

Otimização do processo de moagem em moinho planetário

Beatriz Alves Sartor^a, Emilly Nauana Marques Rodrigues^a, Gabriel Goularti Brunel^a, Layrine Geremias^a, Liairon Elias^a, Maria Eduarda Souza da Rosa^a, Suelen Reus Savi^a, Vitória Spadel Baesso^a, Priscilla Barreto^a, Marcelo Dal Bó^{a*}

^aInstituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Criciúma, Rod. SC 443 km 1, 845, Vila Rica, Criciúma, Santa Catarina, Brazil, 88813-600

*marcelo.dalbo@ifsc.edu.br; +55 (48) 3462-5019

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo estudar o processo de moagem em moinhos planetários. Estes moinhos são caracterizados por uma moagem de alta energia e, conseqüentemente, são amplamente utilizados em escala de laboratório visando acelerar o processo de redução do tamanho de partículas. Para a realização dos experimentos desenvolveu-se um planejamento experimental de misturas, onde foi variado o tamanho de bolas de alta alumina (diâmetros de 20 mm, 12,8 mm e 5 mm) e o percentual destas bolas. Um planejamento de misturas foi desenvolvido resultando em 10 ensaios. Os experimentos foram executados com uma réplica genuína visando maior representatividade estatística nos resultados. Frita cerâmica comercial foi usada como sólido a ser moído e, após a moagem, foi medido o resíduo em malha #325 mesh. Os resultados mostraram que o processo de moagem de fritas cerâmicas em moinhos planetários foi otimizado usando misturas entre bolas médias (12,8 mm) e bolas pequenas (5 mm). Além disso, foi possível prever o comportamento do resíduo de moagem variando o tamanho e o percentual de bolas de alta alumina através de um modelo matemático obtido a partir do software Statistica 7.0.

Palavras-chaves: Tamanho de partícula. Bolas. Moagem, Laboratório. Moinho periquito.

1. INTRODUÇÃO

O processo de moagem destaca-se como sendo uma das operações unitárias mais utilizadas industrialmente. Esta, por sua vez, tem o objetivo de reduzir o tamanho de partícula dando outras características físicas e químicas ao produto final [1]. Como alterações físicas pode-se citar a redução do tamanho médio de partículas (D_{50}), alteração no formato e esfericidade do grão e também na distribuição do tamanho de partícula. As alterações químicas geralmente estão relacionadas ao incremento da área superficial das partículas após a moagem, o que acarreta em uma maior reatividade das mesmas.

Conceitua-se moagem como sendo a etapa final do processo de fragmentação, a qual reduz o diâmetro das partículas a um tamanho adequado através da ação de forças de impacto, compressão, abrasão e atrito [2,3]. Essa operação tem como objetivo o aumento da área superficial de materiais sólidos, no intuito de acelerar possíveis reações subsequentes. Ainda, é responsável pela uniformização

e homogeneização das partículas, podendo, também, atender demandas específicas de determinadas indústrias. No setor cerâmico, por exemplo, a moagem é fundamental na minimização de aglomerados e mistura de pós-cerâmicos [4].

Sua aplicação faz-se presente nos mais diversos contextos, sendo empregada na moagem de combustíveis sólidos visando adequar o tamanho de partícula ao processo, moagem do clínquer visando o aumento da reatividade das partículas de Silicato Tricálcico (C3S) e Silicato Dicálcico (C2S), moagem de cristais para melhor dissolução e moagem de oleaginosas para auxiliar no processo de extração [1].

Por outro lado, a moagem é uma operação unitária fundamental para o processamento de minérios, como é o caso das indústrias cerâmicas. Especificamente na produção de revestimentos cerâmicos, como pisos, azulejos e porcelanatos, diversos minérios passam pelo processo de moagem para a redução do tamanho de partículas. Geralmente os feldspatos, calcários e argilas ricas em sílica necessitam de uma redução do seu tamanho médio de partículas para os processos subsequentes, como a sinterização, por exemplo. Neste caso, usam-se moinhos de bolas quando o processo cerâmico é feito por via úmida e moinhos martelo, pendular, verticais a rolos ou moinho tubular quando o processo é feito por via seca [5,6].

Por outro lado, o processo de moagem também tem fundamental importância durante a preparação do vidro cerâmico, também conhecido como esmalte cerâmico. Neste caso, a mistura composta por fritas cerâmicas, caulim e outras matérias-primas cruas é inserida em moinhos de bola juntamente com água e aditivos para a obtenção de uma suspensão, a qual, posteriormente, é aplicada na superfície dos revestimentos cerâmicos [7].

Além dos moinhos utilizados a nível industrial, já citado acima, existem moinhos de alta energia que são empregados em laboratórios. Exemplo deste é o moinho planetário, também conhecido como moinho periquito. Esse moinho consiste num jarro que, ao sofrer acelerada rotação, provoca impacto e atrito entre as bolas de alta dureza e densidade com o sólido a ser cominuído, resultando na fragmentação do sólido [8].

O princípio dessa tipologia de moinho baseia-se, fundamentalmente, na aplicação da força centrífuga, que, nesse caso, pode atingir até 20 vezes a aceleração gravitacional [9]. A Figura 1 ilustra, genericamente, o princípio básico de funcionamento de um moinho planetário.

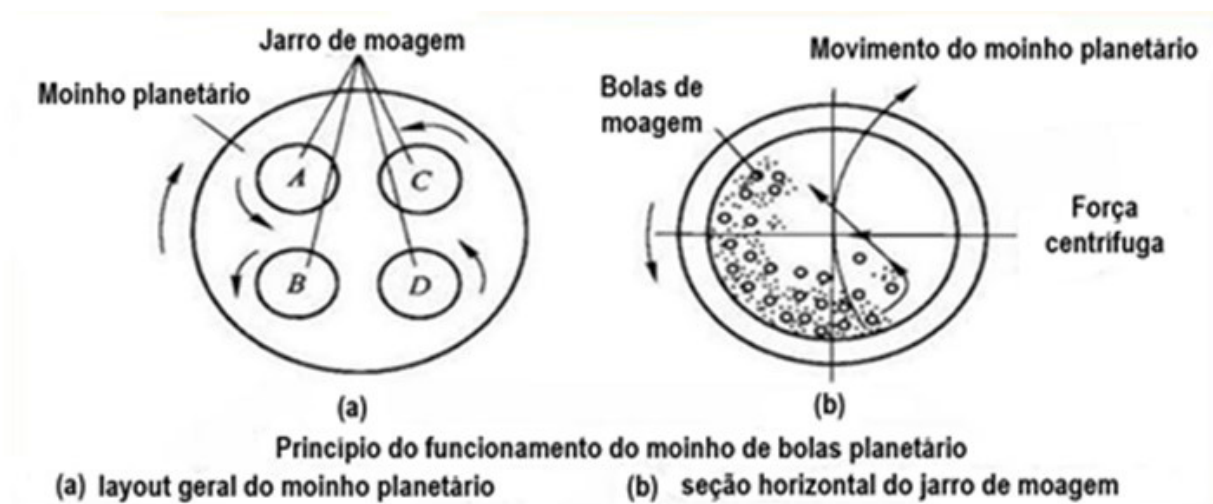


Figura 1. Funcionamento de um moinho planetário (adaptado de [10]).

O moinho planetário é usado para acelerar o processo de moagem quando comparado com os outros tipos de moinhos industriais. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades energéticas do moinho planetário.

Tabela 1: Propriedades específicas de um moinho planetário [9]

Grandeza	Dimensão
Velocidade da bola (m/s)	0,24 - 11,24
Energia cinética (10^{-3} J/colisão)	0,4 - 884
Frequência dos choques (Hz)	4,5 - 100
Potência (W/g-bola)	0 - 1604

De acordo com El-Eskandarany [9] o uso de diferentes tamanhos de esferas leva a uma energia de colisão mais alta, o que pode ajudar a melhorar o processo de moagem.

Tendo em vista que somente uma fração da energia empregada nos moinhos é aproveitada para reduzir o tamanho de partícula, tal procedimento pode ser considerado energeticamente ineficiente. Deste modo, no intuito de favorecer um bom desempenho no processo de moagem, as variáveis atuantes nessa operação unitária devem ser cautelosamente estudadas, a fim de evitar gastos desnecessários. Naturalmente, a relação entre quantidade e tamanho de bolas exerce papel fundamental neste quesito [1].

Alguns trabalhos já estudaram a otimização da moagem em moinhos de bolas. Ribeiro et al. [11] estudaram a influência da natureza das matérias-primas, da densidade da suspensão de moagem e da taxa de ocupação em moinho de bolas. Os resultados mostraram que a dureza e a granulometria inicial de cada matéria-prima são fatores que condicionam a evolução do grau de moagem. Por outro lado, maiores densidades da suspensão resultam em maiores rendimentos de moagem [11]. Em outro trabalho sobre moagem em moinhos de bolas, Nandi et al. [12] estudaram a otimização do processo de moagem de engobes cerâmicos, onde os melhores resultados demonstraram uma redução de 57% no tempo de moagem, de 10,5 para 4,5 horas, para uma mesma distribuição granulométrica das partículas da suspensão e um mesmo resíduo de moagem [12]. Bosa et al. [13] estudaram a influência do resíduo in natura das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas, evidenciando 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 [13]. Por fim, Kano et al. [14] estudaram a influência das condições de moagem na obtenção de nanocelulose a partir do resíduo de papel, mostrando que os tratamentos foram eficientes na remoção de componentes não celulósicos, observando um aumento no teor de celulose (98%) em relação à amostra virgem [14].

No entanto, não foram encontrados trabalhos que estudaram a otimização do processo de moagem de suspensões cerâmicas, mais especificamente de esmaltes cerâmicos a partir de fritas, utilizando para tal os moinhos planetários. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar o efeito do tamanho de bolas de alta alumina e o seu percentual na eficiência de moagem de fritas cerâmicas em um moinho planetário.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo do processo de redução do tamanho de partículas em moinho planetário de laboratório selecionou-se a frita transparente comercial T 1150 (Colorminas Colorifício e Mineração), amplamente utilizada na fabricação de revestimentos cerâmicos com temperatura de queima compreendida entre 1120 a 1180°C.

Para estudar a influência da quantidade de bolas grandes, médias e pequenas na redução do tamanho de partículas durante a moagem em moinhos planetários foi desenvolvido um planejamento de experimentos de mistura com o auxílio do software STATISTICA 7.0, o qual resultou em 10 experimentos distintos. Foi também realizada uma réplica genuína para cada um deles. Os pontos estudados dentro do diagrama ternário referentes ao planejamento de experimentos de misturas são mostrados na Figura 2. Por fim, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) nos resultados obtidos a partir do planejamento experimental de misturas visando encontrar o melhor modelo matemático para descrever os resultados experimentais, bem como estudar a influência de cada fator (tamanho e quantidade de bolas) sobre o resíduo final do processo de moagem.

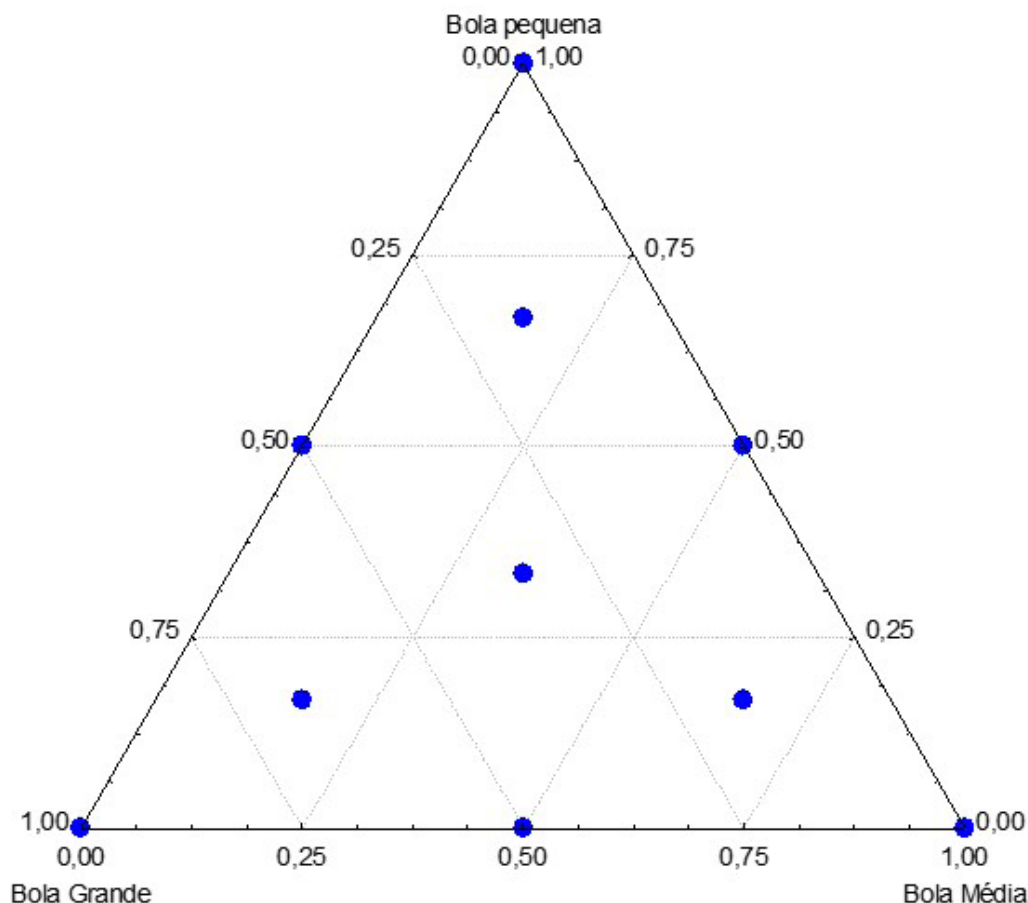


Figura 2. Planejamento de experimentos de misturas

A moagem foi realizada em moinhos planetários de alumina (Thermoceram Produtos Cerâmicos LTDA, TH-300). O gira moinhos (Thermoceram Produtos Cerâmicos LTDA, TH-2) foi ajustado a uma velocidade de 400 rpm.

A carga total de bolas no moinho foi de 650 g, massa esta relativa ao percentual de ocupação das bolas dentro do moinho planetário (~55%), especificado pelo fornecedor dos moinhos. Foram usados três tamanhos distintos de bolas de alta alumina, sendo as bolas grandes de 20 mm de diâmetro, as bolas médias de 12,8 mm e as bolas pequenas de 5 mm. Estas foram pesadas em balança semi-analítica e inseridas no moinho planetário respeitando o planejamento de experimentos. O moinho planetário e as bolas de alta alumina são mostrados na Figura 3.

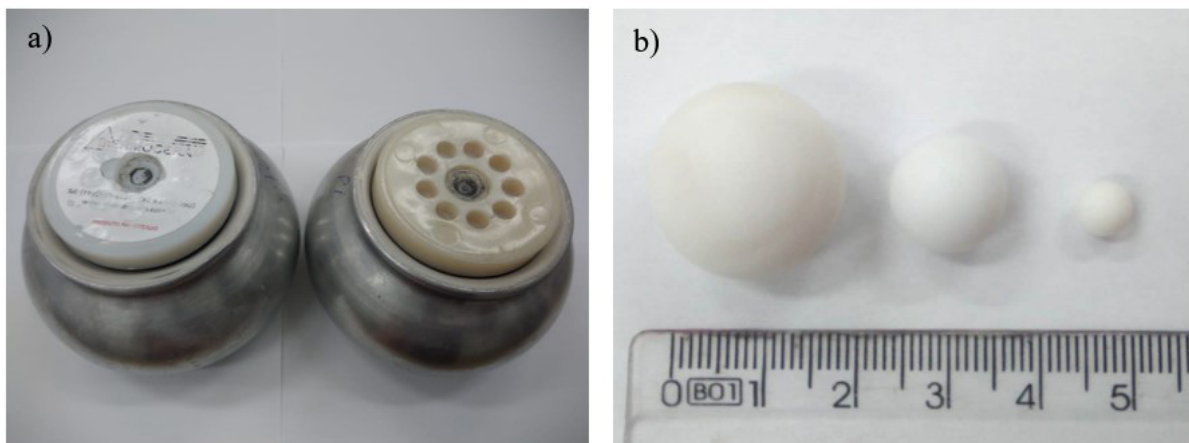


Figura 3. a) Moinho planetário e b) bolas de alta alumina utilizadas no trabalho

Adicionou-se 200 g de sólidos, respeitando a proporção de 90% de frita e 10% de caulim. Em seguida, inseriu-se 76 mL de água, juntamente a 0,1 g de Carboximetilcelulose (CMC) e 0,1 g de Hexametáfosfato de Sódio (HMF). O tempo de moagem foi fixado em 15 min.

Após a moagem o produto foi passado em peneira #60 mesh com o intuito de remover grandes pedaços de frita e tornar o resíduo uniforme. O esmalte na forma de suspensão foi transferido para um picnômetro de 50 mL. A densidade do esmalte foi padronizada em 1800 g/L para todas as amostras antes da medição do resíduo.

A partir da porção de esmalte proveniente do picnômetro, mensurou-se o resíduo. Essa etapa consistiu no peneiramento do resíduo em uma peneira #325 mesh, utilizando água corrente. O material que permaneceu na peneira foi transferido para uma placa de Petri com o auxílio de uma pisseta.

Por fim, o resíduo foi levado à estufa, na qual permaneceu por 24 h. Posteriormente, pesou-se a amostra e, assim, determinou-se o resíduo. Os testes foram realizados em duplicatas, representando uma réplica genuína para cada ensaio. O software Statistica 7.0 foi usado para analisar os resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 mostra os resultados dos resíduos para cada ensaio do planejamento de experimentos de mistura.

Tabela 2. Planejamento experimental de misturas e resultados obtidos (densidade e resíduo).

Experimento	Réplica	Bola grande	Bola média	Bola pequena	Resíduo (g/100mL)
1	1	1,0	0,0	0,0	13,88
2	1	0,0	1,0	0,0	9,40
3	1	0,0	0,0	1,0	140,19
4	1	0,5	0,5	0,0	9,35
5	1	0,5	0,0	0,5	14,96
6	1	0,0	0,5	0,5	3,26
7	1	0,667	0,167	0,167	24,02
8	1	0,167	0,667	0,167	13,04
9	1	0,1667	0,167	0,667	70,64
10	1	0,333	0,333	0,333	14,36
11	2	1,0	0,0	0,0	14,94
12	2	0,0	1,0	0,0	8,20
13	2	0,0	0,0	1,0	131,58
14	2	0,5	0,5	0,0	9,80
15	2	0,5	0,0	0,5	15,34
16	2	0,0	0,5	0,5	3,58
17	2	0,667	0,167	0,167	23,22
18	2	0,167	0,667	0,167	12,50
19	2	0,167	0,167	0,667	97,67
20	2	0,333	0,333	0,333	15,34

Os resultados mostraram similaridade do percentual de resíduo entre as réplicas 1 e 2, evidenciando constância na determinação do percentual de resíduo para o mesmo ensaio e validando a metodologia empregada. Por outro lado, evidencia-se que quanto menor o resíduo de moagem melhor foi o rendimento do processo de cominuição, sendo que os melhores resultados foram obtidos nos experimentos 6 e 16 (réplicas genuínas). Este experimento foi composto por 50% de bolas médias (12,8 mm de diâmetro) e 50% de bolas pequenas (5 mm de diâmetro).

Visando estudar os resultados de forma mais confiável, aplicaram-se métodos estatísticos para a análise da influência dos fatores, neste caso, tamanho e percentual das bolas, sobre o resíduo final da moagem. A partir da análise desses resultados pelo software Statistica, gerou-se a Tabela 3, que mostra a análise de variância (ANOVA).

Tabela 3. ANOVA (análise de variância)

Modelo	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p	R ²
Linear	22132,7	2	11066,4	11666,0	17	686,2	16,1	0,000118	0,655
Quadrático	7732,0	3	2577,3	3934,0	14	281,0	9,2	0,001308	0,884
Cúbico especial	1473,3	1	1473,3	2460,7	13	189,3	7,8	0,015324	0,927
Cúbico	682,8	2	341,4	1777,9	11	161,6	2,1	0,167358	0,947
Ajuste total	33798,7	19	1778,9						

Com exceção do modelo Cúbico, todos os demais modelos se mostraram significantes ($p < 0,05$) para analisar os resultados. Porém, o modelo matemático “Cúbico especial” mostrou melhor ajuste aos resultados experimentais, visto que o valor da sua significância (p) foi menor que 0,05 ou 5% e ainda, seu coeficiente de ajuste (R^2) foi de 0,927. Portanto, este modelo foi usado para representar os resultados experimentais.

A Figura 4 mostra a influência do tamanho e percentual de bolas de alta alumina no resíduo de moagem de frita cerâmica em moinhos planetários. Os resultados mostram que altos percentuais de bolas pequenas acarretam em um resíduo de moagem considerado alto (~120g/100mL de esmalte). Isso está relacionado a pequena energia cinética dessas bolas. Por outro lado, o emprego de misturas entre bolas com distintos tamanhos proporcionou menores resíduos e, conseqüentemente, melhor eficiência do processo de moagem. Misturas entre bolas médias, grandes e com pequenas quantidades de bolas pequenas apresentaram valores de resíduos menores que 20%. Resíduos abaixo de 5% somente foram obtidos usando uma mistura de 50% de bolas médias (12,8 mm de diâmetro) com 50% de bolas pequenas (5 mm de diâmetro).

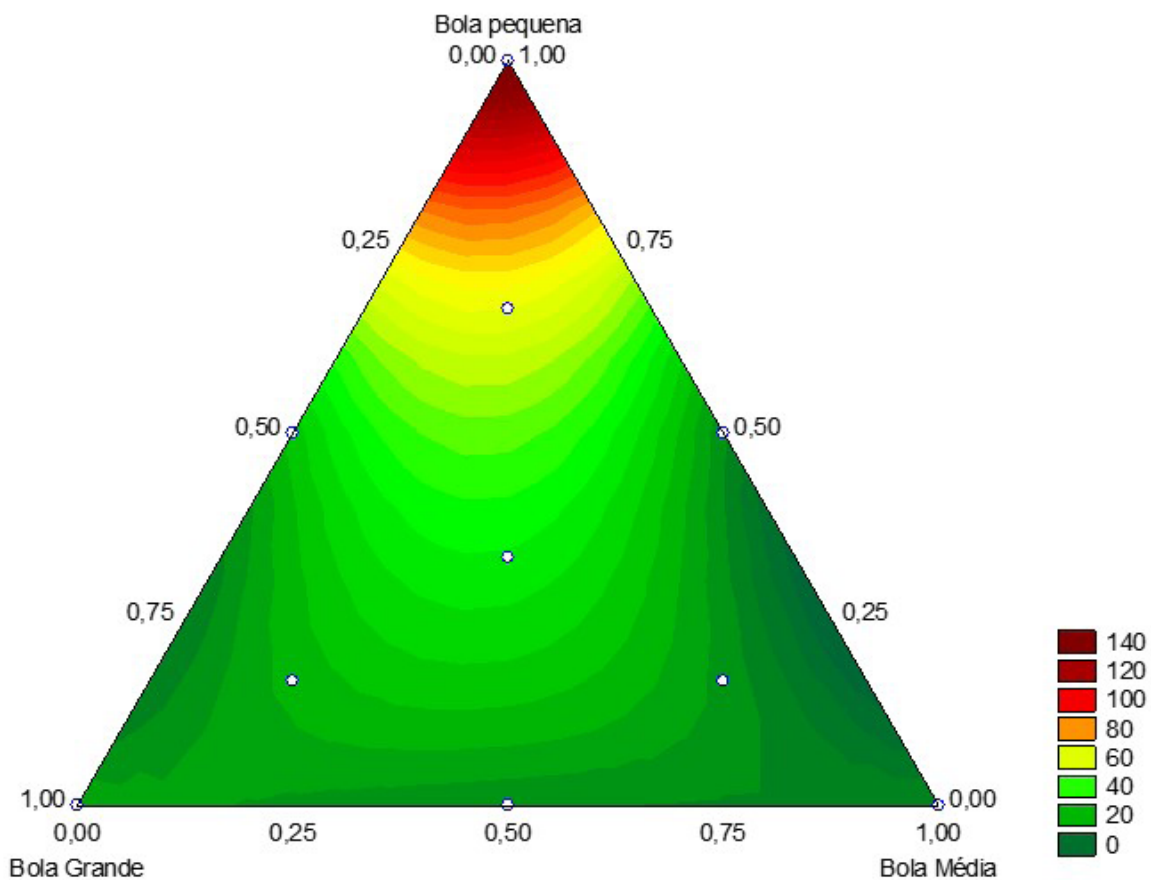


Figura 4. Diagrama triaxial do resíduo de moagem de acordo com o tamanho e percentual das bolas de alta alumina

Baseado no modelo “Cúbico especial” foi possível obter os coeficientes do modelo matemático que mais se adequaram aos resultados experimentais do percentual de resíduo com relação ao percentual de bolas grandes (A), o percentual de bolas médias (B) e o percentual de bolas pequenas (C), o qual é mostrado na eq.1.

$$\% Res = 14,7 \cdot A + 7,7 \cdot B + 142,2 \cdot C - 9,7 \cdot AB - 226,8 \cdot AC - 265,3 \cdot BC + 870,7 \cdot ABC \tag{1}$$

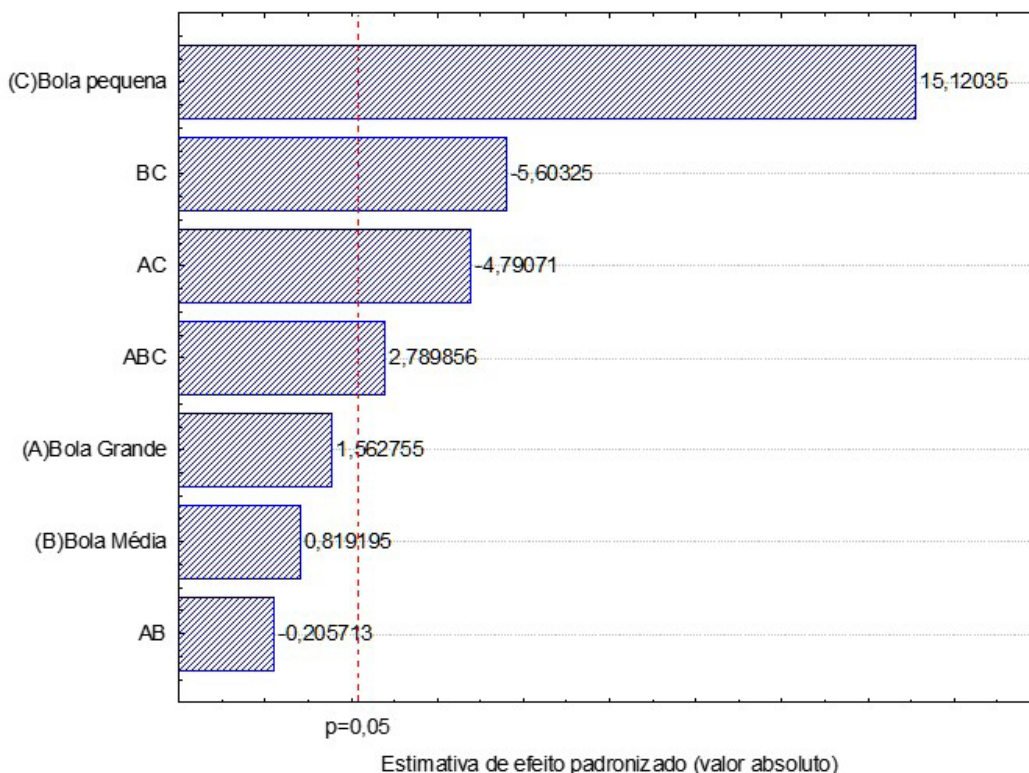


Figura 5. Gráfico de Pareto evidenciando a influência de cada fator no resíduo de moagem

Por sua vez, o gráfico de Pareto, mostrado na Figura 5, evidencia a influência de cada fator no percentual de resíduo de moagem. Nota-se que as bolas pequenas influenciam fortemente o percentual de resíduo, porém de forma negativa, ou seja, para grandes quantidades de bolas pequenas maior é o percentual de resíduos ao final da moagem.

A Figura 6 mostra os valores observados experimentalmente e preditos pelo modelo matemático da eq. 1. Nota-se que os pontos situam-se próximos a uma reta, o que denota que o modelo matemático mostrou-se adequado para expressar os resultados obtidos experimentalmente, neste caso o ajuste da reta aos pontos foi de $R^2 = 0,927$.

Trabalhos similares também evidenciaram que existe grande influência do tamanho das bolas no resíduo de moagem em moinhos que operam de forma descontínua. Francioli et al. [15] estudaram o efeito das variáveis operacionais na moagem descontínua em um moinho de bolas. Foi possível verificar melhora na eficiência do processo com aumento do tamanho dos corpos moedores e graus intermediários de enchimento do moinho e porcentagem de sólidos. O efeito do tamanho de bolas foi aquele de maior influência na granulometria do produto, gerando um material de menor granulometria ao se utilizar bolas maiores [15]. Por outro lado, El-Eskandarany [9] mencionou que o uso de diferentes tamanhos de esferas leva a uma energia de colisão mais alta, o que pode ajudar a melhorar o processo de moagem [9]. No caso do presente trabalho os resultados também mostraram que uma mistura entre diferentes tamanhos de bolas (médias e pequenas) otimizou o processo de moagem em moinhos planetários.

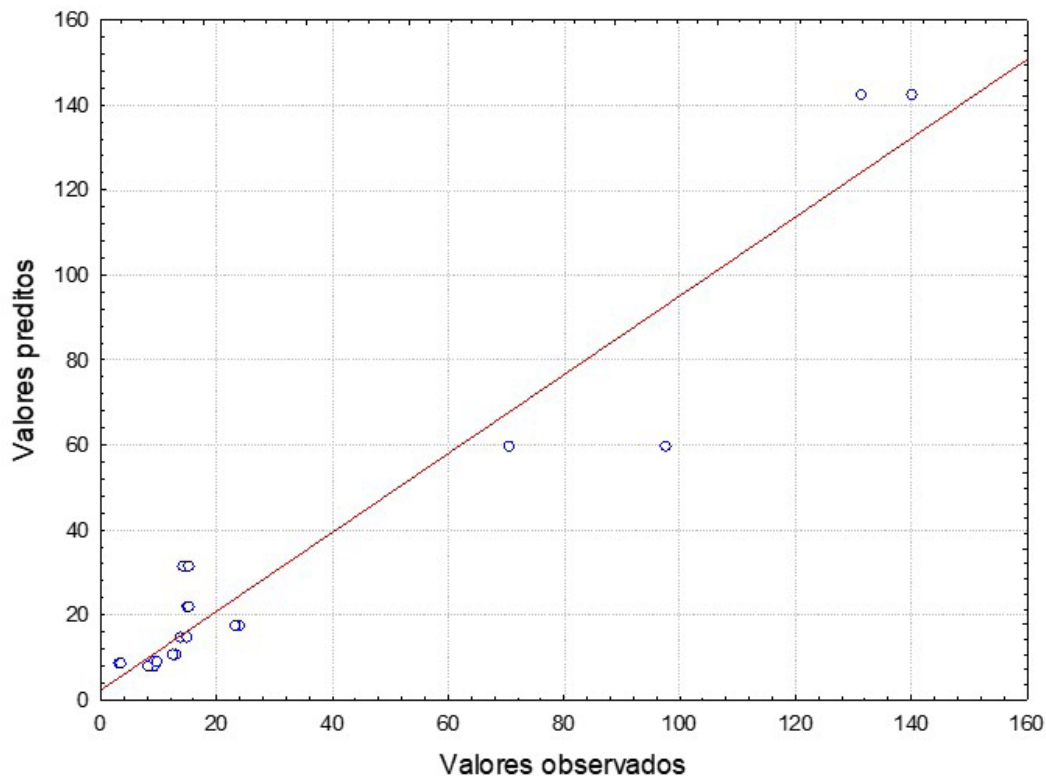


Figura 6. Gráfico dos valores observados experimentalmente e preditos pelo modelo matemático

4. CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a otimização do processo de moagem em moinhos planetários. Os resultados mostraram maior eficiência do processo de moagem utilizado uma mistura de 50% de bolas médias (12,8 mm de diâmetro) com 50% de bolas pequenas (5 mm de diâmetro). O resíduo obtido com essa mistura de bolas foi de 3,4% em malha # 325 mesh, após 15 min de moagem.

O diagrama triaxial das curvas de níveis também mostrou que resíduos abaixo de 10% foram obtidos com misturas com alto percentual de bolas médias e grandes com a adição de pequenas quantidades de bolas pequenas.

A expressão matemática obtida através do modelo cúbico especial se adequou bem aos resultados experimentais, podendo dessa forma ser usada para simular o comportamento do resíduo de moagem variando o tamanho e o percentual de bolas de alta alumina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSC e ao CNPq pela concessão das bolsas e recursos para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Gauto, M.; Rosa, G. Siderurgia: Obtenção do aço. In: (Ed.). Química Industrial. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 5, p.146-172.
- [2] Figueira, H. V. O.; Luz, A. B. D.; Almeida, S. L. M. D. Britagem e Moagem. In: (Ed.). Tratamento de Minérios. 5. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, CETEM, 2010. cap. 4, p. 143–211.
- [3] Sampaio, J. A.; Júnior, H. D. Cominuição. In: (Ed.). Tratamento de Minérios. 6. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2018. cap. 4, p.107-182.
- [4] Setz, L. F. G.; Silva, A. C. D. O processamento cerâmico sem mistério. São Paulo, SP, Brasil: Blücher, 2019. ISBN 9788521214472.
- [5] Lolli, L.; Nassetti, G.; Marino, L. F. B. A preparação a seco de massas cerâmicas. Cerâmica Industrial, v. 5, n. 2, p. 23-27, 2000.
- [6] Alves, H. J.; Zauberas, R. T.; Boschi, A. O. Influência da distribuição granulométrica de argilas para via seca sobre o rendimento de moagem em moinho de martelos. Cerâmica, v. 56, p. 66-70, 2010.
- [7] PRACIDELLI, S. Estudo dos Esmaltes Cerâmicos e Engobes. Cerâmica Industrial, v. 13, n. 1/2, p. 8-20, 2008.

- [8] GOTOR, F. J.; ACHIMOVICOVA, M.; REAL, C.; BALAZ, P. Influence of the milling parameters on the mechanical work intensity in planetary mills. *Powder Technology*, v. 233, p. 1-7, 2013/01/01/ 2013.
- [9] El-Eskandarany, M. S. 2. The history and necessity of mechanical alloying. In: El-Eskandarany, M. S. (Ed.). *Mechanical Alloying*. 2. Oxford: William Andrew Publishing, 2015. p.13-47. ISBN 978-1-4557-7752-5.
- [10] Baheti, V.; Abbasi, R.; Militky, J. Ball milling of jute fibre wastes to prepare nanocellulose. *World Journal of Engineering*, v. 9, n. 1, p. 45-50, 2012.
- [11] Ribeiro, M. J. P. M.; Abrantes, J. C. C. Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 2, p. 7-11, 2001.
- [12] Nandi, V. S.; Montedo, O. R. K. Otimização do processo de moagem de engobes cerâmicos para produção de revestimento. *Cerâmica Industrial*, v. 14, n. 4, p. 24-28, 2009.
- [13] Bosa, A.; Ferro, A. S.; Wanderlind, A.; Pasini, D.; Patrício, M. C.; Tássia, R.; Modesto, C. D. O.; Jr., A. D. N.; Cargnin, M. Influência do resíduo in natura das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas. *Cerâmica Industrial*, v. 12, n. 6, p. 32-36, 2007.
- [14] Kano, F. S.; Souza, A. G. D.; Rosa, D. D. S. Variation of the milling conditions in the obtaining of nanocellulose from the paper sludge. *Revista Matéria*, v. 24, 2019.
- [15] Francioli, D. M.; Carvalho, R. M.; Tavares, L. M. M. Efeito das variáveis operacionais na moagem descontínua. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Poços de Caldas-MG 2015.