

Comparação entre as Tecnologias de Moagem a Seco como Referência para os Parâmetros Tecnológicos do Grânulo Formado

K. Kayacı^a, Y. Yildirim^a, M. Tarhan^a, E. Durgut^a, H. Ergin^{b,*}

^a Cerâmica Çanakkale e Kalebodur, Grupo Kale, Turquia

^b Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Técnica de Istambul, Turquia

*e-mail: madennuh@itu.edu.tr

Resumo

Na indústria de fabricação cerâmica o processo a úmido, incluindo moagem e atomização, é amplamente utilizado para a preparação do grânulo. No entanto, a moagem a seco tornou-se um processo importante devido à economia de energia, permitindo o uso de distintas matérias-primas no processo de fabricação de placas cerâmicas. Neste estudo foi investigado o layout do processo de moagem a seco, bem como os parâmetros de operação do moinho de bolas contínuo a seco, de alta capacidade e com separador (MB), do moinho vertical de rolos (MV) e do moinho pendular de rolos (MP). Como se sabe, a distribuição de tamanho e a forma das partículas afetam as características das suspensões preparadas e também o comportamento durante a queima e as propriedades técnicas do produto final. Portanto, foi estudada a distribuição de tamanho de partícula de cada sistema de moagem para as principais matérias-primas: feldspato, caulinita, granito e caco queimado de pavimento cerâmico. A distribuição de tamanho de partícula de cada sistema de moagem foi apresentada segundo uma distribuição RRSB, que permite comparar as distribuições de tamanho dos produtos em função dos parâmetros de posição d' , que indica a finura, e do parâmetro n , que indica a inclinação, se é uma distribuição larga ou estreita. Finalmente, foram realizadas análises do custo de operação dos sistemas de moagem a seco.

Palavras-chave: placas cerâmicas, moagem a seco, distribuição de tamanho de partícula, consumo energético.

1. Introdução

Na indústria cerâmica o processo via úmida, incluindo a moagem e a atomização, é amplamente utilizado para a preparação do grânulo. A moagem das matérias-primas cerâmicas é feita em moinhos de bolas, a úmido, com diferentes configurações do circuito de moagem. A mais utilizada é a moagem por batelada em moinhos de bolas, um sistema descontínuo. Carrega-se o moinho com uma quantidade determinada de matérias-primas, que são moídas até se obter a finura desejada. Os moinhos de bolas também são operados em modo contínuo, em moinhos longos com diafragmas que dividem o moinho em compartimentos, ou em dois/três moinhos curtos que são operados conectados em série. Ainda que na última década tenha havido grandes esforços para melhorar a eficiência da moagem em moinhos de bolas, o elevado consumo de energia e a grande velocidade de desgaste dos elementos moedores resultam em um aumento dos custos de produção. Junto aos altos custos de moagem, a evaporação da água no atomizador também se converteu em um problema no processo a úmido^{1,2}. Nos últimos anos vários pesquisadores desenvolveram o processo de granulação a seco, que consiste em um conjunto de moinhos a seco, como o moinho vertical ou o moinho pendular, ambos de rolos, conectados a um granulador. Porém, este sistema apresenta problemas de qualidade nos produtos finais causados pela falta de controle das formas e distribuições dos tamanhos dos grânulos^{3,4}.

Recentemente foi projetado um novo sistema de produção de grânulos, denominado de processo em semiúmido, para reduzir os custos de produção de grânulos. O material seco é moído de forma separada em um sistema de moagem a seco e é adicionado à suspensão cerâmica. Em seguida, a densidade aparente é aumentada com a adição de material seco à suspensão cerâmica. Portanto, a suspensão cerâmica assim preparada tem menor conteúdo em água que a suspensão cerâmica original. Isto resulta em menor consumo de gás natural para a eliminação da água da suspensão. Além disto, a capacidade de produção dos atomizadores é aumentada e o consumo de energia é reduzido pelo uso do novo sistema semiúmido desenvolvido.

Nos moinhos de bolas, as partículas são moídas por forças de impacto e abrasão, causadas entre as próprias bolas ou entre as bolas e os revestimentos do moinho. O leito de moagem não está confinado e a energia de entrada não pode ser aplicada diretamente à partícula, resultando em um método pouco eficiente⁵⁻⁷.

Neste estudo, as principais matérias-primas na produção cerâmica (feldspato, caulim, granito e caco queimado de pavimento cerâmico) foram moídas a seco em um moinho de bolas com separador (MB), em um moinho vertical de rolos (MV) e em um moinho pendular de rolos (MP). Primeiramente, os materiais ensaiados foram caracterizados física, química e mineralogicamente. Também

foi determinada a moabilidade das matérias-primas pelo índice de trabalho de Bond⁸.

A distribuição de tamanho e a forma das partículas afetam as características das suspensões preparadas e também seu comportamento durante a queima e as propriedades técnicas do produto final. A distribuição de tamanho e a forma das partículas para cada sistema eram distintas. A distribuição Rosin-Rammler-Sperling-Bennet (RRSB) permite comparar as distribuições de tamanhos dos produtos em termos do parâmetro de posição d' , que indica a finura, e do parâmetro n , que indica a inclinação, ou seja, se é uma distribuição larga ou uma estreita⁹. Finalmente, também são apresentadas neste trabalho as análises dos custos de operação dos sistemas de moagem a seco.

1.1. Tecnologias modernas de moagem a seco

Nos moinhos de bolas, as partículas são moídas por forças de impacto e de abrasão entre as próprias bolas ou entre as bolas e os revestimentos dos moinhos. No entanto, existe a limitação da velocidade de rotação do moinho e do tamanho das bolas utilizadas na moagem. Além disso, o leito de moagem não está confinado, assim a energia de entrada não pode ser aplicada diretamente à partícula. Portanto, a moagem com moinho de bolas é um método pouco eficiente devido ao projeto do sistema e às forças utilizadas para redução de tamanho⁵⁻⁷.

Neste estudo, foram buscados sistemas de moagem a seco com eficiência energética para a moagem de matérias-primas cerâmicas. É de conhecimento geral que a força de compressão é a força mais eficiente para moagem. Também se sabe que a aplicação direta da força às partículas, pelo projeto adequado de leitos de moagem confinados aos moinhos, resulta em eficiência energética.

1.1.1. Funcionamento de um moinho de bolas a seco com um separador de alta eficiência

Até o início dos anos 1970 os moinhos de bola foram predominantes na moagem a seco de matérias-primas de distintas indústrias. Para capacidades moderadas e moderados teores de umidade esta é uma máquina muito confiável e de fácil manutenção, mas com um consumo em energia elétrica relativamente elevado.

A ação da moagem no moinho de bolas é criada pelo impacto e abrasão do movimento da carga de elementos moedores. Com uma correta seleção dos elementos moedores, a capacidade dos moinhos de bolas é proporcional ao consumo de energia do moinho.

A capacidade de secagem de um moinho de bolas depende do tamanho do moinho. Para moinhos pequenos normalmente não há dificuldade em passar a quantidade necessária de gases quentes através do moinho. O teor de umidade do material alimentado está limitado a 6,5% de água. No entanto, nos moinhos maiores, devido à limitação da velocidade do ar, a capacidade de secagem é reduzida a menos de 5% de água. Os moinhos de bola a seco são projetados frequentemente com dois compartimentos. Pela seleção mais adequada dos elementos moedores, a eficiência de moagem é mais alta que para um moinho com um único compartimento. O moinho é operado em um circuito fechado com um separador de ar. O material é descarregado do moinho e é transportado até o separador, parcialmente pelo fluxo de gás e parcialmente pelo elevador. O material é alimentado ao prato de distribuição, instalado na seção mais elevada do separador, por cima do rotor (jaula giratória), conforme Figura 1.

O ar de separação passa através da zona de separação e do rotor e sai do separador pela parte superior, junto com a fração fina. O material mais grosso cai, através do

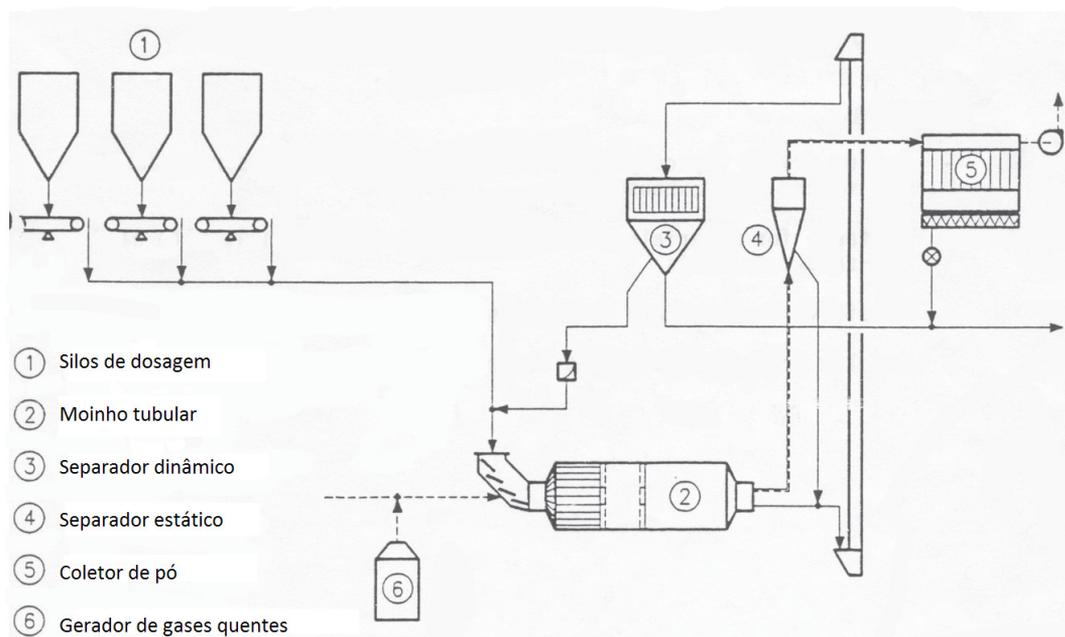


Figura 1. Sistema de moagem do moinho de bolas contínuo a seco.

ar de separação, até a saída no fundo, devido à força da gravidade. Os ajustes finos são realizados pela velocidade do rotor e pela quantidade de ar de separação.

1.1.2. Moinho de rolos vertical

O moinho de rolos vertical (MV) é atualmente o moinho mais comum para moagem de matérias-primas, pois apresenta excelente eficiência de moagem combinada com alta capacidade de produção, bem como alta capacidade de secagem.

O material é alimentado ao moinho através de uma comporta de ar e desliza sobre a mesa de moagem giratória. Devido às forças centrífugas, os materiais fluem com um movimento em espiral pela mesa de moagem e abaixo dos rolos, que são pressionados hidráulica e pneumaticamente contra o material. Na beirada da mesa o material triturado transborda sobre um anel de contenção, que é utilizado para controlar a camada de material, e é recolhido pelo gás quente que entra por baixo da mesa de moagem através de um bocal. O ar quente seca o material e lança as partículas mais grossas diretamente de volta à mesa de moagem, enquanto a fração mais fina é levada até o separador dinâmico na parte superior do moinho.

Os rejeitos da fração mais fina são devolvidos à mesa de moagem para tratamento posterior, enquanto o produto acabado sai com o gás através da parte superior e é recolhido em um ciclone e/ou filtros, como mostra a Figura 2.

O material entre os rolos e a mesa é triturado por uma combinação de compressão e cisalhamento, que é mais eficiente energeticamente que a trituração por impacto, como ocorre no moinho de bolas.

1.1.3. Moinho de rolos pendular

O moinho de rolos pendular trabalha por compressão do leito de material. O pêndulo, montado sobre uma roda dentada, é acionado sobre um eixo vertical. Cada pêndulo é equipado com um rolo de moagem que gira sobre seu eixo. O material é alimentado ao moinho por um dispositivo de alimentação e cai sobre o fundo da parte inferior da carcaça do moinho. Na frente de cada pêndulo é instalada uma pá giratória que recolhe o material da parte inferior e o alimenta entre os rolos e o anel de moagem.

Os materiais moídos são transportados ao classificador por ar. As partículas finas são arrastadas pelo ar, enquanto as partículas grossas caem novamente na zona de moagem, como é mostrado na Figura 3.

Os moinhos pendulares são apropriados para a moagem fina de materiais com baixa a média dureza. A capacidade de secagem pode chegar a 20% de água dentro do moinho. A capacidade do moinho pode variar desde 100 kg/h a 80 t/h, dependendo do tamanho do moinho, material e sua finura.

2. Procedimento Experimental

2.1. Caracterização dos materiais

O trabalho experimental foi realizado na fábrica de Kale Maden, o maior fornecedor de matérias-primas para o maior produtor de cerâmica na Turquia, e também um dos maiores produtores mundiais. Nas Tabelas 1 e 2 são mostradas a análise química e a mineralógica das matérias-primas ensaiadas, que são: feldspato, caulim, granito e caco queimado de pavimento cerâmico.

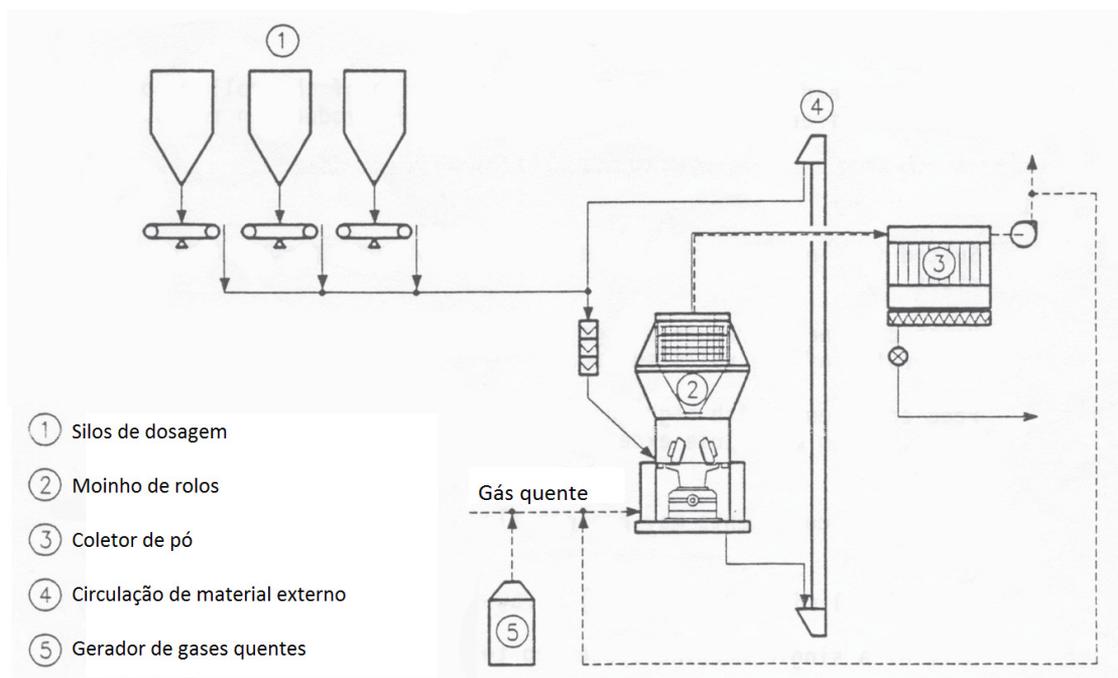


Figura 2. Sistema de moagem do moinho de rolos vertical.

- 1 - Alimentação do material
- 2 - Moinho pendular de rolos
- 3 - Separador dinâmico
- 4 - Coletor de pó
- 5 - Gerador de gases quentes
- 6 - Produto

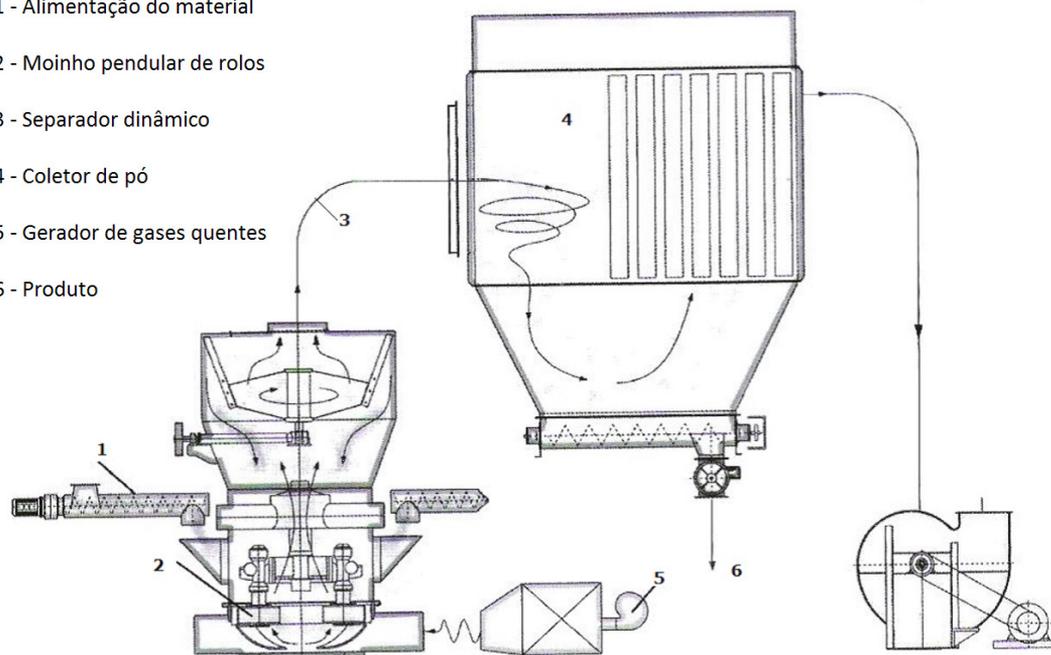


Figura 3. Sistema de moagem do moinho de rolos pendular.

Tabela 1. Análise química das matérias-primas.

% óxidos (massa)	Feldspato	Caulim	Caco cerâmico	Granito
SiO ₂	65,8	66,0	69,8	75,3
Al ₂ O ₃	18,4	23,5	19,8	13,9
TiO ₂	0,53	0,69	1	0,41
Fe ₂ O ₃	0,28	0,35	1,71	0,81
CaO	1,22	0,19	0,53	0,5
MgO	1,97	0,03	0,61	0,16
Na ₂ O	8,54	0,03	1,83	2,28
K ₂ O	0,49	0,2	3,42	4,86
P.F.	2,62	8,54	0,88	1,77

Tabela 2. Análise mineralógica das matérias-primas.

Fase cristalina	Feldspato	Caulim	Caco cerâmico	Granito
Quartzo	X	X	X	X
Albita	X		X	X
Caulinita		X		X
Ortoclásio				X
Mulita			X	
Anatásio		X		
Biotita	X			
Ilita				X
Clinocloro	X			
Magnesita	X			
Alunita		X		

2.2. Processo de moagem utilizado

As matérias-primas – feldspato, caulim, granito e caco queimado de pavimento cerâmico – foram moídas em moinho de bolas a seco com separador (MB), em moinho de rolos vertical (MV) e em moinho de rolos pendular (MP) na fábrica da Kale Maden.

Moinho de bolas: Os ensaios de moagem foram realizados em um sistema de circuito fechado convencional contendo um moinho de bolas e um separador de alta eficiência. O moinho tinha um diâmetro de 3100 mm e um comprimento de 4950 mm. O moinho era recoberto com revestimentos de alumina. Como elementos moedores foram utilizadas bolas de alumina. A potência instalada era de 430 kW, mas só foram utilizados em torno de 400 kW durante o ensaio. A velocidade do rotor separador podia ser ajustada entre 0-520 rev/min para obter as distribuições de tamanhos de partículas desejadas. Os ensaios foram operados a uma velocidade de 420 rev/min.

Moinho de rolos vertical: O moinho utilizado tinha um diâmetro de mesa de moagem de 1830 mm. Continha 3 rolos, que eram pressionados hidráulica e pneumaticamente sobre a mesa rotatória. A potência instalada era de 460 kW, mas foram utilizados em torno de 340 kW durante os ensaios. A velocidade do rotor separador podia ser ajustada entre 0-320 rev/min para obter as distribuições de tamanhos de partículas desejadas. Os ensaios foram operados a uma velocidade de 240 rev/min.

Moinho pendular: O diâmetro do anel de moagem do moinho era de 1830 mm. Havia 5 rolos de moagem. O material era moído entre os rolos e os anéis de moagem. A potência instalada era de 600 kW, mas foram usados

aproximadamente 450 kW de potência durante os ensaios. A velocidade do rotor separador podia ser ajustada entre 0-300 rev/min para obter as distribuições de tamanhos de partículas desejadas. Os ensaios foram operados a uma velocidade de 230 rev/min.

2.3. Distribuições de tamanhos de partículas

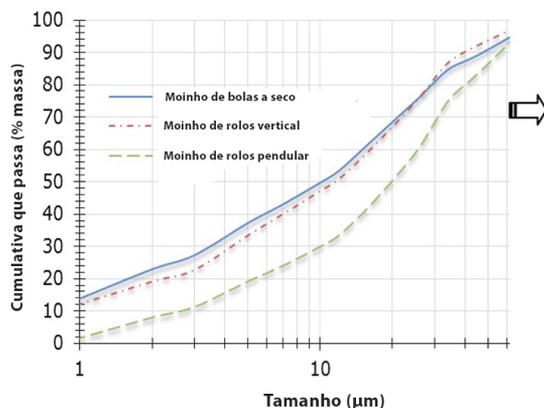
Os tamanhos de partículas das matérias-primas cerâmicas geralmente oscilam entre 1 e 45 µm para pavimento cerâmico e entre 1 e 63 µm para revestimento cerâmico. As quantidades relativas de partículas de diferentes tamanhos podem ser observadas pelas curvas de frequência, mas frequentemente a distribuição é caracterizada por curvas cumulativas, que mostram as frações dos materiais que são mais grossas ou mais finas que um determinado tamanho.

A função mais utilizada para descrever a distribuição de tamanho de partículas (DTP) é aquela proposta por Rosin e Rammler (RR), também denominada de distribuição Rosin-Rammler-Sperling-Bennet (RRSB), que pode ser escrita como:

$$R(d) = 100e^{-\left(\frac{d}{d'}\right)^n} \quad (1)$$

$R(d)$ é o percentual em massa das partículas com diâmetro superior a d . O parâmetro de posição d' corresponde aos diâmetros com um resíduo de 36,8% e indica o nível de finura da distribuição. O expoente n é uma medida da expansão ou dispersão da distribuição.

Normalmente a DTP é apresentada em um diagrama RRSB como mostrado nas Figuras 4 a 7, d' indica a posição da linha no gráfico e n indica a inclinação desta linha.



Os produtos moídos em um mesmo moinho normalmente têm valores similares n , enquanto que d' variará com o tempo de moagem. As Figuras 4 a 7 mostram as distribuições de tamanhos de partículas dos materiais ensaiados em forma de curva cumulativa e também as distribuições RRSB.

3. Resultados e Discussão

Como se observa nas Figuras 4 a 7, o moinho de bolas produz pós com distribuições de tamanhos mais finas e amplas que o MV e o MP. No entanto, o consumo de energia do MB é maior que o do MV e o do MP.

Os custos de manutenção para a moagem de caulim estão em torno de 1,5 €/t na Europa, e este custo é similar para os moinhos ensaiados, pois o caulim é apropriado para moagem nos três tipos de moinhos. No entanto, os custos de manutenção para a moagem de feldspato, granito e caco de pavimento cerâmico nos moinhos tipo MP e MV são quase três vezes mais elevados do que o custo de manutenção no MB. Pode-se explicar que estes materiais não são adequados para moagem em MV e MP devido à elevada abrasão que causam. A Tabela 3 mostra o Índice de Trabalho de Bond, o teor de umidade e o consumo de energia medido.

Uma comparação de vários sistemas de moagem implica em um número considerável de diferentes fatores, dos quais os mais importantes são a capacidade de moagem, a capacidade de secagem, o consumo de energia e o tamanho da alimentação, os custos de manutenção e o investimento.

A economia de energia poderia ser obtida pela utilização de sistemas de moagem a seco e separação com eficiência energética. Outra medida seria a adição de

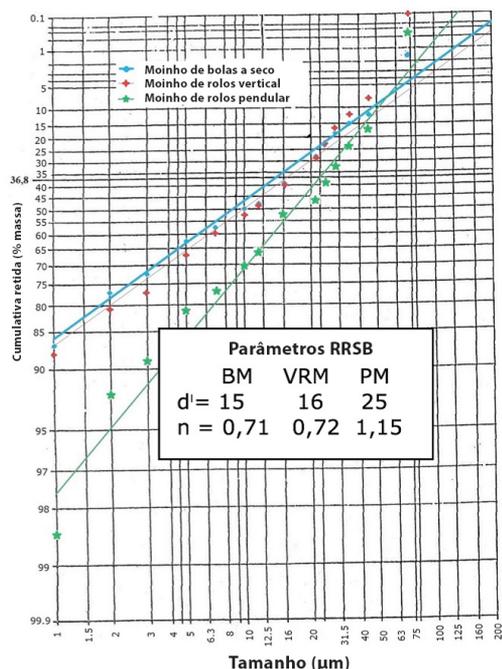


Figura 4. Distribuição de tamanho de partículas do feldspato.

matérias-primas moídas a seco para aumentar a densidade final de uma suspensão que é enviada a um atomizador, em um processo de preparação de grânulos do tipo semiúmido. As tecnologias de moagem e granulação a

seco proporcionam uma maior economia na fabricação de placas cerâmicas.

A distribuição de tamanhos e a forma das partículas afetam as características das suspensões preparadas, bem

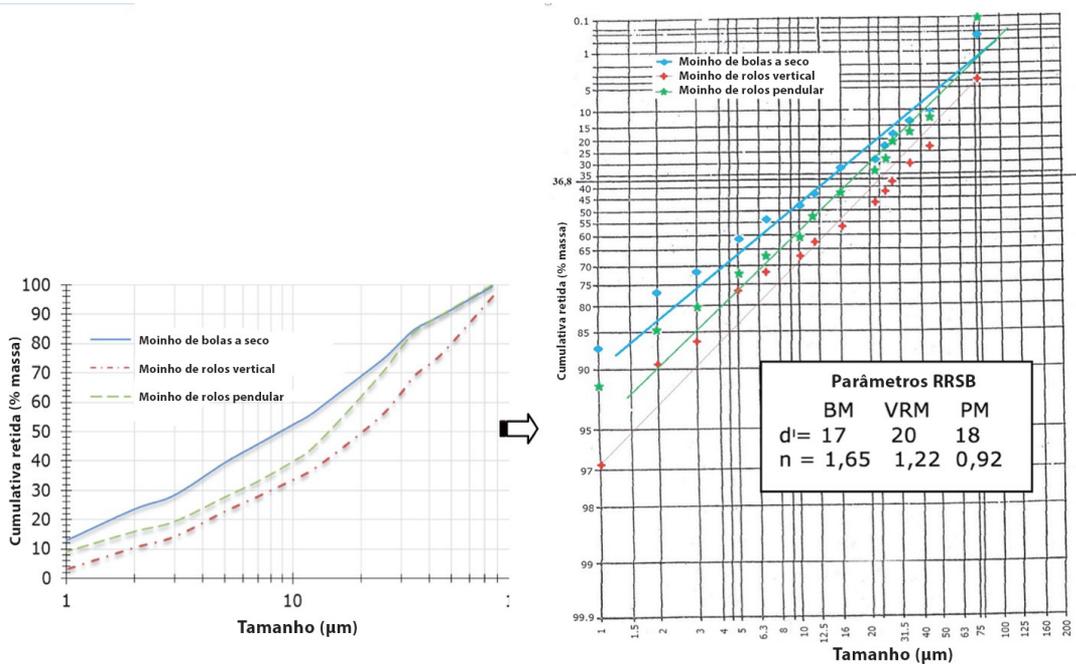


Figura 5. Distribuição de tamanho de partículas do caco cerâmico.

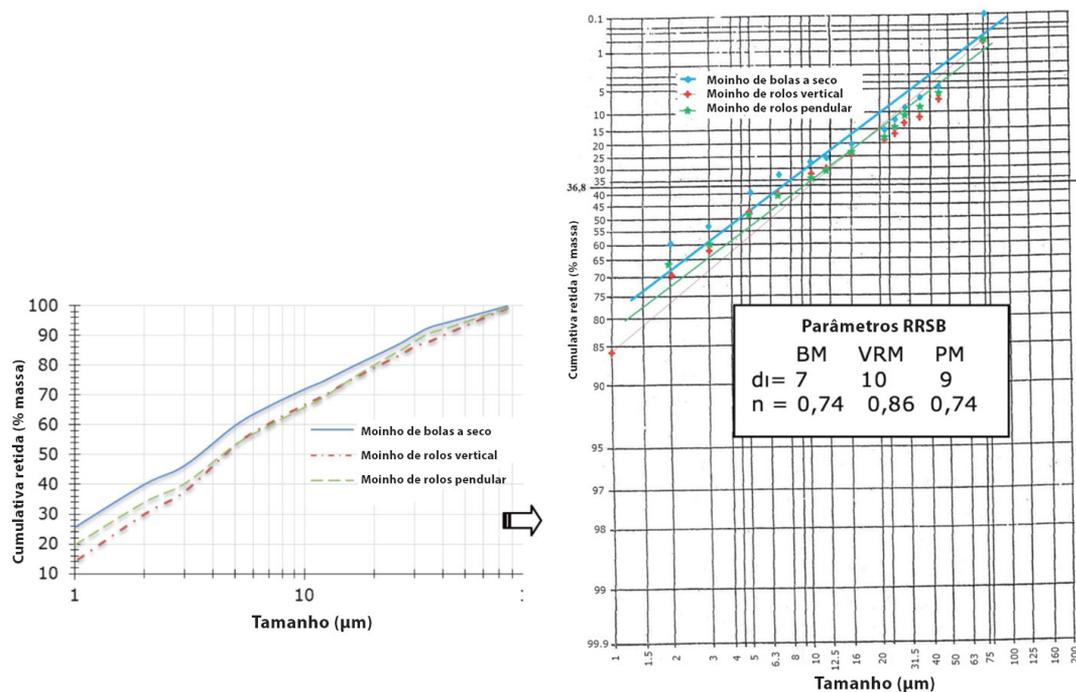


Figura 6. Distribuição de tamanho de partículas do caulim.

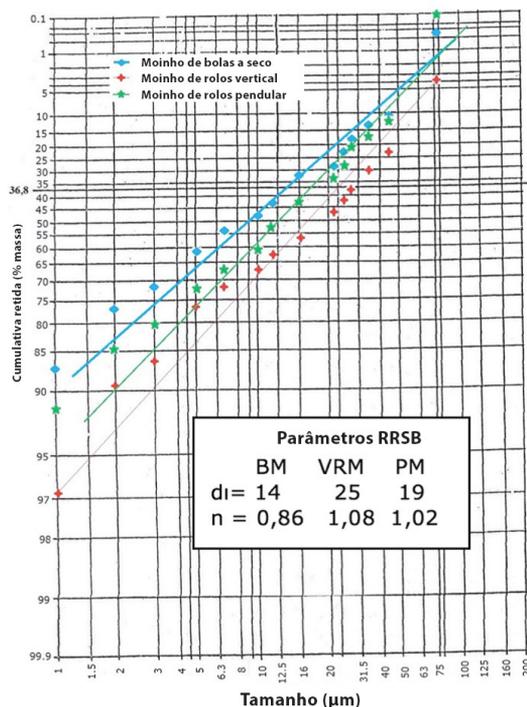
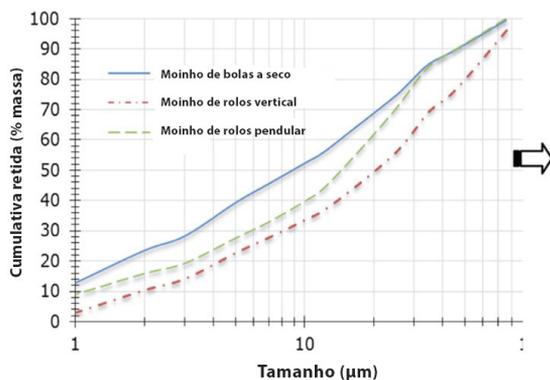


Figura 7. Distribuição de tamanho de partículas do granito.

Tabela 3. Consumo de energia dos três sistemas de moagem.

Amostras	Feldspato	Caulim	Caco de cerâmica	Granito
Índice de trabalho de Bond, kWh/s.t	20,0	12,4	15,1	18,3
Teor de umidade, %	2	13	0	8,2
Moinho de bolas a seco*	62	45	54	58
Moinho vertical de rolos*	57	36	46	52
Moinho pendular de rolos*	61	39	52	56

*Consumo de energia (kWh/t) para obter 4% de resíduo retido em malha de 63 µm.

como seu comportamento durante a queima e as propriedades técnicas do produto final. Pesquisa nesta área está sendo realizada no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Kale e na Universidade Técnica de Istambul.

4. Conclusão

Pode-se concluir que os sistemas MB, MV e MP produzem diferentes distribuições de tamanhos de partículas para as

amostras ensaiadas: feldspato, caulim, caco queimado de pavimento cerâmico e granito. A distribuição RRSB pode ser utilizada eficazmente para definir a distribuição de tamanho de partícula dos distintos sistemas de moagem. Portanto, a distribuição de tamanho e a forma das partículas devem ser consideradas nas características das suspensões preparadas, no seu comportamento durante a queima e nas propriedades técnicas do produto final. Embora os moinhos tipo MV e MP sejam sistemas de moagem com eficiência energética devido às forças de moagem utilizadas, para a seleção ótima de um sistema de moagem também deve ser considerada a velocidade de desgaste e outros parâmetros de custos operacionais.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Cerâmica Kale e é apoiada pelo Ministério de Ciência, Indústria e Tecnologia da República da Turquia.

Referências

1. REED, J. Principles of ceramic processing, Estados Unidos, 1994.
2. SACMI, A. C. T. vol. 1-2, Editrice La Mondragora S.R.L., Imola, Italia, 2002.
3. VARI, A. Raw materials preparation and forming of ceramic tiles, Sala, Módena, Italia, 2004.
4. CLEMENT, S., PRUTYAN, H. Narrowing down equipment choices for particle size reduction. **Chemical Engineering Progress**, v. 98, 50-54, 2002.

5. ERGIN, H. et al. Development of a semi-wet process for ceramic floor tile granule production. **Advances in Science and Technology**, v. 92, 115-120, 2014.
6. BRUSA, A. Continuous grinding – A process applicable to tile production. **Tile & Brick Int.**, v. 10, 252-257, 1994.
7. FUERSTENAU, D. W., ABOUZEID, A. Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution. **International Journal of Mineral Processing**, v. 67, 161-185, 2002.
8. IPEK, H., UCBAS, Y., YEKELER, M. ve Hosten, Ç., Dry grinding kinetics of binary mixture of ceramic raw materials by Bond milling. **Ceramics International**, v. 31, 1065-1071, 2005.
9. VILLEGAS-PALACIO, S., DINGER, D. R. PSD effects on firing properties of porcelains, I-II. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 75, 71-83, 1996.