

## Influência do Resíduo *in natura* das Matérias-primas, Carga de Bolas e Resíduo Final no Tempo de Moagem via Úmida em Moinho de Bolas

**Aline Bosa<sup>a,b</sup>, André Silvestri Ferro<sup>a,b</sup>, Augusto Wanderlind<sup>a,b</sup>, Djeisa Pasini<sup>a,b</sup>,  
Marcelo Casagrande Patrício<sup>a,b</sup>, Reginaldo Tassi<sup>a</sup>, Cláudio de Oliveira Modesto<sup>a</sup>,  
Agenor De Noni Jr.<sup>a</sup>, Maykon Cargnin<sup>a\*</sup>**

<sup>a</sup>Instituto Maximiliano Gaidzinski – IMG, Rua Dr. Edson Gaidzinski, 352, 88845-000,  
Cocal do Sul, Santa Catarina, Brasil

<sup>b</sup>Alunos do Curso Técnico de Cerâmica

\*e-mail: maykon.cargnin@imgnet.org.br

**Resumo:** Um dos objetivos do processo de moagem é a redução do tamanho das partículas das matérias-primas, através da ação dos corpos moedores. No processo de moagem via úmida tradicionalmente são utilizados moinhos de bolas, podendo estas ser de alta alumina, pedras de sílex ou porcelana. O choque e o atrito provocado entre os corpos moedores e o material a moer promove a redução das partículas, juntamente com um desgaste dos corpos moedores, alterando a relação entre a carga de bolas com a carga de material a moer, aumentando gradativamente o tempo de moagem, sendo necessário realizar reposições periódicas de elementos moedores. Industrialmente se observa grandes variações no tempo de moagem. O objetivo deste trabalho foi avaliar o nível de importância de três fatores sobre a variação do tempo de moagem. Os fatores considerados foram resíduo *in natura* das matérias-primas, relação carga de bolas/carga de material e resíduo final. Os resultados sugerem que estes fatores são responsáveis por aproximadamente 66% das variações nos tempos de moagem do sistema estudado.

**Palavras-chave:** *resíduo in natura, moinho de bolas, tempo de moagem.*

### 1. Introdução

O processo de moagem, de qualquer indústria cerâmica tem como objetivo a redução do tamanho das partículas do material sólido, podendo este ser uma mistura de diversas matérias-primas. Esta redução proporciona ao material sólido um aumento de sua área superficial, conferindo um aumento nas velocidades de reações sólido-sólido devido ao maior contato entre as partículas. No caso de misturas de matérias-primas, ocorre também uma melhor homogeneização e interação das mesmas, melhorando as características do pó. Na produção de revestimentos cerâmicos este processo pode ser realizado por via úmida ou via seca, dependendo da finalidade e característica do produto que se deseja obter<sup>2</sup>.

O equipamento, tradicionalmente, utilizado na moagem via úmida é o moinho de bolas (também conhecido como moinho de tambor rotativo ou Alsing) onde este pode ser contínuo ou intermitente, segundo a construção mecânica e tipo de alimentação<sup>2,5</sup>. Os elementos moedores podem ser de sílex, porcelana ou alta alumina. Seu revestimento pode ser de borracha, sílex ou tijolos cerâmicos (porcelana ou alta alumina)<sup>1</sup>.

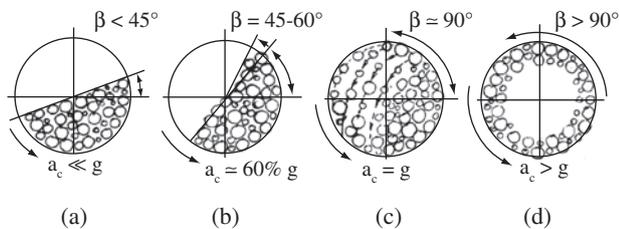
A ação moedora do meio de moagem deve-se a rotação do moinho, provocando o efeito denominado cascata (ângulo da carga de elementos moedores em torno de 45-60°), onde a aceleração centrífuga gira em torno de 60% da aceleração da gravidade, para elementos moedores de alta densidade, proporcionando a máxima ação de moagem, reduzindo o desgaste das bolas e do revestimento do moinho, conforme mostrado na Figura 1 (B)<sup>1</sup>. Dessa forma a velocidade do moinho é um importante parâmetro de operação, mas que normalmente não se dispõe de mecanismos para ajuste.

O rendimento ou eficiência da moagem por moinho de bolas depende de muitos fatores, tais como, quantidade de material a moer, tamanho de bolas, distribuição de bolas e densidade de bolas, velocidade de rotação, entre outros. Desta maneira, industrialmente se verificam oscilações no tempo de moagem. A Figura 2 demonstra o histórico de três meses na variação do tempo de moagem de um moinho industrial. Observa-se que apenas 45% das moagens ocorrem próximas ( $\pm 3,5\%$ ) ao tempo médio de 420 minutos, ou seja, um intervalo de variação de 30 minutos. Ao analisar todas as moagens observa-se que a variação pode chegar até + 35% do tempo médio.

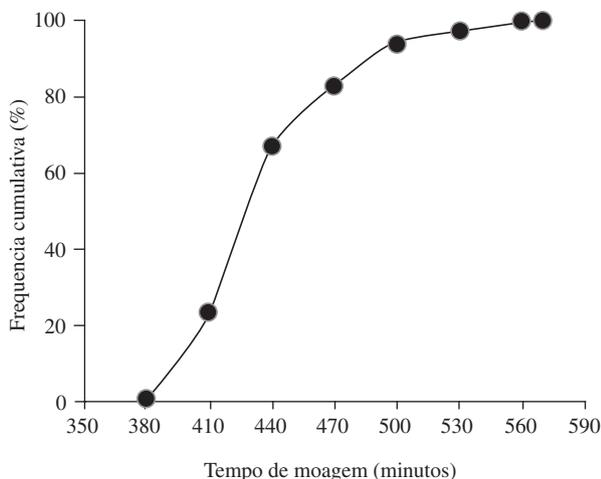
Embora muitos fatores possam influenciar este desempenho; as variações na carga de bolas devido ao desgastes e reposições; bem como variações na distribuição de tamanho de partículas inicial e final das matérias-primas serão avaliados e apresentados neste estudo.

### 2. Eficiência de Moagem

O processo de moagem pode ser influenciado diretamente pela distribuição de bolas no interior do moinho. De acordo com o tipo de distribuição utilizada, teremos diferentes valores para o volume aparente de bolas, volume de vazios, fator de empacotamento e desgaste das bolas, fatores estes determinantes para o rendimento deste processo. Uma maior eficiência de moagem pode-se obter com a ocupação aparente de 35 a 55% do volume útil do moinho sendo preenchido por esferas ou outro tipo de elemento moedor. Para uma carga de bolas nova, com diâmetros bem definidos de 40, 50 e 60 mm, segundo recomendação da literatura<sup>1</sup>, o volume real ocupado pelos elementos de moagem considerado é de 60% do seu volume aparente (fator de empacotamento de 0,60). Dessa forma a



**Figura 1.** Efeito da velocidade no meio de moagem dos moinhos de bolas. (Adaptado de Ribeiro e Abrantes<sup>2</sup>).



**Figura 2.** Histórico de variação do tempo de moagem durante três meses de operação para o moinho estudado.

quantidade de bolas a ser colocada no moinho pode ser calculada, através da Equação 1<sup>1</sup>.

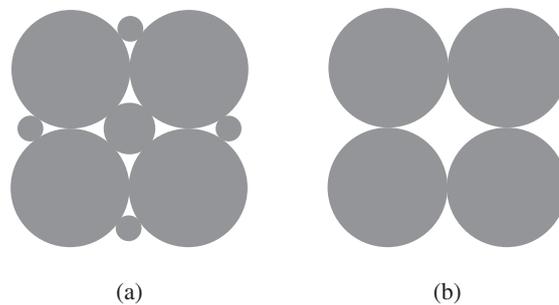
$$Q = \frac{V_u \cdot \rho \cdot p \cdot F}{100} \quad (1)$$

onde: Q = quantidade de carga de bolas (kg);  $V_u$  = volume útil do moinho ( $m^3$ );  $\rho$  = densidade do meio de moagem ( $kg/m^3$ ); p = % de ocupação aparente do meio de moagem; e F = fator de empacotamento.

Ao longo da vida útil do moinho ocorre o desgaste dos elementos moedores pelos choques entre si, entre o revestimento e entre o material a moer<sup>3,5</sup>. Este desgaste promove uma variação nas dimensões do meio de moagem, provocando uma alteração no fator de empacotamento da carga de bolas. Portanto, para um mesmo volume aparente de bolas, pode-se ter diferentes fatores de empacotamento, com isso a relação carga de bolas versus carga de material a moer é diferente, proporcionando diferentes condições de moagem conforme ilustrado na Figura 3. Além de afetar o fator de empacotamento a proporção entre bolas pequenas, médias e grandes também interfere nos mecanismos predominantes na moagem, choque e atrito. Bolas grandes tendem a ser mais eficientes na moagem por choque, ao passo que bolas pequenas por atrito.

Uma prática comum entre as empresas é uma reclassificação periódica da carga de bolas dos moinhos onde normalmente se descartam as bolas abaixo de certo tamanho. Porém relata-se que, em relação às cargas não reclassificadas ocorrem normalmente aumentos nos tempos de moagem, podendo chegar a aumentos de até 10%.

Além destas características relacionadas ao equipamento, outras relacionadas às matérias-primas afetam de maneira significativa o processo de moagem, como por exemplo: a) o índice de trabalho,



**Figura 3.** Empacotamento das bolas no moinho: a) melhor condição de empacotamento com bolas de diferentes tamanhos; e b) pior condição de empacotamento com bolas no mesmo tamanho.

que representa a maior ou menor energia necessária para reduzir o tamanho de um material; e b) o grau de redução necessário para atingir dos objetivos desejados. Este último fator indica que variações tanto no tamanho inicial quanto no tamanho final das partículas afetam decisivamente o tempo de moagem<sup>2,4</sup>.

### 3. Procedimento Experimental

#### 3.1. Cálculo dos parâmetros dimensionais do moinho estudado

O equipamento selecionado foi um moinho de bolas industrial com revestimento de borracha e carga de bolas de alta alumina. Os dados estão representados na Figura 4 juntamente com uma representação esquemática do equipamento.

Para a determinação da relação da carga de bolas versus carga de material a moer, é necessário a obtenção do volume aparente das bolas e volume de espaços vazios entre as bolas.

##### 3.1.1. Volume aparente das bolas

O volume aparente de bolas (Figura 5) deve ser determinado através do volume útil do moinho e do volume de vazios. O volume útil do moinho pode ser calculado através da Equação 2.

$$V_u = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad (2)$$

onde:  $V_u$  = volume útil do moinho ( $m^3$ ); r = raio do cilindro (m); L = comprimento do cilindro (m); Para encontrar o volume de vazios no moinho, é necessário utilizar a Equação 3.

$$V_{va} = r^2 \left( \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} a - a \cdot \sqrt{1 - a^2} \right) L \quad (3)$$

onde:  $V_{va}$  = Volume de vazios no moinho ( $m^3$ ); r = Raio do cilindro (m); L = Comprimento do cilindro,  $a = \frac{r-x}{r}$  (m).

O volume aparente de bolas ( $V_{ap}$ ) é o volume útil ( $V_u$ ) menos o volume de vazios do moinho ( $V_{va}$ ), podendo ser encontrado pela Equação 4.

$$V_{ap} = V_u - V_{va} \quad (4)$$

##### 3.1.2. Volume de vazios entre as bolas

O volume de vazios entre as bolas deve ser determinado para conhecer o volume que será ocupado pela barbotina. Esta determinação pode ser feita enchendo-se o moinho com água até cobrir as bolas, mas para isso estas devem estar no mesmo nível. Na prática essa condição não é verificada, pois ao parar o moinho as bolas não

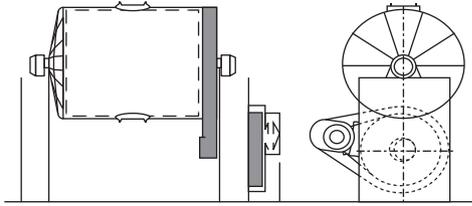


Figura 4. Moinho de bolas de alta alumina. (Ribeiro e Abrantes<sup>2</sup>).

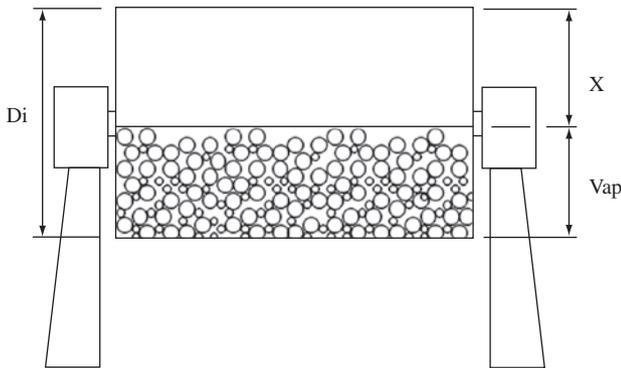


Figura 5. Representação do volume aparente de bolas (Vap).

se encontram niveladas, conforme mostrado na Figura 6, dificultando a utilização deste método.

Porém, uma vez conhecido este desnível é possível efetuar uma correção matemática. Para corrigir este desvio é necessário determinar o volume deste prisma, e desta forma encontrar o volume de vazios entre as bolas.

O volume do prisma é função do comprimento do moinho (L), da altura (a) e largura (la) do prisma formado. A altura do prisma está sendo considerada constante, por ter uma menor influência no volume de vazios. Porém a largura do prisma depende do espaço vazio deixado no momento em que o moinho para de girar. Portanto, a largura não possui um valor fixo, sendo necessário sempre sua determinação (medição).

Utilizando uma régua, foi medido o espaço vazio no centro da carga de bolas e verificado o nível das bolas (a), como é demonstrado na Figura 7. Por simplificação o prisma foi considerado um triângulo retângulo. Desta maneira é possível determinar o valor da largura (la) do prisma e do volume do prisma através da Equação 5.

$$V_{\text{prisma}} = \left( \frac{b \cdot h}{2} \right) L \quad (5)$$

onde:  $V_{\text{prisma}}$  = volume do prisma (m<sup>3</sup>); b = base do triângulo (la) (m); h = altura do triângulo (a) (m); L = comprimento do moinho (m);

O volume real de bolas no prisma pode ser obtido através da fórmula do fator de empacotamento (Equação 6), onde este previamente determinado, será multiplicado pelo volume do prisma.

$$F_{\text{emp}} = \frac{V_{\text{realp}}}{V_{\text{prisma}}} \quad (6)$$

Desta forma, podemos corrigir o volume total de água medido (Figura 6) diminuindo pelo volume real de bolas no prisma, conforme apresentado pela Equação 7. O volume total de água corrigido é o volume de vazios entre as bolas.

$$V_{\text{Tac}} = V_{\text{Tam}} - V_{\text{realp}} \quad (7)$$

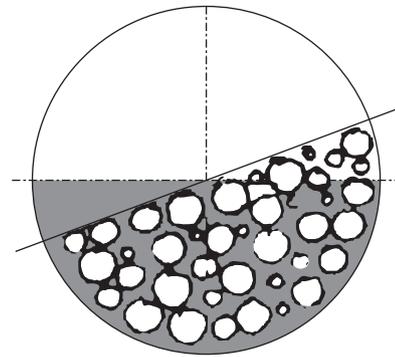


Figura 6. Representação do moinho com água.

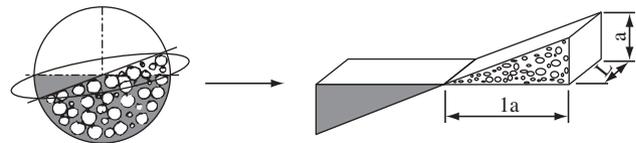


Figura 7. Forma geométrica formada pelo desnível das bolas (prisma).

onde:  $V_{\text{Tac}}$  = volume total de água corrigido;  $V_{\text{Tam}}$  = volume total de água medido;  $V_{\text{realp}}$  = volume real de bolas no prisma.

### 3.1.3. Determinação da distribuição de tamanho de bolas

Uma amostra de 410 bolas foi coletada aleatoriamente no interior do moinho com o objetivo de verificar a distribuição do tamanho. Esta informação ajudará a analisar o efeito sobre o fator de empacotamento, pois com o desgaste dos elementos moedores ocorre a redução do diâmetro e um melhor empacotamento da carga de bolas, aumentando gradativamente a eficiência de moagem.

### 3.2. Avaliação da dinâmica da moagem

O moinho escolhido para o estudo processa massa para produção de porcelanato esmaltado composto por três argilas, um caulim, dois filitos e dois feldspatos. Uma amostra de cada material foi coletada no depósito da fábrica com o objetivo de determinar o resíduo *in natura* de cada matéria-prima e da respectiva composição.

Foi determinada a curva de moagem industrial coletando material a cada hora de moagem, de um total de 7 horas e determinando o teor de resíduo em malha #325 mesh, 45 µm. Uma amostra de barbotina com 30 minutos de moagem foi coletada para reproduzir em laboratório a curva de moagem industrial, utilizando a mesma relação carga de bola/carga de material, 1,80 kg<sub>bolas</sub>/kg<sub>material</sub>. Em laboratório também foi simulado uma moagem com uma relação de 2,00 kg<sub>bolas</sub>/kg<sub>material</sub>.

Os dados históricos de três meses do resíduo de moagem também foram coletados com o objetivo de analisar qual a variação sofrida, sendo que o padrão industrial permite um intervalo de variação de 0,5 pontos percentuais.

O efeito da reposição da carga no moinho foi avaliado industrialmente, determinando o volume aparente, volume de vazios, fator de empacotamento e o tempo de moagem, antes e após a reposição da carga de bolas.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1. Resíduo *in natura* das matérias-primas

A Tabela 1 mostra os resultados do resíduo *in natura* das matérias-primas usadas na formulação. Pode-se observar que os filitos e argilas apresentam um resíduo menor, característica natural destas

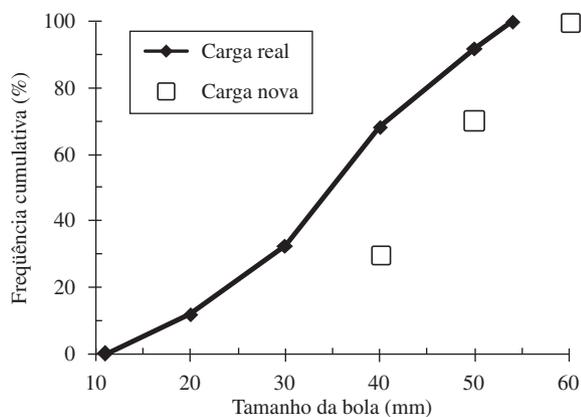
matérias-primas, o que demanda menor tempo de moagem. Já para os feldspatos, pela sua natureza grosseira e rochosa, necessitam de um maior tempo para atingir um determinado resíduo final. A partir destas informações verifica-se que o resíduo inicial da mistura é de aproximadamente 37% e em se tratando de matérias-primas *in natura*, este pode sofrer facilmente variações de até  $\pm 3$  pontos percentuais no resíduo inicial contribuindo para uma alteração na eficiência de moagem.

#### 4.2. Distribuição de tamanho das bolas

O gráfico da Figura 8 mostra o resultado da distribuição de tamanho de bolas coletada no interior do moinho antes da reposição (denominada carga real) em comparação com uma carga de bolas nova. Pode ser observado que, em decorrência do desgaste das bolas, aproximadamente 70% delas apresentam diâmetros abaixo de 40 mm, sendo que os valores variaram entre 11 e 54 mm, com valores mais frequentes entre 30 e 40 mm. Uma carga nova apresenta unicamente 3 tamanhos e conseqüentemente o fator de empacotamento tende a ser menor que as bolas usadas. O fator de empacotamento medido para as bolas usadas variou entre aproximadamente 0,65 e 0,68, Tabela 2, maior que bolas novas 0,60<sup>1</sup>.

Com o desgaste das bolas é necessário realizar sua reposição no moinho, aumentando a relação entre a carga de elementos moedores pela carga de material a moer, contribuindo para uma diminuição do tempo de moagem, conforme apresentado na Tabela 2. Observa-se ainda que após a reposição de bolas o fator de empacotamento tende a diminuir, já que são adicionadas apenas bolas de diâmetro 60 mm. Como a relação bola/material aumenta após a reposição a redução medida do tempo de moagem foi de aproximadamente 20 minutos.

O gráfico da Figura 9 apresenta o resultado da curva de moagem industrial, com relação de  $1,80 \text{ kg}_{\text{bolas}}/\text{kg}_{\text{material}}$ , em comparação como



**Figura 8.** Distribuição de tamanho de uma carga de bolas usada em comparação com uma carga nova.

**Tabela 1.** Resultados dos ensaios de resíduo *in natura* das matérias-primas que compõem a formulação estudada.

Matérias-primas	Resíduo bruto # 325 mesh (%)
Argila 1	6,93
Argila 2	10,42
Argila 3	24,73
Caulim	42,90
Filito 1	23,27
Filito 2	18,20
Feldspato 1	88,95
Feldspato 2	90,84

duas moagens de laboratório, com  $1,80$  e  $1,90 \text{ kg}_{\text{bolas}}/\text{kg}_{\text{material}}$ . Primeiramente pode-se observar que as moagens de laboratório foram muito similares à moagem industrial, de modo que resultados podem ser satisfatoriamente extrapolados à grande escala. Estes resultados demonstram que aumentando um pouco mais a carga de bolas se conseguiria diminuir o tempo de moagem ainda mais.

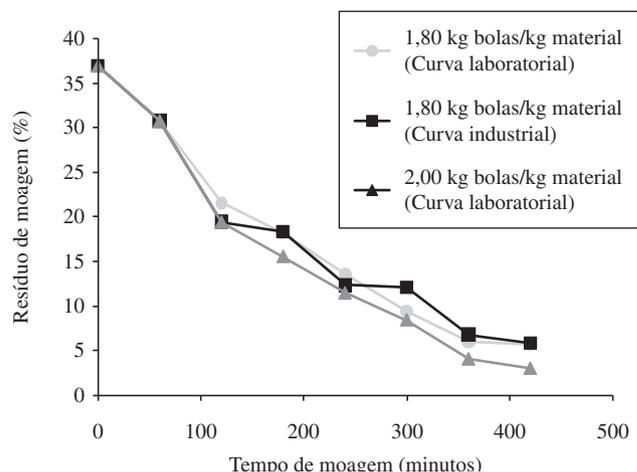
De acordo com os dados experimentais, ao considerar aproximadamente que: a) variações de  $\pm 3$  pontos percentuais no resíduo *in natura* das matérias-primas, podem causar uma amplitude de variação de até 60 minutos no tempo de moagem; b) variações de  $\pm 0,1 \text{ kg}_{\text{bolas}}/\text{kg}_{\text{material}}$ , podem causar amplitudes de variações de 40 minutos no tempo de moagem; e c) variações de  $\pm 0,5$  pontos percentuais no resíduo final, podem causar amplitude de variação de 20 minutos no tempo de moagem.

Somando estes três fatores se pode considerar que eles sejam responsáveis por uma variação máxima de 120 minutos no tempo de moagem de um moinho industrial. Por outro lado, a raiz quadrada da soma dos quadrados da contribuição de cada fator pode indicar a contribuição mais provável (e não a máxima) destes três fatores. Em outras palavras, é mais provável que as variações de resíduo *in natura*, carga de bolas e resíduo final contribuam com aproximadamente 75 minutos no tempo de moagem. Comparando este resultado com o histórico de variação do tempo de moagem apresentado na Figura 1, pode-se dizer que 66% da variação do tempo de moagem são provocados por estes três fatores estudados.

## 5. Conclusão

O estudo possibilitou verificar os efeitos provocados pela variação da carga dos elementos moedores, do resíduo *in natura* das matérias-primas e do resíduo final sobre o tempo de moagem de uma massa de porcelanato, composta por argilas, caulins, filitos e feldspatos.

Os experimentos forneceram bons subsídios para a determinação aproximada da contribuição individual de cada parâmetro estudado.



**Figura 9.** Curvas de moagem com diferentes cargas de bolas.

**Tabela 2.** Características do moinho antes e após as reposições de bolas.

Característica	Primeira reposição		Segunda reposição	
	Antes	Depois	Antes	Depois
Volume aparente (%)	40,4	44,9	40,5	43,4
Volume de vazios (%)	32,1	35,1	34,5	35,1
Fator de empacotamento	0,679	0,649	0,655	0,649
Relação $\text{kg}_{\text{bolas}}/\text{kg}_{\text{material}}$	1,75	1,85	1,75	1,85
Tempo de moagem (minutos)	430	410	430	410

Em ordem de prioridade, considera-se que: o resíduo *in natura*, relação carga de bolas/carga de material e resíduo final, são os principais causadores de variações no tempo moagem do sistema estudado.

Outros fatores como viscosidade e densidade da barbotina, que sabidamente interferem no rendimento da moagem, precisam ser avaliados em trabalhos futuros para uma conclusão mais precisa do trabalho.

## Agradecimentos

Aos profissionais da central de massa da Eliane Revestimentos Cerâmicos, em especial à Zélio Demenek e Adirlei Cechinel.

Ao Consultor Sergio Pereira Ruzza, pelos esclarecimentos e oportunidade de realização do estudo.

## Referências

1. Bristot, V. M. **Máquinas e equipamentos para cerâmica**. Criciúma: Editora e Livraria Luana Ltda. Junho de 1996.
2. Ribeiro, M. J. P. M.; Abrantes, J. C. C. Moagem em moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 7-11, mar./abr., 2001.
3. Stainer, D.; Freccia, C.; Furlan, J. B.; Zanette, W.; Junior, O. V.; Rodrigues, J.; Costa, F.; Mazzuco, M.; Martins, G. M. O Aperfeiçoamento da Moagem da Monoporosa. Alumina x Sílex. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 23-29, mar./abr., 1996.
4. Nasseti, G.; Palmonari, C. Moagem Fina à Seco e Granulação vs. Moagem à Umido e Atomização na Preparação de Massas de Base Vermelha para Monoqueima Rápida de Pisos Vidrados. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 2, n. 5/6, p. 11-15, set./dez., 1997.
5. Perry, R. H.; Chilton, C. H. **Manual de engenharia química**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1980.
6. Loric, L. Consideração e análises sobre moagens em contínuo com particular referência aos aspectos tecnológicos e às economias energéticas. **Revista Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 11-16, maio/jun., 1996.