

A INFLUÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS NA MOAGEM DE MINÉRIO DE NIÓBIO

M. V. P. Benoti¹, H. Delboni Jr.¹

1 - EPUSP, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - Av. Prof. Mello Moraes, 2373, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo - SP, Brasil

E-mail: binotti@nettaxi.com e hdelboni@usp.br

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo verificar a influência de dez aditivos químicos na moagem de minério de nióbio. Os ensaios de moagem em laboratório foram realizados sob condições controladas, mantendo-se constante a carga de corpos moedores, volume de polpa, porcentagem de sólidos e velocidade de rotação do moinho variando-se, apenas, o tipo e a dosagem do aditivo. Através de recursos estatísticos (teste de hipótese) verificou-se que as distribuições granulométricas dos produtos de moagem do minério de nióbio com aditivos apresentaram diferenças significativas em relação à distribuição granulométrica do produto da moagem sem aditivo. Verificou-se, também, a relação destes compostos na geração de finos, ou seja, material com tamanho inferior a 0,045 mm, bem como a influência dos aditivos no consumo energético específico da moagem.

PALAVRAS-CHAVE: cominuição, moagem, aditivos químicos.

1. INTRODUÇÃO

As características peculiares dos minérios brasileiros determinam o desenvolvimento de tecnologias diferenciadas de tratamento que são determinantes para seus aproveitamentos econômicos. Neste contexto, é de suma importância o aperfeiçoamento tecnológico de processos existentes, bem como a pesquisa e o desenvolvimento de novas abordagens técnicas.

Embora se observe, na última década, uma evolução em equipamentos e processos de moagem, pouca ou nenhuma atenção foi destinada à melhoria de desempenho de moinhos em faixas finas e ultrafinas. Este fato é atribuído à constatação de que os principais desenvolvimentos foram obtidos em países do hemisfério norte contidos em áreas de clima temperados, onde é praticamente desprezível a quantidade de jazimentos com manto de intemperismo significativo.

Inovações importantes surgiram no processo de cominuição, tais como: adaptação ou melhoria de condições operacionais existentes (apesar de demandar mudanças operacionais relativamente simples em circuitos industriais existentes, carece de recursos comprovadamente eficazes para previsão de resultados, prevalecendo uma abordagem empírica e de eficácia questionável) e a introdução de compostos químicos modificadores de viscosidade e outras propriedades reológicas da polpa no interior do moinho apresentando resultados excepcionais, porém para situações específicas, o que demonstra a necessidade de estabelecimento de metodologia de análise de resultados e previsão de efeitos em circuitos industriais. Esta última inovação será abordada ao longo deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aditivos ou coadjuvantes de moagem são certos materiais adicionados nos moinhos tubulares em quantidades muito pequenas (gramas de aditivo por tonelada de material alimentado), em forma sólida, líquida ou vaporizada, com o objetivo de melhorar as características do produto da moagem.

O uso de aditivos também é comum em outras áreas, como a indústria de cimento em moagem de clínquer e matérias-primas da fabricação do cimento. As fábricas de cimento empregam aditivos líquidos em função do tipo de material, da granulometria requerida do cimento e das condições operacionais. A dosagem varia entre 0,2 a 1,0% em massa, podendo chegar a produzir um aumento na capacidade produtiva de moagem de até 40%. Os aditivos mais usuais na moagem de cimento são os glicóis (etilenoglicol, dietilenoglicol e polietilenoglicol) e a tri-etanol-amina. Também é comum a adição de butil-amina e tri-etanol-amina na moagem de matérias-primas do cimento. Emprega-se, também, outros aditivos em processo industriais subseqüentes a moagem, para evitar a aglomeração entre partículas e propiciar a estabilização da superfície dos finos.

Segundo Prasher (1987), com a introdução de aditivos de moagem, o comportamento da fluidez das polpas torna-se bem diferente, pois a adsorção destes na superfície das partículas propiciam uma maior mobilidade, aumentando a probabilidade de choque de uma partícula com uma bola no interior do moinho. Por essa razão, Opoezky (1981) demonstrou que produto de uma moagem com aditivos apresenta uma distribuição granulométrica mais uniforme se comparado a uma moagem sem aditivos apresentando, ainda, um retardo na aglomeração das partículas finas que estão dispersas.

De fato, Locker e Von Seebach (1972) afirmaram que aditivos químicos como etilenoglicol e butil-amina na moagem a seco afetam a quebra de partículas grossas, mas torna-se um fator importante na quebra de partículas finas. No contexto da moagem a úmido, Melloy e Crabtree (1967) estudaram o efeito da variedade de líquidos como água, glicerina, solução de açúcar, clorofórmio, acetona, n-hexano etc. e concluíram que a ação dos aditivos minimiza o choque entre bolas, convertendo a energia perdida em trabalho de quebra. Isto possibilita um incremento de 10 a 20% na capacidade de produção com a escolha correta do aditivo.

Há uma variedade de hipóteses que tentam explicar a ação dos aditivos na moagem. O mecanismo, na qual se baseiam as hipóteses, é atribuído a Reh binder (1932) que sugeriu a adsorção dos aditivos na superfície do sólido pela força coesiva. Em particular, a adsorção dos aditivos nas fendas dos sólidos influenciam na energia que possa ser aplicada naquele ponto (Klimpel e Austin 1982).

Westwood e Stoloff (1966) demonstraram o efeito da adsorção de moléculas em várias superfícies e definiram este fenômeno como efeito “químico-mecânico”. As moléculas adsorvidas pela superfície deslocam-se sobre ela, em concordância com o maior gradiente de tensões e neste local a superfície é mais frágil. Certamente em um ambiente que ocorra este fenômeno, o módulo das tensões principais requeridas para iniciarem a quebra da partícula será afetada.

Hasegawa et al (2001) e outros estudaram os efeitos de álcoois e glicóis em moagem a úmido de quartzo na fração passante em 74 µm sem qualquer contaminante. Utilizando sete tipos diferentes de álcoois e três tipos de glicóis como aditivos químicos concluiu que todos os aditivos apresentaram uma tendência em aumentar a área específica do produto com o tempo, alcançando um valor máximo e decaindo em seguida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra foi obtida a partir da alimentação nova do circuito de moagem da usina de beneficiamento da CBMM em Araxá, MG.

Embora apresentarem composições químicas diferentes, os dez reagentes empregados nos ensaios são classificados no grupo dos tensoativos, ou seja, modificadores de tensão superficial e modificadores de viscosidade. A Tabela I, da próxima página, apresenta os aditivos químicos usados nos ensaios de moagem, para facilitar a linguagem foram empregadas siglas para os compostos, também apresentadas na mesma tabela.

Tabela I: Aditivos químicos utilizados nos ensaios de moagem.

Aditivo químico	Abreviação
Derivado do ácido poliacrílico e sal de sódio em solução aquosa	APS
Oxethylieres Nonylphenolpolyglykoether 1-7 EO	ONG
Etilenoglicol	MEG
Dietilenoglicol	DEG
Propilenoglicol	PEG
Poliacrilato de sódio	POL
Poliacrilatos, derivados de aminas primárias, secundárias, terciárias e poliglicóis	PAG
Poliacrilatos, derivados de aminas primárias, secundárias, terciárias e poliglicóis com concentração diferente do composto acima	PAG2
Derivados de aminas primárias, secundárias, terciárias	AMD
Poliglicóis	POG

Os ensaios foram divididos em duas etapas: preparação das amostras e execução da moagem. Estas etapas são descritas a seguir:

Preparação das amostras:

- peneiramento de todo material na malha de 13,2 mm;
- secagem do minério retido na malha de 13,2 mm em estufa;

- c) britagem da fração retida na malha 13,2 mm até tornar-se passante nesta malha;
- d) construção de uma pilha prismática alongada com todo o material (seco e úmido), pilha com aproximadamente 5,7 m de comprimento;
- e) seccionamento transversal, com cortes espaçados de 15 cm e o material acondicionado em sacos plásticos.

Etapa preliminar:

- a) escolha do moinho;
- b) preparação de cargas padronizadas de corpos moedores;
- c) preparação da alimentação para a moagem;
- d) determinação do tempo de moagem.

Ensaio de moagem com aditivos:

- a) preparação dos aditivos;
- b) execução da moagem;
- c) quarteamento do produto da moagem (polpa);
- d) peneiramento a úmido do material fragmentado (até a malha 20 μ m);
- e) quantificação do consumo energético específico (kWh/t) na moagem.

A Tabela II mostra um resumo das condições padrão adotadas para a moagem em laboratório.

Tabela II: Resumo das condições padrão adotadas para a moagem em laboratório.

Variável	Valor
Volume interno do moinho	9,5 L
% volume ocupado pela carga	40%
Massa da carga de bolas	17.650 g
% de vazios entre as bolas	48%
Volume de polpa	2,0 L
% porcentagem de sólidos em massa	75%
% porcentagem de sólidos em volume	43,5%
Velocidade de rotação do moinho	64 rpm
% da velocidade crítica	71
Massa de sólidos	3.393 g
Massa específica do sólido	3,9 t/m ³

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados dos ensaios de moagem são apresentados em tabelas de distribuições granulométricas dos produtos de moagem com aditivos.

Inicialmente as dosagens utilizadas nos ensaios corresponderam à escala exponencial, ou seja, dosagens de 50, 500 e 5000 g/t. Com o objetivo de investigar o resultado com dosagens menores foram executados ensaios nas dosagens de 100 e 150 g/t apenas para os aditivos ONG e APS.

O ensaio de moagem com aditivo APS com dosagem de 5.000 g/t foi realizado, mas o material compactou no interior do moinho impossibilitando o manuseio e o peneiramento para a determinação da distribuição granulométrica.

Os ensaios seguintes foram executados com os glicóis, muito comuns na moagem a seco de clínquer de cimento. Nas tabelas estão listadas as distribuições granulométricas destes aditivos com dosagens de 500 e 5.000 g/t. Os ensaios conduzidos com dosagens mais baixas, quais sejam, de 50, 100 e 150 g/t não apresentaram resultados consistentes, razão pela qual não foram incluídos no presente trabalho.

Tabela III: Distribuições granulométricas de ensaios com ONG.

Aditivo químico		ONG			
Dosagem (g/t)	50	100	150	500	5.000
Malhas (mm)	% passante				
0,300	100	99,96	100	100	100
0,150	99,21	98,76	99,20	98,33	97,98
0,106	95,61	94,46	95,12	92,26	91,96
0,075	85,19	83,97	85,06	81,34	80,37
0,045	63,63	61,86	63,45	60,32	59,99
0,038	55,14	53,72	55,08	52,43	51,02
0,020	41,35	40,10	41,91	39,06	37,64

Tabela IV: Distribuições granulométricas de ensaios com APS.

Aditivo químico		APS			
Dosagem (g/t)	50	100	150	500	
Malhas (mm)	% passante				
0,300	100	100	100	100	
0,150	99,03	99,31	99,17	99,07	
0,106	95,58	95,77	95,50	95,26	
0,075	85,53	85,68	84,56	84,42	
0,045	62,25	64,99	62,98	62,58	
0,038	53,91	56,38	54,12	53,82	
0,020	40,41	42,62	40,67	39,94	

Tabela V: Distribuições granulométricas dos ensaios com MEG, DEG e PEG.

Aditivo químico		MEG		DEG		PEG	
Dosagem (g/t)	500	5.000	500	5.000	500	5.000	
Malhas (mm)	% passante						
0,300	100	100	100	100	100	100	
0,150	98,68	97,99	98,59	97,59	98,49	98,13	
0,106	93,98	91,95	93,40	91,00	93,72	92,07	
0,075	82,31	80,10	82,49	78,67	82,72	79,85	
0,045	62,39	58,40	61,37	58,95	61,39	58,47	
0,038	53,76	50,66	52,75	51,01	53,35	51,08	
0,020	40,44	36,54	39,12	37,91	40,37	38,67	

Tabela VI: Distribuições granulométricas dos ensaios com POL, PAG e PAG2.

Aditivo químico		POL		PAG		PAG2	
Dosagem (g/t)	500	5.000	500	5.000	500	5.000	
Malhas (mm)	% passante						
0,300	100	100	100	100	100	100	
0,150	98,98	98,59	98,64	98,82	97,73	98,64	
0,106	94,64	93,63	93,87	93,44	92,13	93,84	
0,075	83,86	81,32	81,06	82,23	80,03	82,27	
0,045	62,14	59,15	60,94	60,26	58,55	60,60	
0,038	53,91	50,91	52,37	50,85	50,22	52,09	
0,020	39,65	37,69	38,33	37,12	36,76	39,06	

Tabela VII: Distribuições granulométricas dos ensaios com AMD e POG.

Aditivo químico	AMD		POG	
Dosagem (g/t)	500	5.000	500	5.000
Malhas (mm)	% passante			
0,300	100	100	100	100
0,150	98,59	98,12	98,30	98,05
0,106	93,20	91,68	92,46	92,49
0,075	81,95	79,67	80,58	80,64
0,045	60,99	58,14	59,80	59,00
0,038	52,47	50,03	51,96	50,24
0,020	38,65	37,45	38,76	37,59

Com as distribuições granulométricas obtidas em cada ensaio, foram calculados os respectivos valores do parâmetro P_{80} . Com os valores do W_i do minério, P_{80} e F_{80} , determinou-se o valor da energia consumida na cominuição do ensaio padrão ($W_p = 10,0$ kWh/t) e as energias consumidas nos ensaios de moagens com aditivos (W_E). A Tabela da próxima página, mostra os valores de eficiência calculados para cada ensaio com aditivo.

Tabela VIII: Energia específica requerida na moagem.

Aditivo	Dosagem (g/t)	F_{80} (μ m)	P_{80} (μ m)	W_E (kwh/t)
ONG	50	1.402	65	9,7
	100	1.402	68	9,5
	150	1.402	66	9,7
	500	1.402	68	9,5
	5.000	1.402	74	8,9
APS	50	1.402	65	9,7
	100	1.402	64	9,8
	150	1.402	66	9,6
	500	1.402	67	9,5
MEG	500	1.402	70	9,2
	5.000	1.402	75	8,9
DEG	500	1.402	70	9,3
	5.000	1.402	77	8,7
PEG	500	1.402	70	9,3
	5.000	1.402	75	8,8
POL	500	1.402	72	9,1
	5.000	1.402	73	9,1
PAG	500	1.402	73	9,0
	5.000	1.402	71	9,2
PAG2	500	1.402	75	8,9
	5.000	1.402	71	9,2
AMD	500	1.402	71	9,2
	5.000	1.402	76	8,8
POG	500	1.402	74	8,9
	5.000	1.402	74	8,9

Análises preliminares das tabelas apresentadas indicam valores bastante próximos das distribuições granulométricas resultantes da moagem com aditivos. A mesma observação é válida para W_E , calculado a partir dos ensaios realizados.

Outro ponto fundamental do emprego de aditivos na moagem de minério de nióbio é modular a geração de finos no produto da moagem, já que a recuperação do mineral útil em circuitos de flotação decresce com a diminuição de tamanho. Na Tabela XIX apresenta os resultados de cada ensaio com a fração passante na malha 0,045mm.

Tabela IX: Porcentagem passante em 0,045 mm em cada ensaio.

Aditivo	Dosagem (g/t)	% passante (menor que 0,045 mm)
Padrão	-o-	65,59
ONG	50	63,63
	100	61,86
	150	63,45
	500	62,14
	5.000	59,99
APS	50	62,25
	100	64,99
	150	62,98
	500	62,58
MEG	500	62,39
	5.000	58,40
DEG	500	61,37
	5.000	58,95
PEG	500	61,39
	5.000	58,47
POL	500	60,32
	5.000	59,15
PAG	500	60,94
	5.000	60,26
PAG2	500	58,55
	5.000	60,60
AMD	500	60,99
	5.000	58,14
POG	500	59,80
	5.000	59,00

Decidiu-se verificar através de análises estatísticas se as diferenças das distribuições granulométricas entre os ensaios são significativas.

Considerando-se como hipótese nula (H_0) a de que a diferença por fração da distribuição granulométrica do produto da moagem com aditivo e da moagem sem aditivo seja nula. A hipótese a ser verificada é:

$$H_0, \mu_d = 0$$

$$H_1, \mu_d \neq 0$$

A Tabela , da próxima página, apresenta os resultados dos testes de hipóteses para cada ensaio.

Conclui-se que os compostos químicos APS, POL e PAG não modificaram a granulometria do produto. Os demais compostos ONG, MEG, DEG, PEG, PAG2, AMD e POG para dosagens elevadas de 500 e 5.000 g/t apresentaram distribuições granulométricas diferentes do produto da moagem sem aditivo.

Os resultados apresentados a seguir referem-se a geração de finos no produto da moagem, portanto são considerados, apenas o material menores que 0,045 mm, verificando se houve a redução na produção de finos nos produtos de moagem com aditivos.

A maioria dos aditivos conseguiu diminuir a geração de finos (partículas com diâmetros inferiores a 0,045 mm) no produto da moagem comparado com o produto da moagem sem aditivo. Apenas os compostos: ONG com dosagens de 50 e 150 g/t; APS, 100 g/t e PEG, 500 e 5.000 g/t não tiveram bons resultados.

Tabela X: Resultados dos testes de hipóteses para as distribuições granulométricas dos produtos de moagem com aditivos.

Aditivo	Dosagem (g/t)	Resultado do teste
ONG	50	Aceita-se Ho
	100	Aceita-se Ho
	150	Aceita-se Ho
	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho
APS	50	Aceita-se Ho
	100	Aceita-se Ho
	150	Aceita-se Ho
	500	Aceita-se Ho
MEG	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho
DEG	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho
PEG	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho
POL	500	Aceita-se Ho
	5000	Aceita-se Ho
PAG	500	Aceita-se Ho
	5000	Aceita-se Ho
PAG2	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho
AMD	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho
POG	500	Rejeita-se Ho
	5000	Rejeita-se Ho

Tabela XI: Resultados dos testes de hipóteses para distribuições granulométricas abaixo de 0,045 mm dos produtos de moagem.

Aditivo	Dosagem (g/t)	Resultado do teste
ONG	50	Aceita-se Ho
	100	Rejeita-se Ho
	150	Aceita-se Ho
	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
APS	50	Rejeita-se Ho
	100	Aceita-se Ho
	150	Rejeita-se Ho
	500	Rejeita-se Ho
MEG	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
DEG	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
PEG	500	Aceita-se Ho
	5.000	Aceita-se Ho
POL	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
PAG	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
PAG2	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
AMD	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho
POG	500	Rejeita-se Ho
	5.000	Rejeita-se Ho

5. CONCLUSÕES

As conclusões sobre a influência dos aditivos químicos usados na moagem de minério de nióbio são enumeradas a seguir:

1. Com base nos testes de hipóteses de dados emparelhados com 99% de significância, as distribuições granulométricas dos produtos das moagens do minério de nióbio com os aditivos ONG, MEG, DEG, PEG PAG2, AMD e POG apresentaram diferenças em relação à distribuição granulométrica do produto da moagem do caso base (sem aditivos químicos). Os demais aditivos químicos não apresentaram diferença segundo o nível de significância adotado.

2. Os resultados dos testes de hipóteses para granulações finas (abaixo de 0,045 mm) indicaram que apenas o composto PEG não apresentou diferença na curva granulométrica em relação ao caso base; os demais compostos apresentaram diferença significativa.

3. De acordo com os testes de hipóteses apresentados na Tabela , os compostos ONG, MEG, DEG, PEG PAG2, AMD e POG propiciaram diferença na distribuição granulométrica do produto da moagem, mas com dosagens elevadas de aditivos 500 e 5.000 g/t.

Todos os compostos influenciaram na geração de finos no produto da moagem, exceto o aditivo PEG, mas as dosagens foram variadas, é o caso do ONG com dosagens de 100, 500 e 5.000 g/t e APS com 50, 150 e 500 g/t; os demais aditivos com dosagens de 500 e 5.000 g/t. Em todas as moagens as porcentagens passantes nas malhas inferiores a 0,045 mm foram menores que a moagem sem aditivo, portanto qualquer aditivo em qualquer dosagem altera, mas de modo diferente, a geração de finos no produto da moagem.

4. O consumo energético nos ensaios apresentaram valores bem próximos, excetuando-se os compostos DEG, PEG e AMD com dosagens de 5.000 g/t que apresentaram o menor consumo, comparado com caso base, de 86,9; 88,6 e 88,3 kWh/t respectivamente. Isto indica, conseqüentemente, que os compostos acima reduzem o consumo energético para a moagem de nióbio.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- HASEGAWA, H.; KIMATA, M.; SHIMANE, M.; SHOJI, T.; TSURUTA, M. The effect of liquid additives on dry ultrafine grinding of quartz. **Power Technology**, v.114, p.145-51. 2001
- KLIMPEL, R. R.; AUSTIN, L. G. Chemical additives for wet grinding of minerals. **Power Technology**, v.31, p. 239-53. 1982.
- LOCHER, F. W.; VON SEEBACH, H.M. the influence of adsorption on industrial grinding. In: **Ind. Eng. Chem. Process Des. Devel.**, 11. 1972. p. 190-7.
- MELOY, T.P.; CRABTREE, D. **Surface tension and viscosity in wet grinding**. Dechema Monograph 57, 1967. p. 405-26.
- OPOCZKY, L. Ways of influencing the particle size distribution of ground products in dry ball mills. In: **Interceram**, 4. 1981. p. 327-89.
- PRASHER, C.L. The physics of breakage. In: **Crushing and grinding process handbook**. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1987. p. 14-45.
- REHBINDER, D.; KALINKOVSKAYA, N. **Journal Tech. Phys. USSR**, 2. 1932. p. 726-55.
- WESTWOOD A.; STOLOFF, N. **Environment sensitive mechanical behavior**. New York: Gordon and Breach, 1966. p. 1-65.