



## PARTE III MOAGEM



### CAPÍTULO 9 – ENSAIOS DE MOAGEM EM LABORATÓRIO

**João Alves Sampaio**

Engenheiro de Minas/UFPE, Mestre e Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ  
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

**Carla Napoli Barbato**

Engenheira Química - Universidade Federal Fluminense, Mestre em Engenharia de Materiais e Metalúrgica/COPPE-UFRJ  
Doutoranda em Engenharia Química/EQ-UFRJ



## 1. INTRODUÇÃO

Na etapa de preparação de amostra, há necessidade da britagem e moagem a uma determinada granulometria, sendo o tempo de moagem obtido com base em uma série de ensaios devidamente programados. Esses ensaios têm por finalidade a redução granulométrica das amostras para estudos de laboratório e não correspondem a ensaios adicionais para medida de consumo de energia na moagem.

Neste trabalho, os ensaios foram conduzidos com moinhos de barras e de bolas, em escala de laboratório, utilizando amostra de minério de feldspato da região Borborema-Seridó, Rio Grande do Norte. O moinho de bolas é indicado na preparação de amostras, quando se deseja moer uma maior quantidade de minério ou quando se pretende moer a amostra a uma granulometria mais fina. Em outras situações é preferível usar o moinho de barras, em decorrência da baixa produção de finos e da praticidade operacional (Barrat e Sherman, 2002).

## 2. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A primeira etapa dos trabalhos consiste na coleta de fragmentos de rochas para confecção de lâminas delgadas ou seções polidas, visando estudos petrográficos e mineralógicos úteis aos estudos de liberação. Esse procedimento só é possível quando o minério não está alterado, isto é, quando se trata de rocha fresca. Além disso, é indicado para estudos de determinação do grau de liberação (Herbst *et al.*, 2003).

Na segunda etapa procede-se a britagem da amostra, conduzida com cuidado, para evitar contaminação. No início, o operador deve remover a graxa ou óleo por ventura existente no britador ou em outro equipamento de fragmentação. Igualmente, remover os resíduos de outras amostras, previamente, utilizadas nos equipamentos.

Nos testes de laboratório, os equipamentos indicados para britagem primária são britadores de mandíbulas, nos quais a amostra é reduzida a uma granulometria abaixo de 6,0 mm. Na segunda etapa, britagem secundária, utilizam-se britadores de rolos para reduzir a granulometria da amostra a

valores menores que 1,5 ou 0,8 mm, dependendo do tipo de minério e/ou finalidade do estudo. Este procedimento permite a redução granulométrica da amostra, com pouca produção de finos, razão pela qual não se recomenda o uso dos moinhos de discos. Na Figura 1, pode-se observar o diagrama de fluxo de etapas de preparação da amostra.

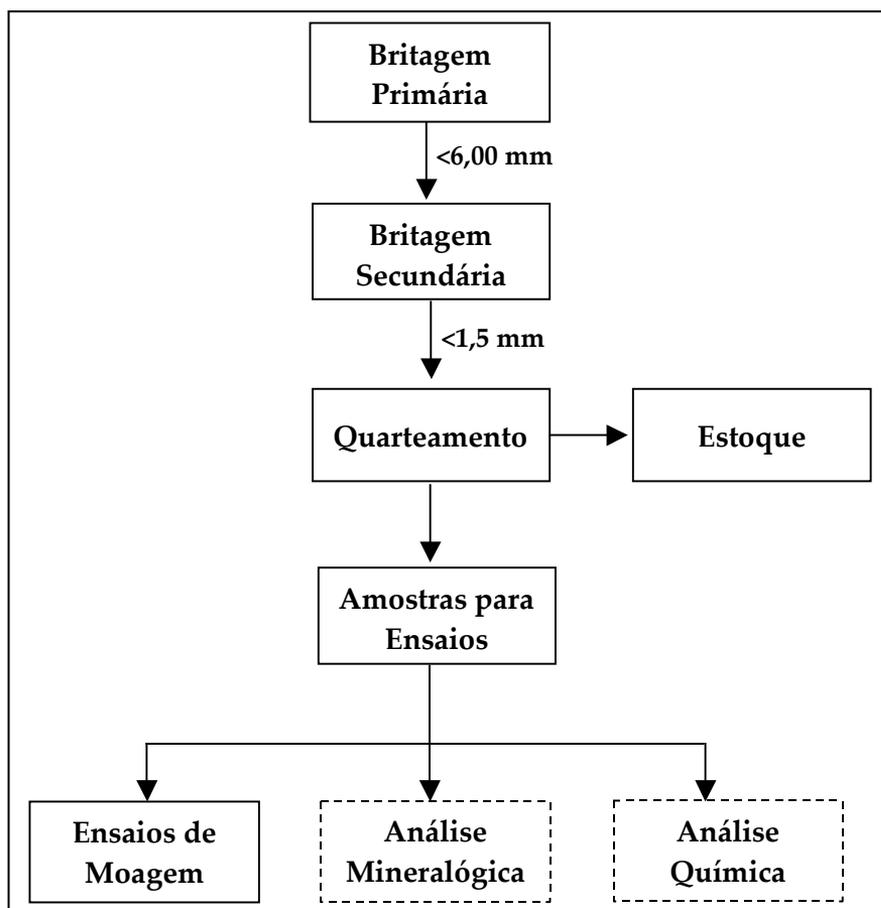


Figura 1 – Procedimentos da etapa de preparação da amostra

Após a britagem, a amostra é homogeneizada e quarteada em alíquotas que variam entre 500 e 2.000 g, de acordo com o planejamento do estudo feito pelo pesquisador responsável pelos trabalhos de pesquisa. A obtenção dessas amostras obedece aos métodos de amostragem e preparação já conhecidos pelo operador. Em seguida, as amostras são estocadas para utilização na etapa

de moagem. Durante o período de estocagem, deve ser evitada a contaminação e/ou alteração da amostra.

Devido à ineficiência dos moinhos pequenos usados em laboratório, não se recomenda a moagem de amostras com granulometria mais grossa que 1,5 mm. Os moinhos mais recomendados são de barras, bolas ou porcelana, este para o caso das amostras, em que a contaminação com ferro é prejudicial às etapas de beneficiamento subseqüentes. Na moagem a úmido, é usual a operação com percentagem de sólidos na faixa de 50 a 65% (Mosher e Bigg, 2002).

Na elaboração destas instruções foram utilizados os seguintes equipamentos:

- (i) uma unidade motora com velocidade controlada;
- (ii) um moinho de barras com diâmetro de 150 mm e comprimento de 300 mm, fabricado em aço inoxidável (Figura 2);
- (iii) dez barras com diâmetro de 21 mm e comprimento 293 mm, fabricadas também em aço inoxidável (Figura 2);
- (iv) um conjunto de peneiras de laboratório série Tyler e um peneirador vibratório (Figura 2);
- (v) um cronômetro para controle do tempo de moagem;
- (vi) baldes para coleta de amostras.

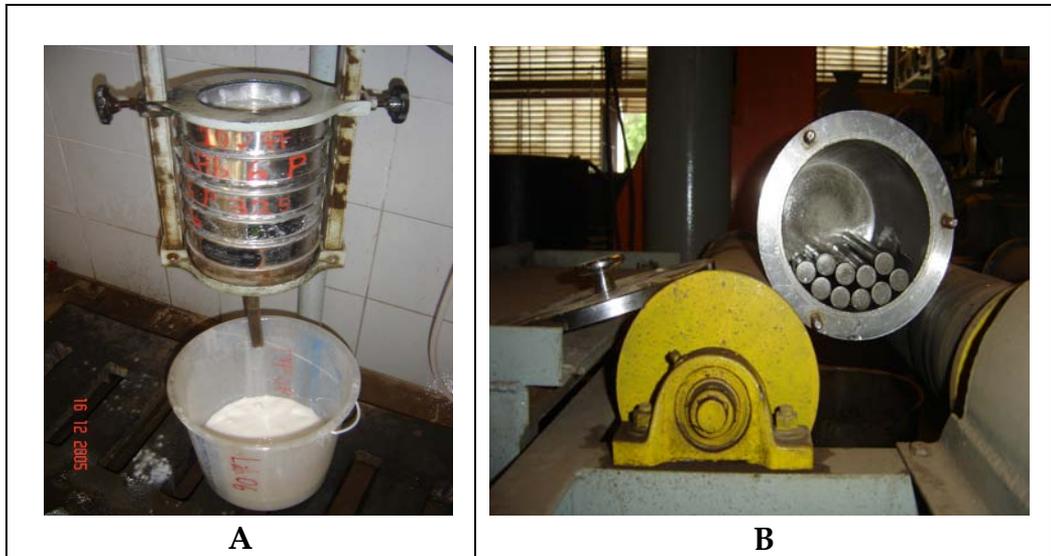


Figura 2 – Equipamentos existentes no CETEM e utilizados nos ensaios de moagem. Em A, conjunto de peneiras e um peneirador vibratório, em B, a unidade motora com moinho de barras utilizada nos testes.

O moinho de barras opera com velocidade de rotação da ordem de 65% da sua velocidade crítica (Equação 1) (Figueira *et al.*, 2004). Esta velocidade, constante para todos os ensaios, deve ser monitorada pelo operador. Para tanto, o mesmo deve utilizar o sistema mecânico de redução de velocidades, além de um inversor de frequência, para controle da velocidade (rpm) do motor. A medida da velocidade de rotação do moinho é feita com auxílio de um medidor estroboscópico ou outro equipamento devidamente calibrado. Dessa forma, conseguem-se valores confiáveis da velocidade de rotação do moinho.

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{2 r}} \quad [1]$$

onde:

$n_c$  = velocidade crítica do moinho (rpm)

$r$  = raio do moinho (m)

O tempo de moagem para cada ensaio depende da natureza do minério e é estabelecido previamente pelo pesquisador. Em geral, os tempos de moagem variam em intervalos de 5 min. Sugere-se a realização de ensaios com os seguintes tempos de moagem: 5; 10; 15; 20; 25; 30 min, ou mais, dependendo, sobretudo, da resposta do minério a essas condições de moagem.

Após a moagem transfere-se a amostra do moinho para um recipiente, com o devido cuidado, para evitar perdas durante o manuseio. Na etapa seguinte, realiza-se o teste de peneiramento, conforme instruções contidas no Capítulo 3.

Os resultados da análise granulométrica são expostos na forma ilustrada na Tabela 1, sendo o valor 0 (zero) para o tempo de moagem corresponde à distribuição granulométrica do minério na alimentação do moinho, ou seja, antes da sua moagem. Na Figura 3, no eixo das ordenadas, estão os tempos de moagem e, nas abscissas, as percentagens passantes relativas a cada teste de moagem. O traçado deste gráfico pode ser obtido por meio de aplicativos existentes na maioria dos PCs.

Tabela 1 – Resultados obtidos nos testes de moagem com moinho de barras, utilizando minério de feldspato da região Borborema-Seridó, RN.

Malhas	Abertura (mm)	% Passantes						
		t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>
14	1,168	54,41	98,43	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
20	0,833	41,47	89,40	99,62	100,00	100,00	100,00	100,00
28	0,589	29,59	68,10	92,40	99,71	98,08	100,00	100,00
35	0,417	22,46	52,29	72,95	95,69	97,65	99,90	99,94
48	0,295	17,60	38,61	52,44	76,54	91,12	97,28	99,16
65	0,208	13,02	29,83	39,62	57,12	75,89	88,70	94,40
100	0,147	11,03	22,43	28,69	41,12	54,34	68,79	81,97
150	0,104	7,20	16,43	23,15	30,72	39,64	48,13	61,94
200	0,074	5,44	12,83	17,69	23,46	29,68	34,49	44,14
325	0,053	3,49	8,29	11,69	14,99	19,35	20,60	27,61
400	0,037	2,64	6,36	9,67	12,17	14,92	17,99	21,36

t = tempo moagem (min).      t<sub>0</sub>= 0; t<sub>1</sub>= 5; t<sub>2</sub>= 10; t<sub>3</sub>= 15; t<sub>4</sub>= 20; t<sub>5</sub>= 25; t<sub>6</sub>= 30.

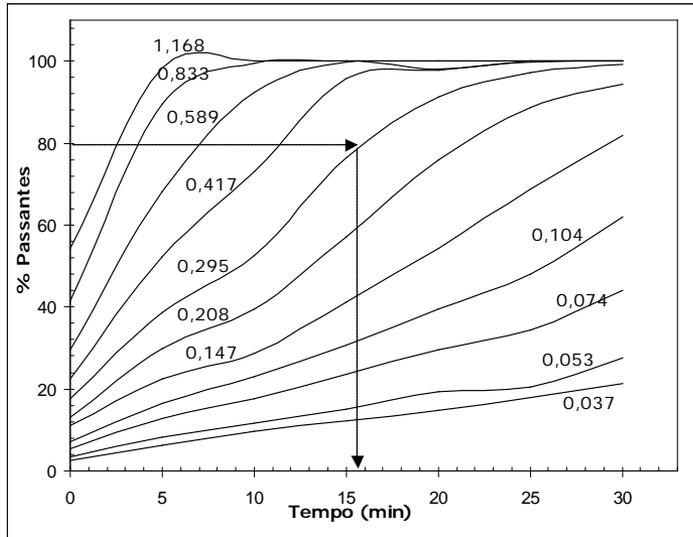


Figura 3 – Curva de moagem do minério de feldspato pegmatítico da região Borborema-Seridó. As aberturas das peneiras estão expressas em mm.

Na Figura 3, é possível determinar o tempo de moagem necessário à redução granulométrica de uma amostra do feldspato, desde que as mesmas condições operacionais do ensaio sejam mantidas. No presente exemplo foi determinado o tempo de moagem para se moer uma amostra deste minério, com 80% passante na peneira com abertura de 0,295 mm.

### 3. ENSAIOS COM MOINHO DE BOLAS

Os ensaios foram realizados em um moinho de bolas com dimensões de 185x160 mm (diâmetro *versus* comprimento), sendo a velocidade de rotação do moinho equivalente a 65% da velocidade crítica. Na Tabela 2, constam os dados da carga de bolas utilizadas, bem como os resultados obtidos nos testes de moagem, nos quais foi utilizada a mesma amostra de minério de feldspato da região Borborema-Seridó, RN.

Os ensaios foram realizados de modo análogo àqueles feitos com o moinho de barras. No presente exemplo, o tempo de moagem para moer uma amostra de 1,0 kg de feldspato encontra-se no gráfico da Figura 3.

Tabela 2 – Quantidade, diâmetro e volume das bolas utilizadas nos testes de moagem e os resultados dos mesmos, na qual utilizou-se o minério de feldspato da região Borborema-Seridó, RN.

Características da carga de bolas utilizadas no teste								
Nº Bolas	Diâmetro (cm)	Peso (g)		Volume (cm <sup>3</sup> )				
33	1,5	191		58,41				
132	2,7	2.680		1.359,6				
8	3,2	868		6.444,0				
Total	-	3.738		8.362,01				
Resultados obtidos nos testes de moagem com moinho de bolas								
Malhas	Abertura (mm)	% Passantes						
		t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>
14	1,168	54,41	66,77	70,47	73,79	77,48	78,60	79,83
20	0,833	41,47	53,89	58,56	63,07	68,83	70,02	72,30
28	0,589	29,59	42,00	46,95	52,67	58,66	60,59	64,40
35	0,417	22,46	32,54	37,61	43,62	50,39	52,87	57,05
48	0,295	17,60	26,55	29,66	36,14	42,70	45,37	50,02
65	0,208	13,02	19,23	22,70	27,55	33,96	36,36	40,42
100	0,147	11,03	14,16	16,75	21,42	26,65	29,03	32,19
150	0,104	7,20	10,67	11,92	16,24	20,22	21,95	24,53
200	0,074	5,44	8,12	8,84	12,58	15,86	17,66	18,91
325	0,053	3,49	5,12	5,46	8,55	10,66	12,57	12,39
400	0,037	2,64	3,80	4,07	6,52	8,28	9,81	9,46
t = tempo moagem (min). t <sub>0</sub> = 0; t <sub>1</sub> = 5; t <sub>2</sub> = 10; t <sub>3</sub> = 15; t <sub>4</sub> = 20; t <sub>5</sub> = 25; t <sub>6</sub> = 30.								

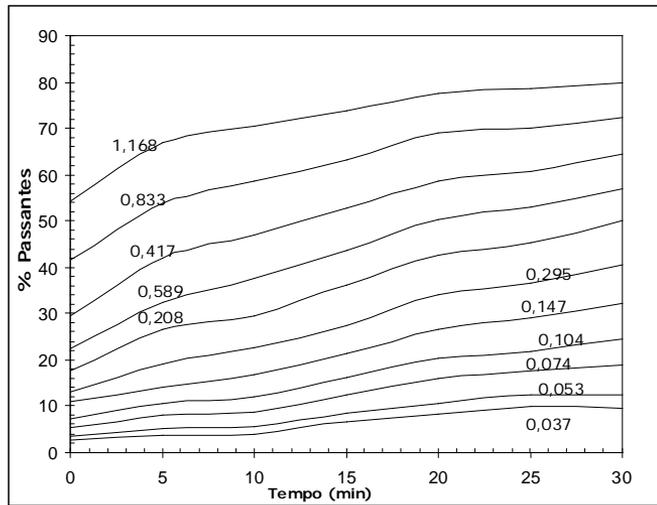


Figura 4 – Curva de moagem em moinho de bolas com minério de feldspato pegmatítico da região Borborema-Seridó (abertura das peneiras em mm).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrat, D. e Sherman, M. Factors which influence the selection of comminution circuit. In: Mullar, A. L.; Halbe, D. N. e Barratt, D. J. (Ed.). Mineral processing plant design, practice and control. vol.1. SME, 2002, p.539-565.
- Figueira, H. V. O.; Almeida, S. L. M. e Luz, A. B. Cominuição. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios, 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.113-182.
- Herbst, J. A.; Lo, Y. C. e Flintoff, B. Size liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). Principles of mineral processing. SME, 2003, p.61-118.
- Mosher, J. e Bigg, T. Bench-scale and pilot plant tests for comminution circuit design. In: Mullar, A. L.; Halbe, D. N. e Barratt, D. J. (Ed.). Mineral processing plant design, practice and control. vol.1. SME, 2002, p.123-135.