

## UM ESTUDO DE MOAGEM AUTÓGENA EM ESCALA PILOTO COM O MINÉRIO SULFETADO DE FORTALEZA DE MINAS

Sampaio, J.A.<sup>1</sup>, Braga, P.F.A.<sup>1</sup> e Clark, J.Y.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CETEM - Centro de Tecnologia Mineral  
Rua Quatro, Quadra D, Ilha do Fundão, Cid. Universitária  
CEP 21941-590 - Rio de Janeiro - RJ

<sup>2</sup> RTZ Mineração Ltda  
SCS - Qd. 01, Bl. D, Ed. JK, 14<sup>o</sup> andar - CEP 70306-900 - Brasília - DF

### ABSTRACT

The present work describes the preliminary and operational procedures for the autogenous grinding in pilot plant scale, by the use of a cascade mill from Koppers with 1.80 m of diameter and 0.60 m long.

In this approach, it was planned an autogenous grinding study of nickel sulfide ore from Fortaleza de Minas. The experiments carried out in this work had the objective of studying the possibility of using of an autogenous or semi-autogenous grinding, based on the following parameters: feeding rate (kg/h), end product grain size and energy consumption. Comparative studies were conducted between the fully autogenous grinding (FAG) and semi-autogenous grinding (SAG) processes.

The results obtained have indicated that the Fortaleza de Minas ore is not susceptible to a fully autogenous process (FAG) in the studied scale (500 kg/h). The net power required by the output shaft of the speed reducer in the SAG process, to grind the Fortaleza de Minas ore was 9.3 kWh/t ( $P_{80} = 590\mu\text{m}$ ).

Key words: Autogenous grinding, measurement of power, pilot plant, cascade mill, sulfide ore.

### RESUMO

O presente trabalho descreve os preparativos e procedimentos operacionais para ensaios de moagem autógena em escala piloto, utilizando-se para tal fim, um moinho *cascade* de fabricação *KOPPERS* com 1,80 m de diâmetro por 0,60 m de comprimento.

Nessa abordagem, foi planejado um estudo de moagem autógena para o minério sulfetado de níquel de Fortaleza de Minas. Os ensaios tiveram como objetivo estudar a viabilidade da moagem autógena ou semi autógena, tomando como base os parâmetros: alimentação em kg/h; granulometria do produto final; consumo de energia. Foram conduzidos estudos comparativos entre os processos "FAG" (*fully autogenous grinding*) e "SAG" (*semi-autogenous grinding*).

Os resultados desses ensaios mostraram que o minério de Fortaleza de Minas não é suscetível de moagem totalmente autógena, processo "FAG", na escala estudada (500 kg/h) e que a energia líquida, *net power*, requerida no processo "SAG" na ponta do eixo de saída do redutor para cominuição do minério de Fortaleza de Minas até  $P_{80}$  de 590  $\mu\text{m}$  é de ~ 9,3 kWh/t.

Palavras-Chave: Moagem autógena, medidas de energia, planta piloto, moinho cascata, minério sulfetado

## 1- INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve, de forma sucinta, o procedimento de ensaios de moagem autógena em escala piloto e um exemplo prático realizado com o minério sulfetado de Fortaleza de Minas.

Atualmente, no Brasil encontram-se em operação três moinhos semi-autógenos utilizados na moagem de minérios auríferos, estando em fase de implantação, dois novos projetos que prevêem a moagem semi-autógena para minérios sulfetados de cobre e níquel.

Dentre os processos de cominuição, a moagem autógena está sendo cada vez mais requisitada, não só pelo baixo custo operacional como também pelo baixo consumo energético por tonelada de *run of mine* processado. Por essas razões é cada vez mais freqüente a necessidade dos ensaios em escala piloto. São muito comuns as questões. Qual deve ser a extensão desses ensaios? Qual a quantidade de material requerido para a realização dos ensaios? Qual o seu custo? Que tipo de processo de moagem, autógeno ou semi-autógeno? Entre eles, qual o que apresenta o menor custo? Obviamente para responder a essas questões é necessário um estudo em escala piloto. O propósito do mesmo deve ser a geração de dados confiáveis e necessários ao desenvolvimento da engenharia de processo. Os estudos em escala piloto com um determinado minério tem como objetivo determinar, entre outros, os seguintes parâmetros: a capacidade do moinho, a granulometria do produto requerido, o consumo de energia e visa otimizar condições operacionais [1,2].

As características do minério tem uma grande influência na escala de operação e no processo de moagem. No caso de minérios sulfetados ou de alguns minérios não metálicos maior atenção se dá ao efeito da moagem autógena sobre o tratamento metalúrgico subsequente. Situação diferente ocorre com o minério de ferro, onde o interesse maior esta relacionado com o consumo de energia, escala de produção e o desgaste do revestimento do moinho [2].

No contexto dessa abordagem, foi planejado um estudo de moagem autógena para o minério sulfetado de níquel de Fortaleza de Minas. Os ensaios tiveram como objetivo estudar a viabilidade da moagem autógena ou semi autógena, tomando como base os parâmetros: alimentação em kg/h; granulometria do produto final; consumo de energia.

## 2. AMOSTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO

A amostra selecionada para os estudos em escala piloto deve ser representativa do corpo mineralizado a ser tratado e deve estar de acordo com o planejamento de lavra.

A quantidade de amostra requerida para os estudos depende da moabilidade do material e da complexidade do circuito envolvido. Em geral são suficientes cerca de 150 toneladas representativas do *run of mine*. A granulometria desse material deve obedecer à distribuição granulométrica correspondente à de um produto de fragmentação de britagem primária. Isso está de acordo com a prática usual da moagem autógena, na maioria dos processos industriais, onde o *run of mine* sofre uma britagem primária antes da alimentação do processo de moagem. Deve-se salientar que a maior granulometria desse material não deve ser superior a 200 mm.

Para realização do presente trabalho foi recebida uma amostra de 73 t representativa do jazimento. A amostra foi classificada em três frações: >75 mm, 75/12 mm e < 12 mm. O retido, material com granulometria acima de 200 mm foi retirado da pilha e reduzido manualmente. Alíquotas representativas da amostra global foram coletadas na pilha para determinação da densidade e do índice de trabalho (Wi) [3].

## 3. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios de moagem autógena foram realizados num moinho *cascade* de fabricação *KOPPERS* com 1,80 m de diâmetro por 0,60 m de comprimento. Esse moinho é acionado por um motor elétrico trifásico, 440 V, de 25 Hp e 1125 rpm. Possui ainda um sistema mecânico que permite operar com velocidades correspondentes a 65, 79, 85 e 97% da velocidade crítica (Vc). O moinho dispõe de duas grelhas de descarga, com aberturas de 6 e 12 mm. No presente trabalho foi usada a grelha com 6,0 mm de abertura [4,5]. A Figura 1 apresenta maiores detalhes do circuito utilizado nos ensaios.

A alimentação do moinho deve ser feita com o material homogêneo e representativo da amostra global. Para isso é prática usual proceder à alimentação em várias frações. Nesse trabalho a alimentação do moinho foi feita segundo as três frações previamente classificadas que foram adicionadas ao moinho em intervalos constantes[3].

O controle da operação é feito através do consumo de energia, do volume da carga do moinho, da percentagem de sólidos na descarga do moinho e das vazões do produto e da carga circulante. Esse controle é realizado através de amostragem em determinados pontos do circuito em intervalo de tempo pré-estabelecido. Além do controle operacional também são coletadas amostras para análises granulométricas e balanço de massa do circuito.

No final de cada ensaio, a carga remanescente no moinho foi retirada, pesada, classificada e efetuada a medida do volume correspondente[5].

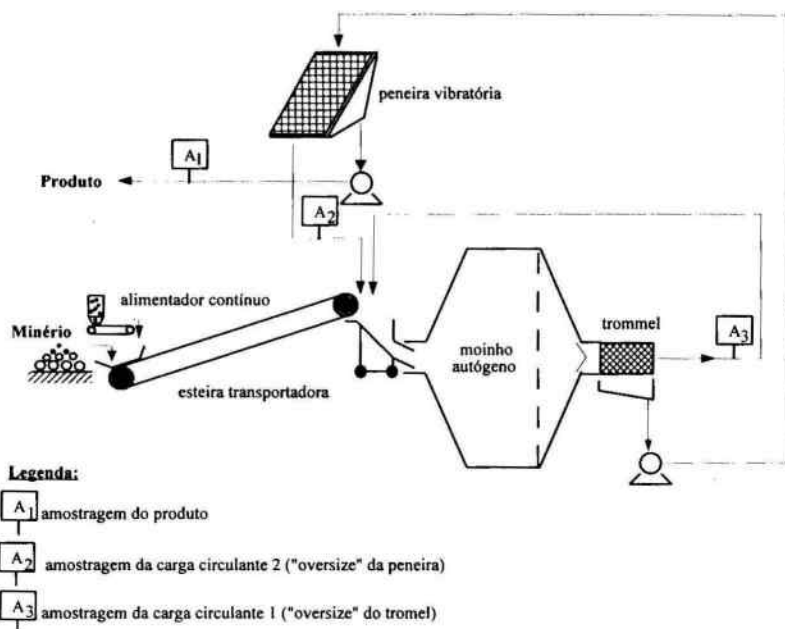


Figura 1 - Circuito de moagem autógena utilizado nos ensaios com o minério de níquel de Fortaleza de Minas

#### 4. MEDIDAS DE ENERGIA

O consumo de energia foi medido com um medidor estático de energia elétrica ativa (quilowattímetro), fabricado pela Multitel Eletrônica Indústria e Comércio Ltda. sob licença do CEPEL - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, cujas características principais encontram-se abaixo relacionadas.

Tensão: 120 V, Corrente: 15 A; Frequência: 60 Hz

K: 10 Wh / p, Ke: 4 Wh / p, I max.: 120 A

2 Fases, 3 Fios, 2 Elementos, Classe: I, Modelo: MES - 2A

Esse medidor está instalado no painel de comando do moinho autógeno (Figura 2), de acordo com as instruções do fabricante.

A energia consumida ( $E_c$ ) é calculada através da variação do número de pulsos fornecido pelo medidor em um intervalo de tempo que é representado pela equação:

$$E_c = \frac{n^0 \cdot K}{\text{tempo}} = \text{kW.h} \quad (1)$$

onde K, a constante do medidor, é equivalente a 10 Wh por pulso.

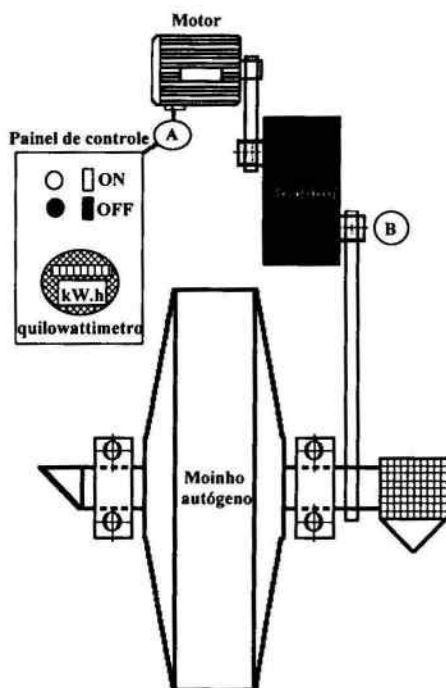


Figura 2 - Detalhes do circuito eletromecânico do moinho.

#### 4.1 - Algumas Definições sobre a Energia Consumida na Moagem Autógena

A energia total consumida, (*total power*), é aquela medida e registrada no quilowattímetro (ponto A, Figura 2). Energia bruta, (*gross power*), é a energia fornecida na ponta do eixo de saída do redutor (ponto B, Figura 2), sendo equivalente a energia total multiplicada pela eficiência do motor, redutor de velocidade e transmissões. Isso é determinado através de testes com um *Prony Brake* na saída do redutor de velocidade [3].

A Figura 3 representa a curva resultante dos testes *Prony Brake* aplicado no moinho para uma velocidade de 25 rpm equivalente, ou seja, a 79% da velocidade crítica do moinho [6,7].

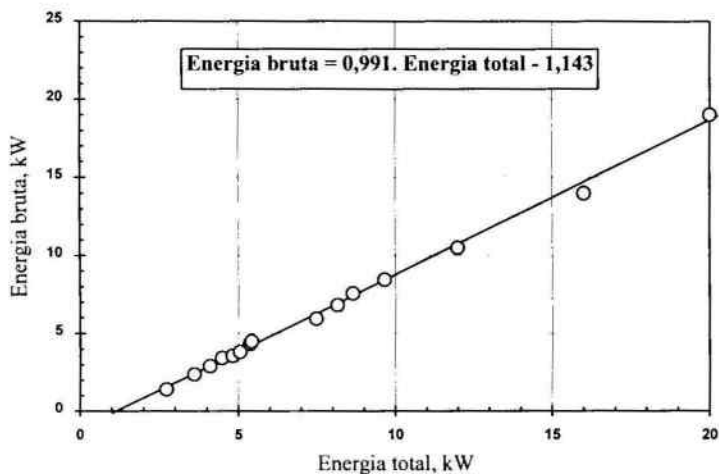


Figura 3 - Curva característica obtida com uso do *Prony Brake*.

A energia consumida em vazio, *no load power*, é aquela medida quando o moinho opera sem carga. Seu cálculo é feito do mesmo modo que a *gross power* e no mesmo ponto, B (Figura 2) porém com o moinho operando em vazio (sem carga) [8].

A energia líquida, é calculada no ponto B da Figura 2, segundo a relação:

$$\text{Energia líquida} = \text{Energia bruta} - \text{Energia em vazio}$$

## 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de moagem autógena em escala piloto foram realizados com minério sulfetado, contendo Ni, Cu, Co, Fe e S (10%), de Fortaleza de Minas pertencente à RTZ.

A amostragem do minério, foi realizada pela própria RTZ e a amostra total do *run of mine* foi de 73.100 kg.

A primeira etapa de preparação foi a coleta de uma alíquota representativa da amostra global para determinações da densidade do minério e do índice de trabalho ( $W_i$ ) para bolas [8]. Na etapa seguinte foi efetuada a classificação total da amostra em três frações seguida de pesagem das mesmas. A Tabela I apresenta os resultados dessa classificação.

Tabela I - Classificação da amostra do minério tal como recebida.

frações (mm)	peso (kg)	%	
		retida	acumulada
+ 76	6.665	12,43	87,57
+ 12,7	32.503	60,64	26,93
- 12,7	14.432	26,93	-
Total	53.600	100	

O projeto conceitual da RTZ prevê para o *run of mine* uma britagem primária em britador de mandíbulas e na etapa seguinte a alimentação da moagem autógena. Baseando-se em tal informação foi estabelecido que a distribuição granulométrica da alimentação do moinho piloto corresponderia àquela obtida na britagem primária. A Tabela II apresenta a distribuição granulométrica usada na alimentação dos testes, ou seja, a distribuição teórica que se obtém numa britagem primária desse tipo.

Tabela II - Distribuição granulométrica provável na descarga de um britador primário.

frações (mm)	% retida
+ 76	36
+ 12,7	47
- 12,7	17

## 6. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foi determinada a densidade do minério, utilizando-se o método picnométrico e amostra com granulometria de 147  $\mu\text{m}$ . As determinações foram feitas em triplicatas e apresentaram um valor médio de 3,32  $\text{g/cm}^3$ .

Os ensaios para determinação do índice de trabalho,  $W_i$ , foram levados a efeito em um moinho padrão de 31 x 31 cm. A Figura 4 apresenta as distribuições granulométricas do produto da alimentação do moinho.

O cálculo do  $W_i$  foi efetuado segundo a relação:

$$W_i = \frac{44,5}{Am^{0,23} \cdot Mob^{0,82} \cdot 10 \left[ (P)^{-0,5} \cdot (A)^{-0,5} \right]} \cdot 1,1 \quad (2)$$

onde:

$W_i$ = índice de trabalho para moagem, em kWh/t;

$Am$ = abertura da malha teste de classificação em  $\mu\text{m}$ ;

$Mob$ = índice de moabilidade;

$P$ = abertura da peneira em  $\mu\text{m}$ , onde passam 80% da massa do produto;

$A$ = abertura da peneira em  $\mu\text{m}$ , onde passam 80% da massa da alimentação;

1,1= fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica [8].

Os valores encontrados para o  $W_i$  foram 16,64 e 15,35 tomou-se 16,0 kWh/t como valor médio.

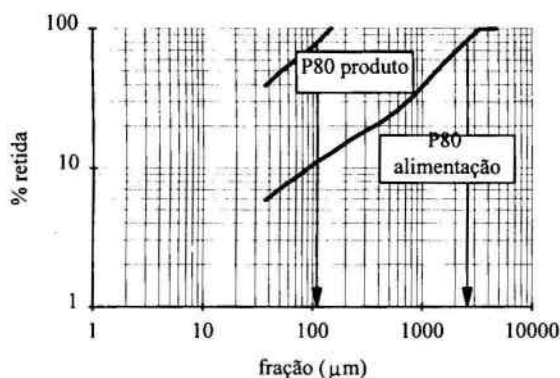


Figura 4 - Curva de distribuição granulométrica da alimentação e do produto final.



## 7. ENSAIOS DE MOAGEM AUTÓGENA

A fim de estudar os processos "FAG" (*fully autogenous grinding*) e "SAG" (*semi-autogenous grinding*), foram conduzidos ensaios em escala piloto, com o minério sulfetado de Fortaleza de Minas.

### Ensaio "FAG"

Esse experimento foi realizado em circuito fechado com uma peneira vibratória usando uma tela de 1,2 mm e grelha de descarga de 12 mm. A alimentação do moinho foi de 500 kg/h em intervalos de 15 min. A velocidade do moinho correspondeu a 79% da velocidade crítica. A duração do ensaio foi de 5 horas e foram coletadas amostras para análises granulométricas e balanço de massa. Ao final do teste a carga remanescente do moinho foi retirada, pesada e classificada. O volume ocupado pela carga (minério) antes do ensaio era equivalente a 20,6% do volume interno do moinho [5].

### Ensaio "SAG"

Esse experimento foi realizado em circuito fechado com uma peneira vibratória usando uma tela de 3 mm e grelha de descarga de 6 mm. A alimentação do moinho foi de 700 kg/h em intervalos de 5 min. Foram usados 530 kg de bolas de 120 e 110 mm de diâmetro, equivalente a 9% do volume interno do equipamento. As bolas utilizadas foram de aço forjado fabricadas pela Forjas Brasileiras S/A, as quais apresentaram excelente desempenho, pois nenhum tipo de fratura foi constatado após os ensaios. A velocidade do moinho correspondeu a 79% da velocidade crítica. A duração do ensaio foi de 6,5 horas e foram coletadas amostras para análises granulométricas e balanço de massa. Ao final do teste a carga remanescente do moinho foi retirada, pesada e classificada. O volume ocupado pela carga (minério + bolas) antes do ensaio era equivalente a 29,7% do volume interno do moinho [5].

## 8. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela III, verifica-se que a carga remanescente após o ensaio "FAG" cresceu para 798 kg, o que mostra um aumento de 160% sobre a carga inicial de 500 kg. Isso pode ser explicado pela resistência que o material oferece ao processo de moagem, esse fato é confirmado pelos dados apresentados na Tabela IV, onde a energia consumida apresentou valores crescentes ao longo do ensaio. Por outro lado, no processo "SAG", (vide Tabela III), não se verifica aumento na carga remanescente do moinho, nem aumento no consumo de energia (Tabela V), acusando o estado de equilíbrio da operação.

Tabela III - Análise granulométrica da carga remanescente no moinho após os ensaios.

frações (mm)	peso (kg)		% retida	
	"FAG"	"SAG"	"FAG"	"FAG"
+75	269	101	33,7	14,3
+50	190	79	23,8	11,1
+25	161	220	20,2	30,7
+12	131	124	16,4	17,3
-12	47	191	5,9	26,6
total	798	715	100	100

O volume da carga remanescente após o ensaio "FAG" era correspondente a 25,4% do volume interno do moinho contra os 20,6% inicial, o que confirma a variação do volume da carga dentro do moinho. Para o ensaio "SAG", o mesmo volume (carga + bolas) não sofreu alteração, permaneceu igual a 30% do volume interno.

Uma análise da distribuição granulométrica da carga remanescente após os ensaios (Tabela III), mostra que não houve formação de uma granulometria crítica, mesmo ocorrendo um aumento da carga interna.

Tabela IV - Resultados do ensaio "FAG".

Tempo (h)	Carga circulante	Produto da moagem		Produto	Energia		
		% sól.	kg/h		total	bruta	líquida
	%				kWh	kWh	kWh/t
01:00	226	81,1	1561	429	10,02	8,79	5,89
01:30	171	76,8	1198	343	9,60	8,37	5,06
02:00	206	82,1	1666	635	9,86	8,63	5,57
02:30	149	77,7	1262	515	10,11	8,88	6,07
03:00	184	79,7	1425	507	10,07	8,83	5,99
03:30	169	71,9	1277	429	10,32	9,09	6,49
04:00	123	67,9	1059	443	10,37	9,13	6,58
04:30	179	69,6	1146	378	10,62	9,38	7,09
05:00	179	76,8	1581	687	10,70	9,46	7,24

Tabela V - Resultados do ensaio "SAG".

Tempo (h)	Carga circulante	Descarga do moinho		Produto	Energia		
		% sól.	kg/h		kg/h	total	bruta
	%				kW.h	kW.h	kWh/t
00:30					13,25	11,98	8,78
01:00				749	13,59	12,32	9,26
01:30	14	65,9	728	628	13,54	12,28	9,20
02:00	15	67,7	791	689	13,70	12,44	9,42
02:30	14	69,3	850	749	13,64	12,37	9,33
03:00	15	64,3	679	577	13,60	12,33	9,28
03:30	14	72,1	974	877	13,66	12,40	9,37
04:00	12	60,5	576	491	13,72	12,45	9,45
04:30	12	65,2	706	620	13,73	12,46	9,46
05:00	14	70,2	888	792	13,66	12,39	9,36
05:30	13	68,1	805	714	13,66	12,39	9,36
06:00	13	74,4	1.095	1.006	13,99	12,72	9,84

A carga circulante, Tabelas IV e V, permaneceu alta para operação em escala piloto, supostamente devido a utilização de uma grelha de descarga com abertura de 12 mm, tal dificuldade foi superada utilizando uma grelha com abertura de 6 mm. A troca da malha da peneira de 1,2 para 3 mm, também contribui positivamente para redução da carga circulante no ensaio "SAG", sem alterar, de forma significativa, a distribuição do produto.

Verifica-se que a introdução de bolas na moagem autógena, ensaio "SAG", não modifica substancialmente a distribuição granulométrica no produto final, significando que essa distribuição independe do tipo de ensaio. Em ambos os casos o  $P_{80}$  do produto final ficou na faixa de 590  $\mu\text{m}$ .

Tabela VI - Análise granulométrica dos produtos da moagem "FAG" e "SAG".

frações ( $\mu\text{m}$ )	% retida		% passante	
	"FAG"	"SAG"	"FAG"	"SAG"
+420	17,26	27,04	82,74	72,96
+297	7,54	4,27	75,20	68,69
+210	6,41	6,41	68,79	62,28
+149	7,94	4,46	60,85	57,82
+105	4,98	5,89	55,87	51,93
+74	5,97	5,28	49,90	46,65
+53	5,71	4,77	44,19	41,88
+37	6,62	4,78	37,57	37,10
-37	37,57	37,10	-	-
	100,00	100,00		

## 9. COMENTÁRIOS GERAIS E CONCLUSÕES

O minério de Fortaleza de Minas não é suscetível de moagem totalmente autógena, processo "FAG", na escala estudada (500 kg/h).

A troca das grelhas de descarga do moinho de 12 para 6 mm, bem como a troca da malha da peneira de fechamento do circuito de 1,2 para 3 mm, contribuíram positivamente para redução da carga circulante em termos percentuais de 180 no processo "FAG" para 14 no "SAG".

O processo de cominuição, "FAG" ou "SAG", não tem interferência significativa sobre a distribuição do produto de moagem, estando a fração fina (passante -37 $\mu$ m) em 37%.

Não ficou evidenciada a formação de uma granulometria crítica nos ensaios realizados.

A energia líquida requerida no processo "SAG" na ponta do eixo de saída do redutor (ponto B, Figura 2) para cominuição do minério de Fortaleza de Minas até P<sub>80</sub> de 590  $\mu$ m é de ~ 9,3 kWh/t.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MULAR, A.L. AND JERGENSEN II, G.V. Factors which influence selection of comminution circuits. BARRATT, D.J. AND SOCHOCKY, M.A. Design and installation of comminutio circuits. New York: Society of Mining Engineers, 1982 (chapter 1).
2. MULAR, A.L. AND JERGENSEN II, G.V. Ore sampling for equipment and flowsheet selection. WAKEMAN, J.S. Design and installation of comminution circuits. New York: Society of Mining Engineers, 1982 (chapter 3).
3. WYSLOUZIL, D. M. Testing methods and measurements. In: AUTOGENOUS GRINDING SEMINAR, 26, 1978, Trondheim, Norway.
4. FIGUEIRA, H. V., SAMPAIO, J.A. Moagem autógena de itabirito em escala piloto. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1980.
5. KOPPERS COMPANY. INC. Erection and operation instructions for hardinger mills. [S.n.t.], 1978.
6. PEELE, R. Power and power machinery. Mining engineers' handbook, 3 rd ed. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc. v.II (section 40).

7. BAUMEISTER, R. Instruments and Control. Standard handbook for mechanical engineers', 8 rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company. (section 16).
8. WEISS, N.L. Wet semiautogenous mills. JERGENSEN, G.V AND PENA, R.F. SME mineral processing handbook. New York: Society of Mining Engineers, 1985. (section 3C - chapter 4).
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. Moinho de bolas; determinação do índice de trabalho: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 6p. (Projeto 1: 15.06-001)