(t) dt \quad [2]$$

onde:

p_i é a fração em massa do produto do moinho, em regime contínuo, no intervalo granulométrico i ;

$M_i(t)$ é a fração em massa no intervalo granulométrico i do produto do moinho para operação em regime descontínuo e

$h(t)$ a função de distribuição de tempo de residência (RTD).

Para aplicação direta do modelo proposto pelas Equações 1 e 2, estas estarão submetidas às seguintes condições de contorno:

- a moagem ser um processo cinético de primeira ordem, o que significa que para um dado intervalo granulométrico as partículas se quebram proporcionalmente à massa de material contida no intervalo, independentemente do tempo^(1,6,7) e
- a função distribuição de quebra (**B**) ser independente do tamanho do moinho e das variáveis operacionais do processo.^(2,4,5)

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 - Amostragem

Foram coletadas amostras do ROM da Mina Ferradinho, para determinar os valores das funções de quebra, da alimentação e da descarga do moinho, para calibração do modelo.

A tomada das amostras para calibração foi feita após a moagem entrar em regime, sob as seguintes condições:

- moinho Denver: diam. = 406mm, comp. = 813mm;
- velocidade crítica = 70%;
- volume ocupado pela carga = 40%;
- carga de seixos = 64kg;
- desgaste dos seixos = 1000g/t;
- densidade dos seixos = 2,6;
- distribuição da carga de seixos:

| Diam. Médio (mm) | Massa (%) |
|---------------------|--------------|
| 72 | 53 |
| 55 | 26 |
| 39 | 15 |
| 28 | 6 |

3.2 - Ensaio de Laboratório

Os ensaios de moagem foram realizados para determinar a função de distribuição de quebra (B) e a função taxa de quebra (S).

As condições para realização dos ensaios foram as seguintes:

a) Moagem

- . dimensões do moinho: diam. = 252mm; comp. = 196mm;
- . velocidade crítica = 70%;
- . volume ocupado pela carga = 40%;
- . carga de seixos = 6105g;
- . densidade dos seixos = 2,7;
- . distribuição da carga de seixos:

| Diam. Médio (mm) | Massa (%) |
|---------------------|--------------|
| 25 | 53 |
| 19 | 26 |
| 13 | 15 |
| 6 | 6 |

b) Amostra

O material utilizado nos ensaios de moagem foi preparado dividindo-se uma amostra do ROM em quatro conjuntos de frações granulométricas, sendo cada um deles submetido a três tempos de moagem.⁽³⁾

A Tabela 1 mostra esses quatro conjuntos e seus respectivos tempos.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica do material utilizado nos ensaios de moagem e os tempos para cada conjunto.

| Conjuntos | Frações (μm) | Retido (%) | Tempos/Conjunto (min) |
|----------------|---------------------------|------------|-----------------------|
| 1 ^a | + 2362 | 64,2 | 1,5 |
| | 2362 x 1651 | 20,4 | 2,5 |
| | 1651 x 1168 | 15,4 | 4,5 |
| 2 ^a | 1168 x 833 | 69,7 | 1,5 |
| | 833 x 589 | 20,2 | 2,5 |
| | 589 x 417 | 10,1 | 4,5 |
| 3 ^a | 417 x 295 | 54,8 | 2,0 |
| | 295 x 208 | 24,7 | 3,0 |
| | 208 x 147 | 20,5 | 6,0 |
| 4 ^a | 147 x 104 | 48,4 | 2,5 |
| | 104 x 74 | 26,0 | 4,0 |
| | - 74 | 25,6 | 7,5 |

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS

4.1 - Moagem em Laboratório

Os valores das funções distribuição de quebra ($b_{i,j}$) e função de taxa de quebra (S_i) foram estimados por um programa específico.⁽³⁾ Este programa apresenta uma entrada de dados simplificada, utilizando-se de formas funcionais, para a geração da matriz $B_{i,j}$ e do vetor S_i .

Essas formas funcionais são dadas por:

$$b_{i,j} = a_1 \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^{a_2} + (1 - a_1) \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^{a_3} \quad [3]$$

$$\ln S_i = c_1 + c_2 \ln x_i \quad [4]$$

Os resultados encontrados para a função distribuição de quebra são apresentados na Tabela 2, e foram obtidos a partir da Equação 3, sendo:

$$a_1 = 0,54; a_2 = 5,26 \text{ e } a_3 = 0,34.$$

Tabela 2 - Valores da função distribuição de quebra ($b_{i,j}$).

| MATRIZ DE QUEBRA $b_{i,j}$ | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| i/j | 1 | 2 | 3 | 4 | | 15 | 16 | 17 |
| 1 | 0,000 | | | | | | | |
| 2 | 0,504 | 0,000 | | | | | | |
| 3 | 0,119 | 0,504 | 0,000 | | | | | |
| 4 | 0,052 | 0,119 | 0,504 | 0,000 | | | | |
| 5 | 0,038 | 0,052 | 0,119 | 0,504 | | | | |
| 6 | 0,032 | 0,038 | 0,052 | 0,119 | | | | |
| 7 | 0,028 | 0,032 | 0,038 | 0,052 | | | | |
| 8 | 0,025 | 0,028 | 0,032 | 0,038 | | | | |
| 9 | 0,022 | 0,025 | 0,028 | 0,032 | | | | |
| 10 | 0,020 | 0,022 | 0,025 | 0,028 | | | | |
| 11 | 0,018 | 0,020 | 0,022 | 0,025 | | | | |
| 12 | 0,016 | 0,018 | 0,020 | 0,022 | | | | |
| 13 | 0,014 | 0,016 | 0,018 | 0,020 | | | | |
| 14 | 0,012 | 0,014 | 0,016 | 0,018 | | | | |
| 15 | 0,011 | 0,012 | 0,014 | 0,016 | | 0,000 | | |
| 16 | 0,010 | 0,011 | 0,012 | 0,014 | | 0,504 | 0,000 | |
| 17 | 0,079 | 0,089 | 0,100 | 0,112 | | 0,496 | 1,000 | 0,000 |

Na Tabela 3 são mostrados os valores da função taxa de quebra para o primeiro intervalo granulométrico (S_1) nos diferentes tempos de moagem.

Tabela 3 - Valores da função taxa de quebra para o primeiro intervalo granulométrico (S_1).

| Conjunto | Tempos de Moagem | | |
|----------------|------------------|---------|---------|
| | Valores de S_1 | | |
| 1 ^o | 1,5 min | 2,5 min | 4,5 min |
| | 1,00 | 0,84 | 0,66 |
| 2 ^o | 1,5 min | 2,5 min | 4,5 min |
| | 0,52 | 0,39 | 0,36 |
| 3 ^o | 2,0 min | 3,0 min | 6,0 min |
| | 0,24 | 0,18 | 0,13 |
| 4 ^o | 2,5 min | 4,0 min | 7,5 min |
| | 0,31 | 0,21 | 0,15 |

Como pode ser observado, esses valores variaram com o tempo, não sendo essa variação considerada pelas Equações 1 e 4.

O estabelecimento de uma nova equação que determinasse a função taxa de quebra variando com o tempo, tornou-se necessário.⁽⁸⁾

Novos ensaios de calibração foram então realizados, com amostra representativa da alimentação do moinho em tempos de moagem que variaram de 2 a 15 minutos, resultando na seguinte equação:

$$\ln S_i = c_1 \exp(c_2 t) + c_3 \exp(c_4 t^2) \ln x_i \quad [5]$$

onde:

$$c_1 = 0,3577$$

$$c_2 = - 0,0250$$

$$c_3 = 0,5287$$

$$c_4 = 0,00067$$

Na minimização dessa função foi empregado, além do método dos mínimos quadrados, a otimização não linear de Powell.⁽⁹⁾

Na Tabela 4 e Figuras 1a e 1b são apresentados os valores observados (experimentais) e simulados para a amostra da Mina Ferradinho, em diferentes tempos de moagem.

Tabela 4 - Resultados obtidos na moagem (observados e simulados), em escala de laboratório, para diferentes tempos - Mina Ferradinho.

| Fração Granulométrica μm | Porcentagem Retida | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|--|--|
| | Aliment. | | t = 2 min | | t = 6 min | | t = 10 min | | t = 15 min | | | |
| | Obs. | Simul. | Obs. | Simul. | Obs. | Simul. | Obs. | Simul. | Obs. | Simul. | | |
| 2362 | 17,7 | 5,1 | 4,9 | 0,9 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | | |
| x 1651 | 12,0 | 8,5 | 7,6 | 2,3 | 1,9 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | | |
| x 1168 | 12,3 | 9,4 | 9,4 | 3,0 | 3,9 | 0,6 | 1,5 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | | |
| x 833 | 8,5 | 9,6 | 8,8 | 5,3 | 5,6 | 3,2 | 3,0 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | | |
| x 589 | 5,7 | 5,0 | 7,2 | 4,8 | 6,3 | 4,2 | 4,4 | 1,9 | 1,9 | 2,8 | | |
| x 417 | 5,9 | 7,7 | 6,8 | 8,5 | 6,6 | 4,6 | 5,5 | 4,0 | 4,0 | 4,2 | | |
| x 295 | 4,3 | 5,4 | 5,7 | 8,0 | 6,4 | 3,7 | 5,9 | 5,3 | 5,3 | 4,9 | | |
| x 208 | 3,9 | 3,9 | 5,2 | 5,9 | 6,1 | 7,5 | 6,1 | 6,2 | 6,2 | 5,9 | | |
| x 147 | 4,6 | 4,6 | 5,5 | 7,0 | 6,3 | 8,3 | 6,5 | 8,3 | 8,3 | 6,5 | | |
| x 104 | 2,0 | 4,8 | 3,6 | 6,7 | 5,1 | 8,6 | 5,8 | 7,0 | 7,0 | 6,1 | | |
| x 74 | 2,3 | 3,0 | 3,4 | 4,1 | 4,8 | 5,5 | 5,4 | 7,4 | 7,4 | 5,8 | | |
| x 53 | 1,8 | 3,1 | 2,9 | 4,2 | 4,2 | 5,2 | 4,9 | 4,8 | 4,8 | 5,4 | | |
| x 38 | 2,0 | 3,8 | 3,0 | 5,0 | 4,1 | 6,3 | 4,8 | 6,9 | 6,9 | 5,2 | | |
| - | 17,0 | 26,1 | 26,0 | 34,3 | 38,2 | 41,5 | 45,6 | 47,1 | 47,1 | 50,8 | | |

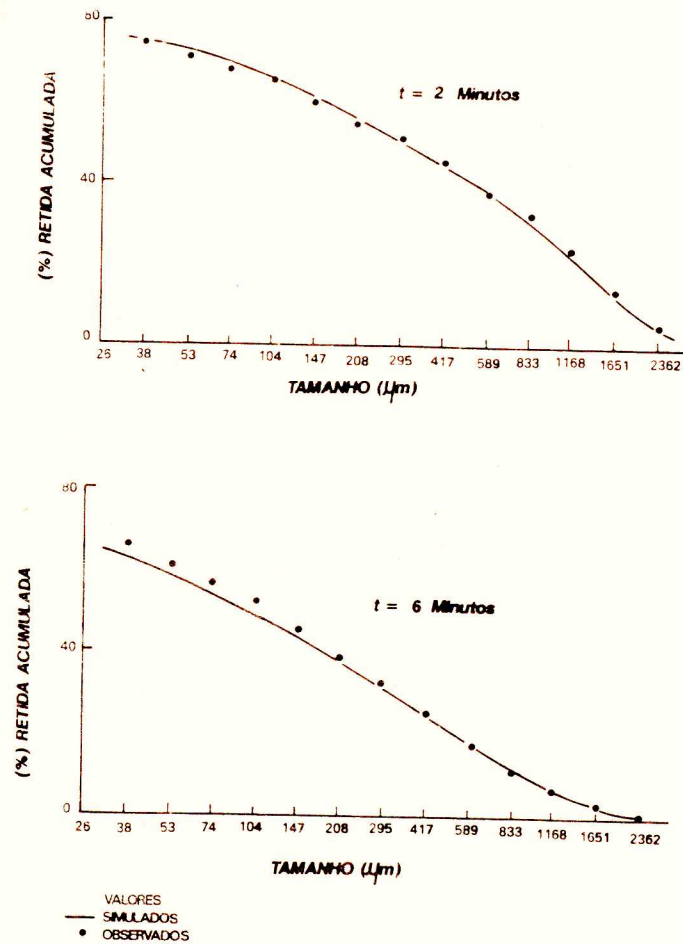


FIG. 1a - VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM EM ESCALA DE LABORATÓRIO - MINA FERRADINHO

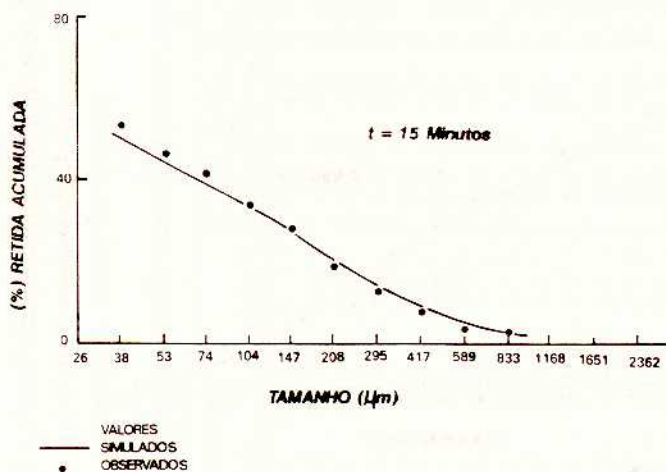
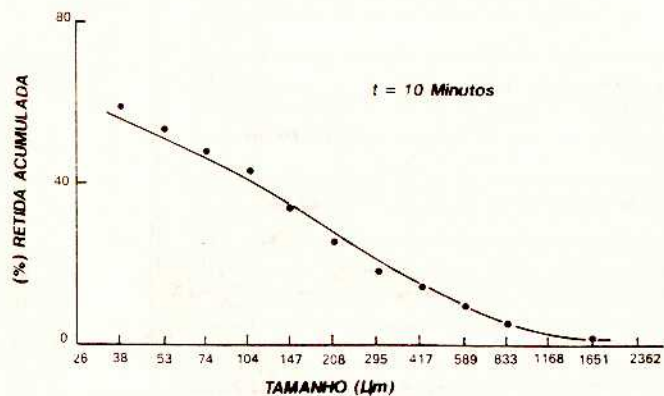


FIG. 1b - VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM EM ESCALA DE LABORATÓRIO - MINA FERRADINHO

Uma vez determinados os valores das funções taxa de quebra (S_i) e distribuição de quebra ($b_{i,j}$), foram realizadas simulações com as Minas Flor, Barra Moura e Pinheiro 3.

Na Tabela 5 e Figuras 2, 3 e 4 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes tempos de moagem.

Constata-se pelos resultados encontrados que a função taxa de quebra (S_i) (Equação 5) juntamente com a função distribuição de quebra ($b_{i,j}$) (Equação 3) reproduziram os valores observados, mostrando a adequação do modelo proposto. Além disso, pode-se concluir que a função distribuição de quebra (B) mantém-se constante para o talco proveniente de diferentes minas.

Tabela 5 - Resultados obtidos na moagem (observados e simulados), em escala de laboratório, para diferentes tempos - Minas: Flor, Barra Moura e Pinheiro 3.

| Mina | Fração Granulométrica μm | | Porcentagem Retida | | | | | | |
|-------------|-------------------------------------|-----|--------------------|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | | | Aliment. | t = 5 min | | t = 10 min | | t = 15 min | |
| | | | | Obs. | Simul. | Obs. | Simul. | Obs. | Simul. |
| Flor | + | 147 | 6,0 | 3,5 | 3,0 | 1,5 | 1,9 | 0,0 | 1,5 |
| | x | 104 | 3,0 | 3,0 | 2,8 | 3,0 | 2,4 | 2,5 | 2,1 |
| | x | 74 | 6,0 | 5,0 | 4,7 | 4,0 | 4,0 | 3,5 | 3,7 |
| | x | 53 | 7,0 | 6,0 | 6,1 | 5,0 | 5,5 | 5,0 | 5,3 |
| | x | 38 | 11,0 | 9,5 | 9,5 | 9,5 | 8,6 | 9,0 | 8,4 |
| | - | 38 | 67,0 | 73,0 | 73,9 | 77,0 | 77,6 | 80,0 | 79,0 |
| Barra Moura | + | 147 | 2,5 | 2,0 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | 0,6 |
| | x | 104 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 0,8 |
| | x | 74 | 2,5 | 2,0 | 1,9 | 2,2 | 1,6 | 2,0 | 1,5 |
| | x | 53 | 10,0 | 8,0 | 7,3 | 6,0 | 6,0 | 5,0 | 5,6 |
| | x | 38 | 6,0 | 5,0 | 5,9 | 5,5 | 5,7 | 5,0 | 5,6 |
| | - | 38 | 78,0 | 82,0 | 82,5 | 84,5 | 85,0 | 87,0 | 85,9 |
| Pinheiro 3 | + | 147 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,0 | 0,7 |
| | x | 104 | 1,5 | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,1 |
| | x | 74 | 2,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 1,7 |
| | x | 53 | 4,0 | 3,0 | 3,3 | 3,0 | 2,9 | 2,0 | 2,8 |
| | x | 38 | 9,0 | 7,0 | 7,3 | 6,0 | 6,4 | 6,0 | 6,1 |
| | - | 38 | 80,0 | 85,0 | 84,5 | 87,0 | 86,7 | 89,0 | 87,6 |

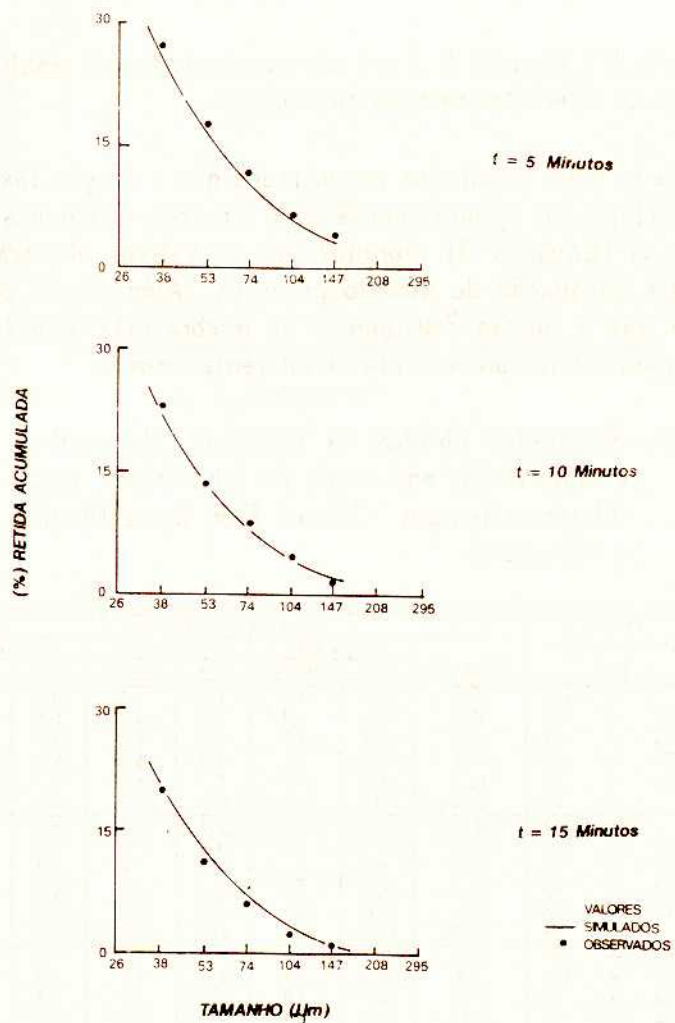


FIG. 2 - VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM EM ESCALA DE LABORATORIO - MINA FLOR

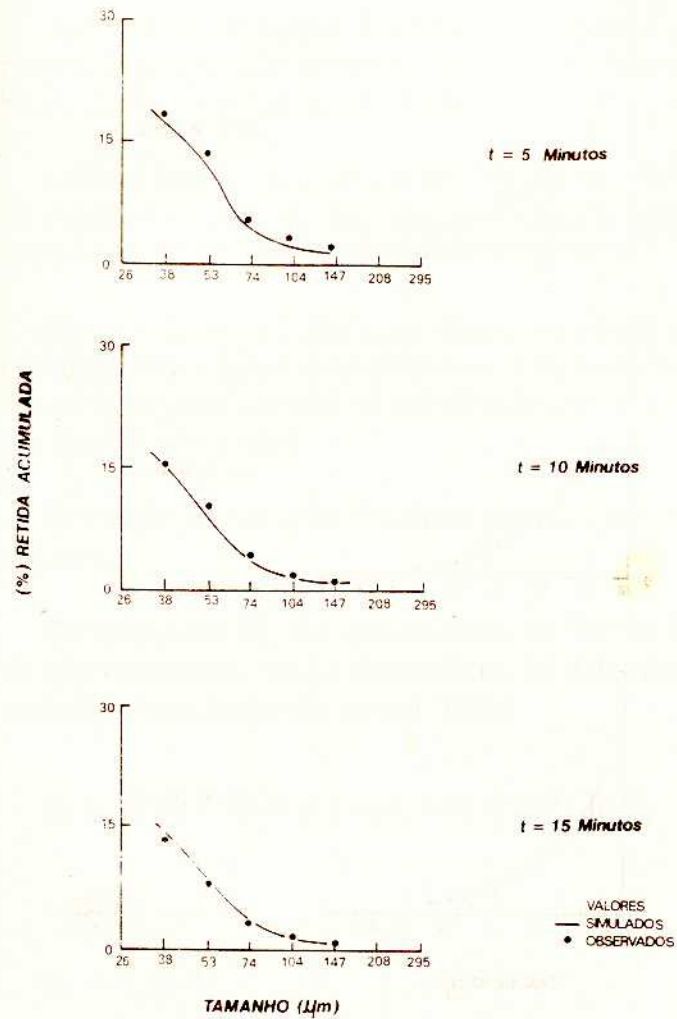


FIG. 3 - VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM EM ESCALA DE LABORATORIO - MINA BARRA MOURA

4.2. - Moagem Contínua

Pelo fato de a função distribuição de quebra (**B**) manter-se constante para o talco estudado, seus valores determinados em laboratório foram utilizados na moagem contínua.

Sendo a função taxa de quebra (**S**) dependente das dimensões do equipamento e das condições operacionais, esta teve que ser definida para a moagem contínua.

Para tal, foram estudadas as Minas Ferradinho, Barra Moura I (talco branco) e Barra Moura II (talco rosa) em usina piloto. Dessa última fazia parte um moinho trabalhando em circuito fechado com um classificador espiral.

Os tempos de moagem estudados variaram numa faixa 2,3 a 6,6 minutos.

Os valores de S_1 são apresentados na Tabela 6 e, a exemplo do que ocorreu em escala descontínua, foi determinada a seguinte equação de (S_i) variando com o tempo:

$$\ln S_i = c_1 \exp(c_2 t) + c_3 \exp(c_4 t^2) \ln x_i \quad [6]$$

onde

$$c_1 = 0,1201$$

$$c_2 = -0,0871$$

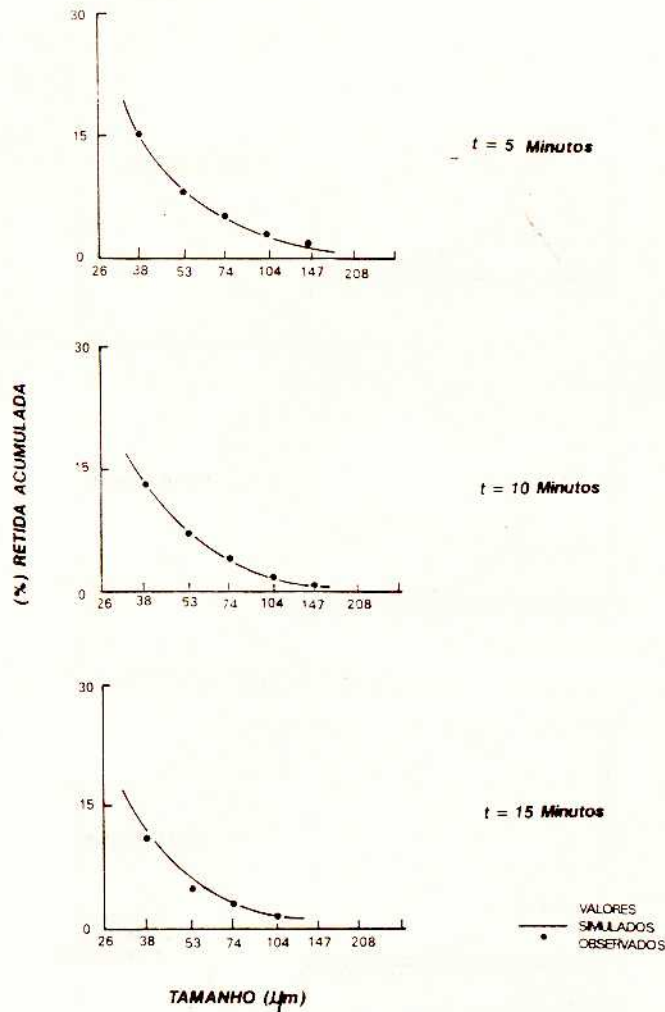


FIG. 4 - VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM EM ESCALA DE LABORATÓRIO - MINA PINHEIRO 3.

$$c_3 = - 0,1765$$

$$c_4 = - 0,00835$$

Tabela 6 - Valores da função taxa de quebra (S_i) para o primeiro intervalo granulométrico.

| Tempos de Moagem (min) | Valores de S_1 |
|------------------------|------------------|
| 2,36 | 0,130 |
| 3,25 | 0,122 |
| 6,62 | 0,084 |

Na Tabela 7 e Figura 5 são apresentados os valores observados e simulados encontrados para escala piloto.

Os resultados obtidos por simulação reproduziram aqueles conseguidos experimentalmente, confirmando a validade do modelo.

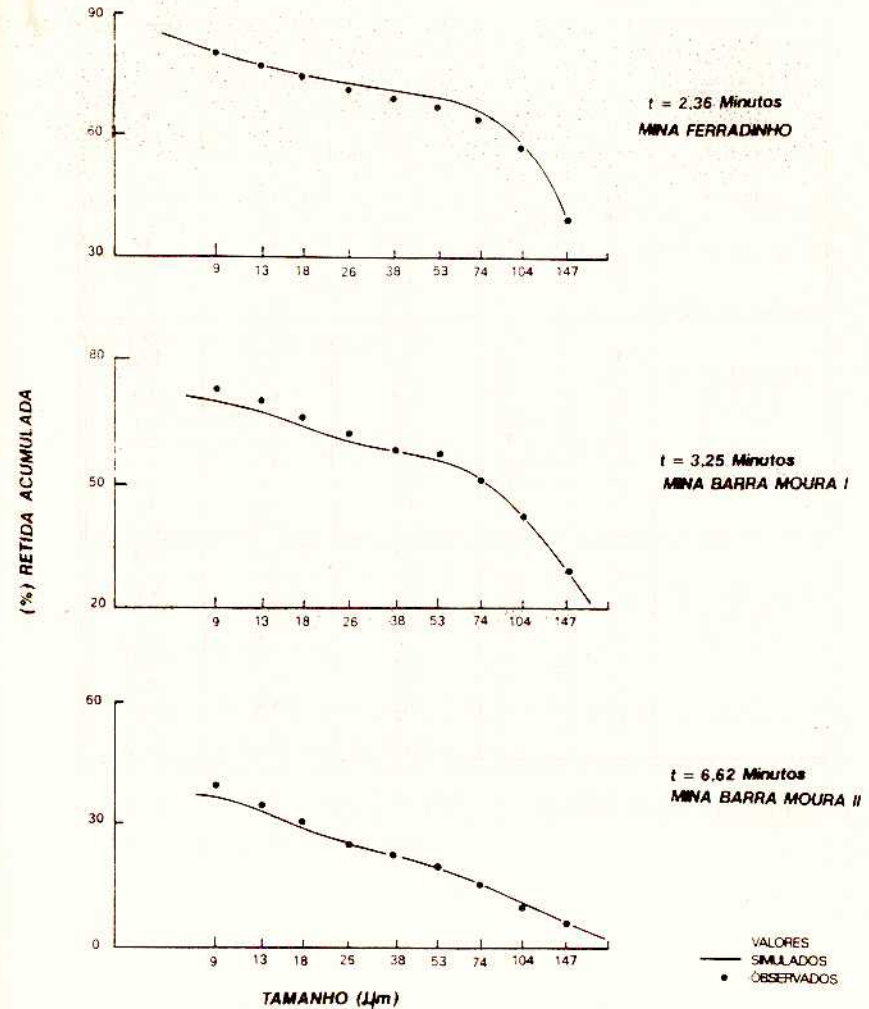


FIG. 5 - VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA MOAGEM EM ESCALA PILOTO

Tabela 7 - Resultados obtidos na moagem (observados e simulados) em escala piloto.

| Mina | Fração Granulométrica (μm) | | Porcentagem Retida | | |
|---|---|-----|--------------------|-----------|----------|
| | | | Alimentação | Produto | |
| Tempo de Moagem | | | | Observado | Simulado |
| Ferradinho $t = 2,36$ minutos | + | 147 | 51,5 | 37,9 | 38,4 |
| | x | 104 | 16,8 | 17,5 | 17,8 |
| | x | 74 | 5,6 | 7,2 | 7,7 |
| | x | 53 | 2,4 | 3,8 | 3,8 |
| | x | 38 | 0,3 | 1,4 | 1,5 |
| | x | 26 | 1,6 | 2,3 | 2,0 |
| | x | 18 | 3,7 | 3,2 | 3,3 |
| | x | 13 | 2,0 | 2,8 | 2,3 |
| | x | 9 | 2,2 | 3,1 | 2,2 |
| | - | 9 | 13,9 | 20,8 | 21,0 |
| Barra Moura I $t = 3,25$ minutos | + | 147 | 41,5 | 27,9 | 28,7 |
| | x | 104 | 13,3 | 13,9 | 14,1 |
| | x | 74 | 6,5 | 8,7 | 7,7 |
| | x | 53 | 3,3 | 5,9 | 4,4 |
| | x | 38 | 0,8 | 1,4 | 2,1 |
| | x | 26 | 2,4 | 3,6 | 2,5 |
| | x | 18 | 4,8 | 4,2 | 4,0 |
| | x | 13 | 2,6 | 3,6 | 3,0 |
| | x | 9 | 2,9 | 3,8 | 3,0 |
| | - | 9 | 21,9 | 27,0 | 30,5 |
| Barra Moura II $t = 6,62$ minutos | + | 147 | 9,1 | 5,2 | 5,4 |
| | x | 104 | 5,7 | 4,2 | 4,7 |
| | x | 74 | 5,4 | 4,9 | 4,5 |
| | x | 53 | 4,9 | 5,2 | 4,1 |
| | x | 38 | 2,3 | 2,5 | 2,7 |
| | x | 26 | 3,3 | 2,8 | 2,8 |
| | x | 18 | 6,9 | 5,1 | 4,6 |
| | x | 13 | 4,2 | 4,5 | 3,8 |
| | x | 9 | 5,5 | 4,7 | 3,9 |
| | - | 9 | 52,7 | 60,9 | 63,5 |

5. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que, para as condições estudadas:

- a função distribuição de quebra (**B**) mantém-se constante para o minério de talco de diferentes minas;
- o modelo matemático estabelecido para a moagem de talco com seixos é válido, reproduzindo por simulações os valores obtidos experimentalmente;
- a equação geral do modelo é:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = -S_i(t)M_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j}S_j(t)M_j(t)$$

onde:

$$b_{i,j} = 0,54 \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^{5,26} + (1 - 0,54) \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^{0,34} e$$

$S_i(t)$ é dada por

$$\ln S_i = 0,3577 \exp(-0,0250t) + 0,5287 \exp(0,00067t^2)$$

$\ln x_i$, para escala descontínua e

$$\ln S_i = 0,1201 \exp(-0,0871t) - 0,1765 \exp(-0,00835t^2)$$

$\ln x_i$, para escala piloto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. REID, K. J. A Solution to the Batch Grinding Equation; *Chem. Eng. Sci.*, v. 20, p. 953, 1965.
2. GUPTA, V.K.; HODOUIN, D.; EVERELL, M.D. An Analysis of Wet Grinding Operation Using a Linearized Population Balance Model for a Pilot Scale Grate Discharge Ball Mill. *Powder Technol.*, v. 32, n.2, p. 233-45, 1982.
3. GUPTA, V. K.; HODOUIN, D.; SPRING, R. *FINDBS - Program for breakage and selection functions determination in kinetic model of ball mills*. Ottawa: CANMET, 1985. (SPOC Manual - Report SP 85-1/7. 2E, cap. 7.2).
4. MALGHAN, S.G.; FUERSTENAU, D.W. An Investigation of the Influence of Mill Size on the Parameters of the Batch Grinding Equation and on Energy Consumption in Comminution. In: EUR. SYMP. ON COMMINUTION, 4, 1976. *Proceedings*. Weinheim: Verlag Chemie, 1976. p. 613.
5. KELSALL, D. F.; REID, K. J.; RESTARICK, C. J. Continuous Grinding in a Small Wet Ball Mill - Part I: A Study of the Influence of Ball Diameter. *Powder Technol.*, v. 1, p. 291-300, 1967/68.
6. AUSTIN, L. G.; SHOJI, K.; BHATIA, V.; JINDAL, V.; SAVAGE, K.; KLIMPEL, R. Some Results on the Description of Size Reduction as a Rate Process in Various Mills. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, v. 15, p. 187, 1976.
7. MIKA, T. S.; BERLIOZ, L. M.; FUERSTENAU, D. W. An Approach to the Kinetics of Dry Batch Ball Milling. In: EUR. SYMP. ON COMMINUTION, 2, 1967. *Proceedings*. Weinheim: Verlag Chemie, 1967. p. 205.
8. BEKE, B. Fine Grinding and Agglomeration - Parts 1 and 2. *Cement Technology*, p. 165-68, Sept./Oct.; p. 199-204, Nov./Dec., 1976.

9. SEGUIN, F.; LEUNG, J.; FLAMENT, F.; LAGUITTON, D. *STAMP - Program for statistical analysis and modelling*. Ottawa: CANMET, 1985. (SPOC Manual - Report SP 85-1/7. 1E; cap. 7.1).

NÚMEROS PUBLICADOS NA SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

- 01- Quem é Quem no Subsolo Brasileiro - Francisco Rego Chaves Fernandes, Ana Maria B. M. da Cunha, Maria de Fátima Faria dos Santos, José Raimundo Coutinho de Carvalho e Maurício Lins Arcoverde, (2ª edição) 1987
- 02- A Política Mineral na Constituição de 1967 - Ariadne da Silva Rocha Nodari, Alberto da Silva Rocha, Marcos Fábio Freire Montysuma e Luis Paulo Schance Heler Giannini, (2ª edição) 1987
- 03- Mineração no Nordeste - Depoimentos e Experiências - Manuel Correia de Andrade, 1987 (esgotado)
- 04- Política Mineral do Brasil - Dois Ensaio Críticos - Osny Duarte Pereira, Paulo César Ramos de Oliveira Sá e Maria Isabel Marques, 1987 (esgotado)
- 05- A Questão Mineral da Amazônia - Seis Ensaio Críticos - Francisco Rego Chaves Fernandes, Roberto Gama e Silva, Wanderlino Teixeira de Carvalho, Manuela Carneiro da Cunha, Breno Augusto dos Santos, Armando Álvares de Campos Cordeiro, Arthur Luiz Bernardelli, Paulo César de Sá e Isabel Marques, 1987 (esgotado)
- 06- Setor Mineral e Dívida Externa - Maria Clara Couto Soares, 1987
- 07- Constituinte: A Nova Política Mineral - Gabriel Guerreiro, Octávio Elísio Alves de Brito, Luciano Galvão Coutinho, Roberto Gama e Silva, Alfredo Ruy Barbosa, Hildebrando Herrmann e Osny Duarte Pereira, 1988 (esgotado)
- 08- A Questão Mineral na Constituição de 1988 - Fábio S. Sá Earp, Carlos Alberto K. de Sá Earp e Ana Lúcia Villas-Bôas, 1988 (esgotado)
- 09- Estratégia dos Grandes Grupos no Domínio dos Novos Materiais - Paulo Sá, 1989 (esgotado)
- 10- Política Científica e Tecnológica: No Japão, Coréia do Sul e Israel. - Abraham Benzaquen Sicsú, 1989 (esgotado)
- 11- Legislação Mineral em Debate - Maria Laura Barreto e Gildo Sá Albuquerque, (organizadores) 1990

- 12- Ensaio Sobre a Pequena e Média Empresa de Mineração - Ana Maria B. M. da Cunha, (organizadora) 1991
- 13- Fontes e Usos de Mercúrio no Brasil - Rui C. Hasse Ferreira e Luiz Edmundo Appel, (2ª edição) 1991
- 14- Recursos Minerais da Amazônia - Alguns Dados Sobre Situação e Perspectivas - Francisco R. Chaves Fernandes e Irene C. de M. H. de Medeiros Portela, 1991
- 15- Repercussões Ambientais em Garimpo Estável de Ouro - Um Estudo de Caso - Irene C. de M. H. de Medeiros Portela, (2ª edição) 1991
- 16- Panorama do Setor de Materiais e suas Relações com a Mineração: Uma Contribuição para Implementação de Linhas de P & D - Marcello M. Veiga e José Octávio Armani Pascoal, 1991
- 17- Potencial de Pesquisa Química nas Universidades Brasileiras - Peter Rudolf Seidl, 1991
- 18- Política de Aproveitamento de Areia no Estado de São Paulo: Dos Conflitos Existentes às Compatibilizações Possíveis - Hildebrando Hermann, 1991

NÚMEROS PUBLICADOS NA SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

- 01 - Flotação de Carvão Estudos em Escala de Bancada; - Antonio R. de Campos, Salvador L. M. de Almeida e Amílcar T. dos Santos, 1979. (esgotado)
- 02 - Beneficiamento de Talco Estudos em Escala de Bancada; - Nelson Takessi Shimabukuro, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Francisco Wilson Hollanda Vidal, 1979. (esgotado)
- 03 - Beneficiamento de Talco Estudos em Usina Piloto; - Nelson Takessi Shimabukuro, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Francisco Wilson Hollanda Vidal, 1979. (esgotado)
- 04 - Flotação de Cianita da Localidade de Boa Esperança (MG) - Ivan O. de Carvalho Masson e Tulio Herman Araya Luco, 1979.
- 05 - Beneficiamento de Diatomita do Ceará - José A. C. Sobrinho e Adão B. da Luz, 1979. (esgotado)

- 06 - Eletrorrecuperação de Zinco uma Revisão das Variáveis Influentes - Roberto C. Villas Bôas, 1979. (esgotado)
- 07 - Redução da Gipsita com Carvão Vegetal; - Ivan O. de Carvalho Masson, 1980. (esgotado)
- 08 - Beneficiamento do Diatomito de Canavieira do Estado do Ceará - Franz Xaver Horn Filho e Marcello Mariz da Veiga, 1980. (esgotado)
- 09 - Moagem Autógena de Itabirito em Escala Piloto - Hedda Vargas Figueira e João Alves Sampaio, 1980. (esgotado)
- 10 - Flotação de Minério Oxidado de Zinco de Baixo Teor - Carlos Adolpho M. Baltar e Roberto C. Villas Bôas, 1980. (esgotado)
- 11 - Estudo dos Efeitos de Corrente de Pulso Sobre o Eletrorefino de Prata - Luiz Gonzaga Santos Sobral, Ronaldo Luiz Correia dos Santos e Delfin da Costa Laureano, 1980. (esgotado)
- 12 - Lixiviação Bacteriana do Sulfeto de Cobre de Baixo Teor Caraíba - Vicente Paulo de Souza, 1980. (esgotado)
- 13 - Flotação de Minérios Oxidados de Zinco uma Revisão de Literatura - Carlos Adolpho Magalhães Baltar, 1980. (esgotado)
- 14 - Efeito de Alguns Parâmetros Operacionais no Eletrorefino do Ouro - Marcus Granato e Roberto C. Villas Bôas, 1980. (esgotado)
- 15 - Flotação de Carvão de Santa Catarina em Escala de Bancada e Piloto - Antonio Rodrigues de Campos e Salvador L. Matos de Almeida, 1981. (esgotado)
- 16 - Aglomeração Seletiva de Finos de Carvão de Santa Catarina Estudos Preliminares - Lauro Santos N. da Costa, 1981.
- 17 - Briquetagem e a sua Importância para a Indústria (em revisão) - Walter Shinzel e Regina Célia M. da Silva, 1981. (esgotado)
- 18 - Aplicação de Petrografia no Beneficiamento de Carvão por Flotação - Ney Hamilton Porphirio, 1981.
- 19 - Recuperação do Cobre do Minério Oxidado de Caraíba por Extração por Solventes em Escala Semipiloto - Ivan O. C. Masson e Paulo Sergio M. Soares, 1981. (esgotado)
- 20 - Dynawhirpool (DWP) e sua Aplicação na Indústria Mineral - Hedda Vargas Figueira e José Aury de Aquino, 1981. (esgotado)
- 21 - Flotação de Rejeitos Finos de Scheelita em Planta Piloto - José Farias de Oliveira, Ronaldo Moreira Horta e João Alves Sampaio, 1982. (esgotado)
- 22 - Coque de Turfa e suas Aplicações - Regina Célia Monteiro da Silva e Walter Schinzel, 1982.
- 23 - Refino Eletrolítico de Ouro, Processo Wohlwill - Juliano Peres Barbosa e Roberto C. Villas Bôas, 1982. (esgotado)
- 24 - Flotação de Oxidados de Zinco Estudos em Escala Piloto - Adão Benvindo da Luz e Carlos Adolpho M. Baltar, 1982.
- 25 - Dosagem de Ouro - Luiz Gonzaga S. Sobral e Marcus Granato, 1983.
- 26 - Beneficiamento e Extração de Ouro e Prata de Minério Sulfetado - Márcio Torres M. Penna e Marcus Granato, 1983.
- 27 - Extração por Solventes de Cobre do Minério Oxidado de Caraíba - Paulo Sérgio Moreira Soares e Ivan O. de Carvalho Masson, 1983.
- 28 - Preparo Eletrolítico de Solução de Ouro - Marcus Granato, Luiz Gonzaga S. Sobral, Ronaldo Luiz C. Santos e Delfin da Costa Laureano, 1983.
- 29 - Recuperação de Prata de Fixadores Fotográficos - Luiz Gonzaga Santos Sobral e Marcus Granato, 1984. (esgotado)
- 30 - Amostragem para Processamento Mineral - Mário Valente Possa e Adão Benvindo da Luz, 1984. (esgotado)
- 31 - Indicador de Bibliotecas e Centros de Documentação em Tecnologia Mineral e Geociências do Rio de Janeiro - Subcomissão Brasileira de Documentação em Geociências - SBDG, 1984.
- 32 - Alternativa para o Beneficiamento do Minério de Manganês de Urucum, Corumbá-MS - Lúcia Maria Cabral de Góes e Silva e Lélío Fellows Filho, 1984.
- 33 - Lixiviação Bacteriana de Cobre de Baixo Teor em Escala de Bancada - Teresinha Rodrigues de Andrade e Francisca Pessoa de França, 1984.
- 34 - Beneficiamento do Calcário da Região de Cantagalo - RJ. - Vanilda Rocha Barros, Hedda Vargas Figueira e Rupen Adamian, 1984.
- 35 - Aplicação da Simulação de Hidrociclones em Circuitos de Moagem - José Ignácio de Andrade Gomes e Regina C. C. Carrisso, 1985.
- 36 - Estudo de um Método Simplificado para Determinação do "Índice de Trabalho" e sua Aplicação à Remoagem - Hedda Vargas Figueira, Luiz Antonio Pretti e Luiz Roberto Moura Valle, 1985.
- 37 - Metalurgia Extrativa do Ouro - Marcus Granato, 1986.

- 38 - Estudos de Flotação do Minério Oxidado de Zinco de Minas Gerais - Francisco Wilson Hollanda Vidal, Carlos Adolfo Magalhães Baltar, José Ignácio de Andrade Gomes, Leonardo Apparício da Silva, Hedda Vargas Figueira, Adão Benvindo da Luz e Roberto C. Villas Bôas, 1987.
- 39 - Lista de Termos para Indexação em Tecnologia Mineral - Vera Lucia Vianna de Carvalho, 1987.
- 40 - Distribuição de Germânio em Frações Densimétricas de Carvões - Luiz Fernando de Carvalho e Valéria Conde Alves Moraes, 1986.
- 41 - Aspectos do Beneficiamento de Ouro Aluvionar - Fernando Antonio Freitas Lins e Leonardo Apparício da Silva, 1987.
- 42 - Estudos Tecnológicos para Aproveitamento da Atapulgita de Guadalupe-PI - Adão Benvindo da Luz, Salvador Luiz M. de Almeida e Luciano Tadeu Silva Ramos, 1988.
- 43 - Tratamento de Efluentes de Carvão Através de Espessador de Lamelas - Francisco Wilson Hollanda Vidal e Franz Xaver Horn Filho, 1988.
- 44 - Recuperação do Ouro por Amalgamação e Cianetação: Problemas Ambientais e Possíveis Alternativas - Vicente Paulo de Souza e Fernando Antonio Freitas Lins, 1989. (esgotado)
- 45 - Geopolítica dos Novos Materiais - Roberto C. Villas Bôas, 1989. (esgotado)
- 46 - Beneficiamento de Calcário para as Indústrias de Tintas e Plásticos - Vanilda da Rocha Barros e Antonio Rodrigues de Campos, 1990.
- 47 - Influência de Algumas Variáveis Físicas na Flotação de Partículas de Ouro - Fernando Antonio Freitas Lins e Rupen Adamian, 1991.
- 48 - Caracterização Tecnológica de Caulim para a Indústria de Papel - Rosa Malena Fernandes Lima e Adão Benvindo da Luz, 1991.
- 49 - Amostragem de Minérios - Maria Alice Cabral Goes, Mario Valente Possa e Adão Benvindo da Luz, 1991.
- 50 - Design of Experiments in Planning Metallurgical Tests - Roberto C. Villas Bôas, 1991.
- 51 - Eletrorrecuperação de Ouro a Partir de Soluções Diluídas de seu Cianeto - Roberto C. Villas Bôas, 1991.
- 52 - Talco do Paraná - Flotação em Usina Piloto - Salvador Luiz M. de Almeida, Adão Benvindo da Luz e Ivan Falcão Fontes, 1991.

- 53 - Os Novos Materiais e a Corrosão - Roberto C. Villas Bôas, 1991.
- 54 - Aspectos Diversos da Garimpagem de Ouro - Fernando Freitas Lins (coord.), José Cunha Cotta, Adão Benvindo da Luz, Marcello Mariz da Veiga, Fernando Freitas Lins, Luiz Henrique Farid, Márcia Machado Gonçalves, Ronaldo Luiz C. dos Santos, Maria Laura Barreto e Irene C. M. H. Medeiros Portela, 1992. (esgotado)
- 55 - Concentrador Centrífugo - Revisão e Aplicações Potenciais - Fernando Freitas Lins, Lauro S. Norbert Costa, Oscar Cuéllar Delgado, Jorge M. Alvares Gutierrez, 1992.
- 56 - Minerais Estratégicos: Perspectivas - Roberto C. Villas Bôas, 1992.
- 57 - O Problema do Germânio no Brasil - Roberto C. Villas Bôas, Maria Dionízia C. dos Santos e Vicente Paulo de Souza, 1992.
- 58 - Caracterização Tecnológica do Minério Aurífero da Mineração Casa de Pedra Mato Grosso - Ney Hamilton Porphírio e Fernando Freitas Lins, 1992.
- 59 - Geopolitics of the New Materials: The Case of the Small Scale Mining and New Materials Developments - Roberto C. Villas Bôas, 1992.
- 60 - Degradação de Cianetos por Hipoclorito de Sódio - Antonio Carlos Augusto da Costa, 1992.
- 61 - Paládio: Extração e Refino, uma Esperiência Industrial - Luís Gonzaga S. Sobral, Marcos Granato e Roberto B. Ogando, 1992.
- 62 - Desempenho de Ciclones e Hidrociclones - Giulio Massarani, 1992.

NÚMEROS PUBLICADOS NA SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

- 01 - Poconé: Um Campo de Estudos do Impacto Ambiental do Garimpo - Marcello M. Veiga, Francisco R. C. Fernandes, Luiz Henrique Farid, José Eduardo B. Machado, Antônio Odilon da Silva, Luís Drude de Lacerda, Alexandre Pessoa da Silva, Edinaldo de Castro e Silva, Evaldo F. de Oliveira, Gercino D. da Silva, Hélcias B. de Pádua, Luiz Roberto M. Pedroso, Nelson Luiz S. Ferreira, Saete Kiyoka Ozaki, Rosane V. Marins, João A. Imbassahy, Wolfgang C. Pfeiffer, Wanderley R. Bastos e Vicente Paulo de Souza, (2ª edição) 1991.
- 02 - Diagnóstico Preliminar dos Impactos Ambientais Gerados por Garimpos de Ouro em Alta Floresta/MT : Estudo de Caso (versão Português/Inglês)- Luiz Henrique Farid, José Eduardo B. Machado, Marcos P. Gonzaga, Saulo R. Pereira

Filho, André Eugênio F. Campos Nelson S. Ferreira, Gersino D. Silva, Carlos R. Tobar, Volney Câmara, Sandra S. Hacon, Diana de Lima, Vangil Silva, Luiz Roberto M. Pedroso; Edinaldo de Castro e Silva, Laís A. Menezes, 1992.

03 - Mercúrio na Amazônia: Uma Bomba Relógio Química ? - Luis Drude Lacerda e Win Salomons, 1992.

NÚMEROS PUBLICADOS NA SÉRIE QUALIDADE E PRODUTIVIDADE

01- Qualidade na Formulação de Misturas - Roberto C. Villas Bôas, 1992.

02- La Importância Del Método En La Investigación Tecnológica - Roberto C. Villas Bôas, 1992.

03- Normalización Minerometalúrgica e Integración Latinoamericana - Romulo Genuino de Oliveira, 1993.

