

Projeto, construção e operação de um moinho de bolas em escala piloto

Design, construction and operation of a ball mill on a pilot scale

Diseño, construcción y operación de un molino de bolas a escala piloto

Recebido: 01/06/2020 | Revisado: 02/06/2020 | Aceito: 12/06/2020 | Publicado: 27/06/2020

Bruno Costa Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0281-0421>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: rocha1bruno@gmail.com

Gustavo Fernandes Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-063X>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: gustavo_azaz@hotmail.com

Renata Soares Trindade

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0198-8498>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: renata_soares62@hotmail.com

Edu Barbosa Arruda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8157-0010>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: edu.arruda@uftm.edu.br

Davi Leonardo de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-9057>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: davi.souza@uftm.edu.br

Resumo

O tipo de dispositivo que foi construído e estudado, era utilizado à 10.000 a.C na Pompéia e utilizava a força de um homem para seu funcionamento, atualmente este dispositivo está modernizado e mais eficiente. A finalidade de um moinho de bolas é a fragmentação de matérias sólidas em grânulos de menor tamanho, habitualmente a sua utilização limita-se à moagem das matérias não plásticas (ou duras). O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto construção e operação de um moinho de bolas de baixo custo para a fragmentação de

materiais, utilizando no seu desenvolvimento materiais reaproveitáveis. A motivação vem da necessidade de um equipamento para efetuar a moagem de amostras a serem utilizadas no laboratório de Engenharia Química, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). Foi realizado o estudo de cada tipo de moinho acompanhado de cálculos teóricos para o dimensionamento e a simulação computacional para que se visualize de perto o possível desempenho do equipamento. Também foi analisado os diferentes tipos de materiais em cada elemento do equipamento, procurando a melhor relação de custo x benefício no projeto. O material utilizado no tambor foi policloreto de vinila (PVC), as esferas foram de vidro, a estrutura de ferro soldado e o motor elétrico utilizado, foi de uma esteira ergométrica. O material utilizado para ser moído, foi a rocha fosfática, com granulometrias diferentes, que pode ser empregada, por exemplo na fabricação de fertilizantes fosfatados. Os resultados foram bastante satisfatórios, chegando a uma redução de até 96,95% do tamanho inicial das partículas moídas.

Palavras-chave: Cominuição; Esferas de vidro; Moinho de bolas.

Abstract

The type of device that was built and studied in this research was used in 10,000 BC in Pompeii and used the strength of a man for its operation, currently this device is modernized and more efficient. The purpose of a ball mill is the fragmentation of solid materials into smaller granules, usually its use is limited to the grinding of non-plastic (or hard) materials. The objective of this work is to present the project construction and operation of a low cost ball mill for the fragmentation of materials, using in its development reusable materials. The motivation comes from the need for equipment to grind samples to be used in the Chemical Engineering laboratory, at the Federal University of Triângulo Mineiro (UFTM). The study of each type of mill was carried out accompanied by theoretical calculations for dimensioning and computer simulation so that the possible performance of the equipment can be closely seen. The different types of materials in each element of the equipment were also analyzed, looking for the best cost-benefit ratio in the project. The material used in the drum was polyvinyl chloride (PVC), the spheres were made of glass, the welded iron structure and the electric motor used, was an ergometric mat. The material used to be milled was phosphate rock, with different granulometries, which can be used, for example in the manufacture of phosphate fertilizers. The results were quite satisfactory, reaching a reduction of up to 96.95% of the initial size of the ground particles.

Keywords: Ball mill; Comminution; Glass beads.

Resumen

El tipo de dispositivo que fue construido y estudiado, se usó en 10,000 AC en Pompeya y usó la fuerza de un hombre para su operación, actualmente este dispositivo está modernizado y es más eficiente. El propósito de un molino de bolas es la fragmentación de materiales sólidos en gránulos más pequeños, generalmente su uso se limita a la molienda de materiales no plásticos (o duros). El objetivo de este trabajo es presentar el proyecto de construcción y operación de un molino de bolas de bajo costo para la fragmentación de materiales, utilizando materiales reutilizables en su desarrollo. La motivación proviene de la necesidad de equipos para moler las muestras que se utilizarán en el laboratorio de Ingeniería Química, en la Universidad Federal de Triângulo Mineiro (UFTM). El estudio de cada tipo de molino se realizó acompañado de cálculos teóricos para dimensionamiento y simulación computacional para que el posible rendimiento del equipo se pueda ver de cerca. También se analizaron los diferentes tipos de materiales en cada elemento del equipo, buscando la mejor relación costo-beneficio en el proyecto. El material utilizado en el tambor era cloruro de polivinilo (PVC), las esferas estaban hechas de vidrio, la estructura de hierro soldado y el motor eléctrico utilizado, era una estera ergométrica. El material que solía ser molido era roca de fosfato, con diferentes granulometrías, que se pueden utilizar, por ejemplo, en la fabricación de fertilizantes fosfatados. Los resultados fueron bastante satisfactorios, alcanzando una reducción de hasta el 96.95% del tamaño inicial de las partículas molidas.

Palabras clave: Conminución; Esferas de vidrio; Molino de bolas.

1. Introdução

Atualmente, o mundo econômico como conhecemos está consumindo e desperdiçando recursos em quantidades sem precedentes. A produção industrial aumentou mais de 50 vezes nos últimos 100 anos, o que libera no ambiente, vários materiais nocivos aumentando em muito o impacto ambiental. É previsto que este desenvolvimento industrial continue e que a produção mundial aumente ainda mais, o que conseqüentemente aumenta o consumo de produtos manufaturados e por sua vez o aumento do consumo de materiais (Manzini, Vezzoli, & Carvalho, 2002).

Esta concepção de sustentabilidade nos traz um debate a ser feito sobre o atual padrão de sustentabilidade que temos hoje. Nas próximas décadas, teremos que passar de uma sociedade em que saúde econômica e bem-estar, que são as medidas em termos de crescimento do país, para uma sociedade em que é possível viver bem consumindo menos e

com uma economia bem desenvolvida, reduzindo a produção de produtos novos (Manzini *et al.*, 2002).

A partir do final da década de 1980, o termo “reaproveitamento” vem ganhando enfoque mais forte, pois foi contando que algumas matérias-primas não renováveis, como o petróleo, iriam se esgotar rapidamente e que não haveria mais espaços para os resíduos na natureza. A reciclagem é uma forma de transformar determinados materiais já beneficiados em outros. Como por exemplo a lata de alumínio, que pode ser fundida e beneficiada novamente, sem a perda de características mecânicas. Mas, isto não ocorre com todos os tipos de materiais, as resinas epóxi não pode ser recicladas, o policloreto de vinila (PVC), um termoplástico que pode ser reciclado e pode possuir um amplo espectro de propriedades de acordo com o aditivo utilizado, porém não mantém as características iniciais (Lima, 2006).

A operação de fragmentação, agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes interna, um sólido, de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor (Figueira, Luz, & Almeida, 2010). A moagem compreende as operações de cominuição na faixa de tamanhos abaixo de $\frac{3}{4}$ ” e é efetuada mediante os mecanismos de arredondamento das partículas, quebra de pontas e abrasão (Chaves, 2002). A moagem é o último estágio do processo de fragmentação. Neste processo, as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, até um tamanho desejado. Os equipamentos mais empregados na moagem são: moinho cilíndrico (barras, bolas ou seixos) e moinho de martelo.

Os moinhos cilíndricos, são constituídos de uma carcaça, que gira sobre mancais e contém no interior, carga de barras ou bolas. O funcionamento se dá com os corpos moedores elevados pelo movimento da carcaça até um certo ponto de onde caem sobre as outras bolas que estão na parte inferior do cilindro e sobre o material que ocupa os interstícios das bolas (Figueira *et al.*, 2010).

A velocidade crítica do moinho e pode ser calculada para qualquer moinho usando-se a equação 1.

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{2r}} \quad (1)$$

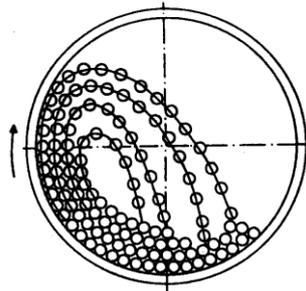
Onde n_c é a velocidade crítica em rpm e r o raio do moinho em metros.

Do ponto de vista prático, os moinhos são operados nas velocidades de 50 a 90% da sua velocidade crítica e a escolha dessas é determinada pelas condições econômicas.

Existem dois regimes de funcionamento do moinho, a moagem em catarata e a moagem em cascata.

Na moagem em catarata, como na Figura 1, a velocidade do moinho carrega as bolas até uma posição bem elevada e essas caem sobre as outras bolas e sobre a polpa causando fragmentação por impacto. Deve-se usar bolas maiores para aumentar ainda mais a energia do meio moedor e baixo fator de enchimento (menos bolas). Este regime é adequado para a fragmentação de material mais grosso e para evitar a produção de finos.

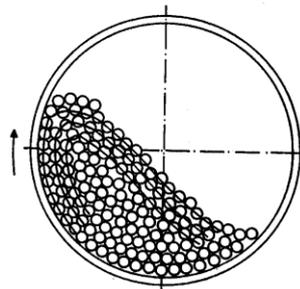
Figura 1: Moagem em regime de catarata.



Fonte: Figueira *et al.* (2010).

Já na moagem em cascata, (Figura 2), a velocidade baixa do moinho e o alto fator de enchimento fazem com que as bolas, ao alcançarem uma certa altura, rolem sobre as outras, não havendo quase impacto e a moagem se dá por abrasão e atrito. Deve-se usar bolas de diâmetros menores. Este regime é adequado para a obtenção de um produto final com granulometria fina.

Figura 2: Moagem em regime de cascata.



Fonte: Figueira *et al.* (2010).

Os moinhos cilíndricos, que utilizam barras como meio moedor, podem ser considerados máquinas de britagem fina ou de moagem grossa. São capazes de suportar uma

alimentação tão grossa quanto 50 mm e fornecer um produto tão fino quanto 500 μm . São muitas vezes escolhidos para britagens finas quando o material é argiloso (Figueira *et al.*, 2010).

A principal característica do moinho de barra é que o comprimento da seção cilíndrica tem 1,25 a 2,5 vezes do diâmetro. Essa razão é importante porque as barras, que têm somente poucos centímetros menores que o comprimento da carcaça, devem ser impedidas de se atravessarem dentro da mesma; entretanto a razão entre a secção cilíndrica e diâmetro do moinho não deve ser muito elevada, pois isso acarretaria o uso de barras muito longas, com tendência a se deformarem (Figueira *et al.*, 2010).

As últimas partes da cominuição são realizados em moinhos cilíndricos, usando bolas como meio moedor. Como as bolas têm maior área superficial, por unidade de peso, do que as barras, são mais adequadas à moagem fina. O termo moinho de bolas é restrito àqueles que têm a relação comprimento/diâmetro de 1,5 a 1 e até menor. Moinhos longos com a relação L/D de 3 a 5, sendo L o comprimento do tambor e D o diâmetro interno, usando bolas como meio moedor, são geralmente compartimentados, sendo que em cada compartimento tem-se um diâmetro de bolas diferente (Figueira *et al.*, 2010).

O objetivo deste projeto foi o desenvolvimento de um moinho de bolas de baixo custo para a fragmentação de materiais, utilizando no seu desenvolvimento materiais reaproveitáveis, tais como tubos de PVC, cantoneiras, estruturas metálicas, motores usados entre outros.

A ideia do projeto surgiu com a necessidade de um equipamento para efetuar a moagem de amostras de rocha fosfática a serem utilizadas no laboratório de Engenharia Química, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM).

2. Metodologia

Separou-se a metodologia em partes, sendo a primeira os passos da construção do moinho, em seguida mostra como realizou-se a operação de moagem e por fim a análise granulométrica das respectivas operações.

2.1 Material utilizado

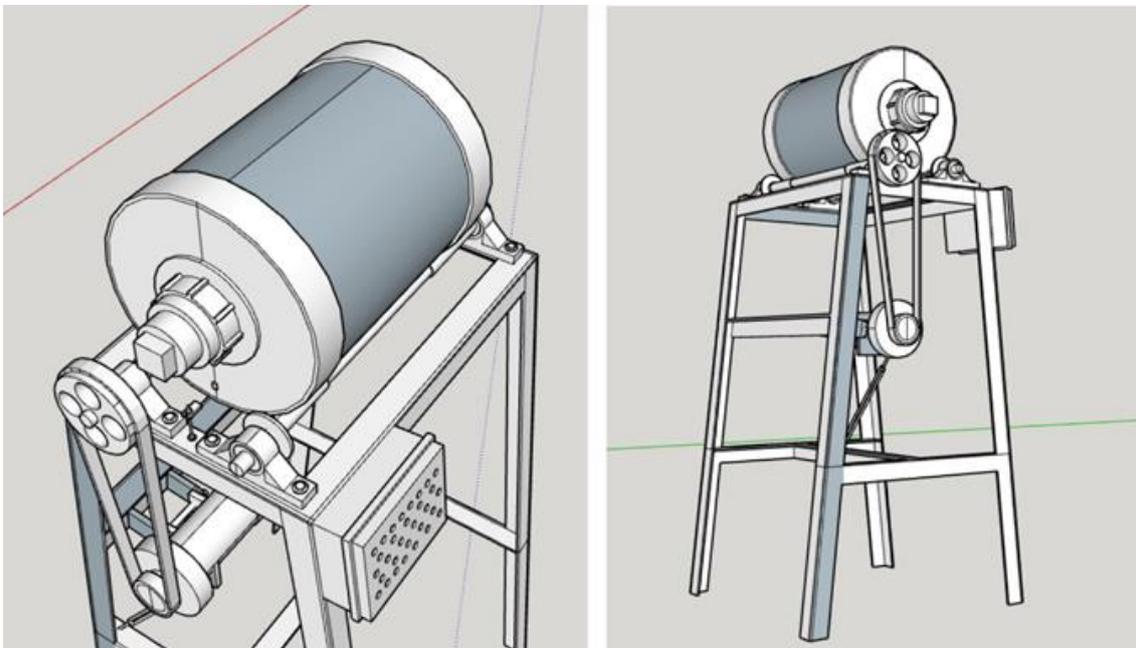
Para a construção do tambor utilizou-se um tubo PVC Ø300mm e dois *cap* PVC Ø300mm. Adaptador flange com um plug rosqueável para a entrada e retirada do material.

Esferas de vidro Ø20mm como corpos moedores. Para a estrutura usou-se um kit de 4 mancais com rolamento + 2 eixos de aço, cantoneiras, porcas e parafusos e tinta spray. Um motor 1,2HP, uma placa do motor e uma caixa para placa do motor foram utilizadas para o funcionamento do moinho. Como material a ser moído usou-se rocha Fosfática.

2.2 Construção do equipamento

O moinho de bolas, foi previamente projetado em três dimensões e ilustrado pela Figura 3.

Figura 3: Modelo esquemático do moinho de bolas.



Fonte: Autores (2019).

A construção do moinho foi realizada através de modelos pesquisados pela internet. O tambor, em que acontece o processo de moagem, constitui de um tubo pvc de diâmetro interno de 300 mm, com um comprimento de 400 mm. Fechado com *cap*, sendo que em uma das extremidades acoplado um adaptador flange e plug roscável para que seja feita a retirada do material e dos corpos moedores, sendo que uma vez colocado o *cap* é de extrema dificuldade de retirá-lo, correndo o risco de danificar a estrutura do tubo.

A estrutura do moinho foi construída com cantoneiras. Na parte superior da estrutura foram colocados dois jogos mancais com rolamento e dois eixos de aço, colocou-se borracha

nas extremidades para que ocorra a rolagem do tambor. O tambor rotativo e a estrutura estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Tambor rotativo e estrutura metálica.



Fonte: Autores (2019).

Como corpos moedores (Figura 5) foram utilizadas esferas de vidro de 18mm.

Figura 5: Corpos moedores.



Fonte: Autores (2019).

O motor utilizado foi um motor de esteira vinculado na estrutura. Foi realizado um sistema com polia e correia (Figura 6) para melhor funcionamento do sistema. Uma polia foi acoplada entre um dos eixos dos mancais e ligada até o motor por uma correia dentada. Para que a correia não escape, conectou-se um esticador ao sistema correia/motor.

Figura 6: Parte de transmissão do moinho.



Fonte: Autores (2019).

O motor foi operado através da placa junto com um controlador, controlando a velocidade de rotação. A rotação era medida através de um sensor (Figura 7) que fazia a leitura de rotação a cada passagem por um ímã acoplado no cap.

Figura 7: Sensor de velocidade.



Fonte: Autores (2019).

2.3 Operação do Moinho

A operação do moinho ocorreu a uma velocidade de 50 RPM, muito próxima a velocidade calculada anteriormente de 54 RPM. O fator de enchimento escolhido é de

aproximadamente 30% a 20%, sendo o fator máximo para que ocorra a moagem de forma adequada é de 50% segundo Figueira et al., o equivalente a 1200 esferas de vidro, obtendo assim uma moagem tipo cascata. O material utilizado para ser moído, foi a rocha fosfática, com granulometrias diferentes. A Tabela 1 contém os valores das variáveis para cada teste.

Tabela 1: Valores das variáveis de operação do moinho.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Massa inicial (kg)	2,00	1,20	2,00	1,98
Tempo (h)	1,00	0,50	1,50	2,00
Granulometria inicial (μm)	1000	1000	425	2460
Relação massa material/massa de bola	1/4,5	1/4,5	1/4,5	1/4,5
Velocidade de rotação (RPM)	50	50	50	50
Massa final (kg)	1,925	1,190	1,945	1,875

Fonte: Autores (2019).

2.4 Análise granulométrica

Para fins de mensuração, foi realizado o teste granulométrico utilizando peneiras de 2,46 mm até 53 μm . Após a moagem, o material foi peneirado em conjuntos de peneiras com o auxílio de um agitador por aproximadamente 20 minutos.

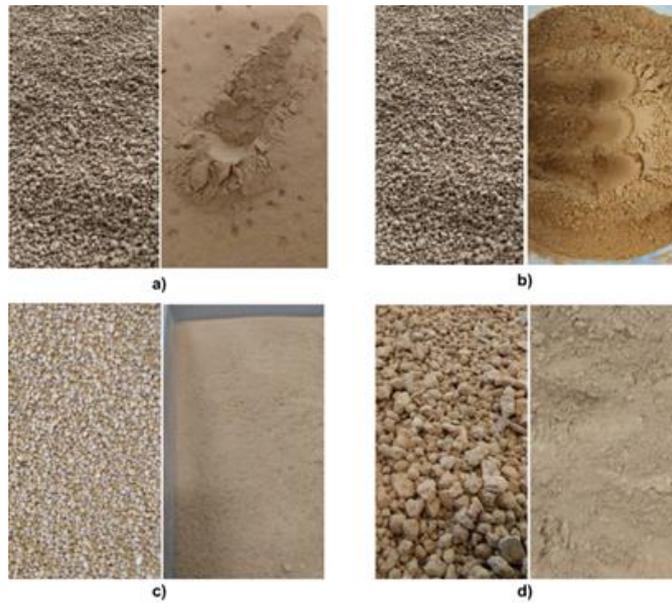
Após o peneiramento as massas de material retido em cada peneira foram anotadas e posteriormente usadas para construir os gráficos com a distribuição acumulativa e os histogramas.

3. Resultados e Discussão

3.1 Testes de moagem

O teste 1 apresentou até 92,5% de redução. Já o teste 2 que foi realizado em um tempo menor teve até 15,9% de redução. O teste 3 obteve até 41,2% de redução. E o teste 4 até 96,95% de redução. Imagens do material antes e depois de serem moídos são ilustradas na Figura 8 abaixo.

Figura 8. Antes e depois: teste1 (a), teste 2 (b), teste 3 (c), teste 4 (d).

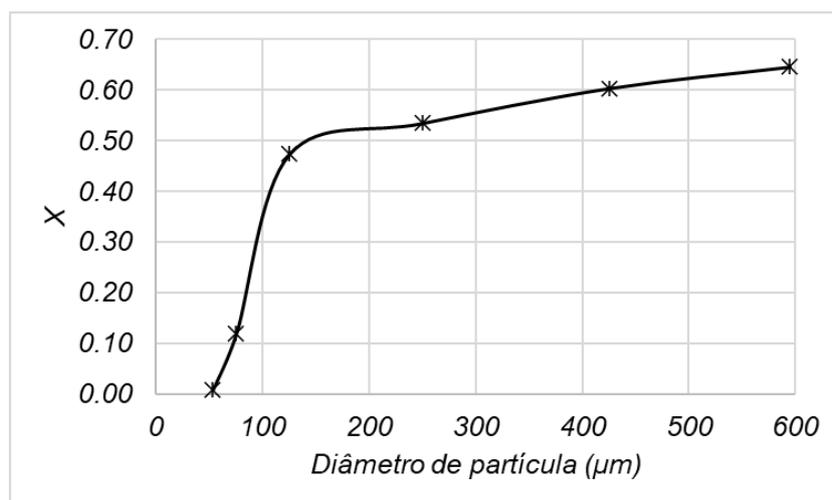


Fonte: Autores (2019).

3.2 Análise granulométrica

Para os quatro testes realizados foram plotadas as distribuições acumulativas ilustradas nas Figuras 9 a 12.

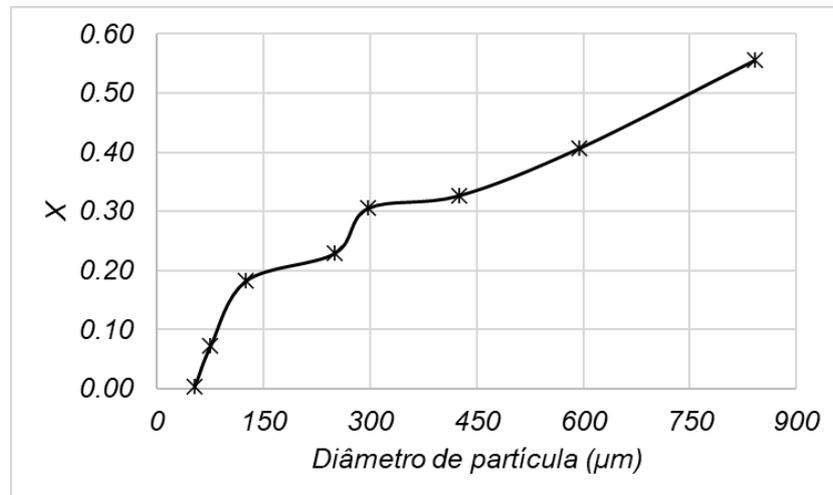
Figura 9: Distribuição acumulativa do teste 1.



Fonte: Autores (2019).

A Figura 9 mostra que mais de 60% do material moído resultou em um produto final com partículas menores que 600 μm .

Figura 10: Distribuição acumulativa do teste 2.

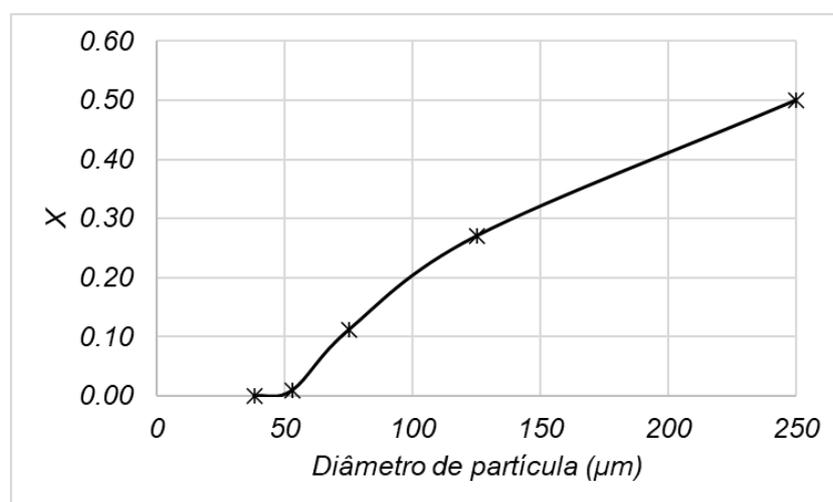


Fonte: Autores (2019).

A distribuição acumulativa do teste 2, representada pela Figura 10 ilustra que aproximadamente 55% do material moído resultou em um produto final com partículas menores que 800 μm .

Mesmo com a granulometria inicial iguais, os testes 1 e 2 apresentou diferenças nas curvas de suas distribuições acumulativas, isso pode ser explicado pelo menor tempo de moagem e menor fator de empacotamento no teste 2.

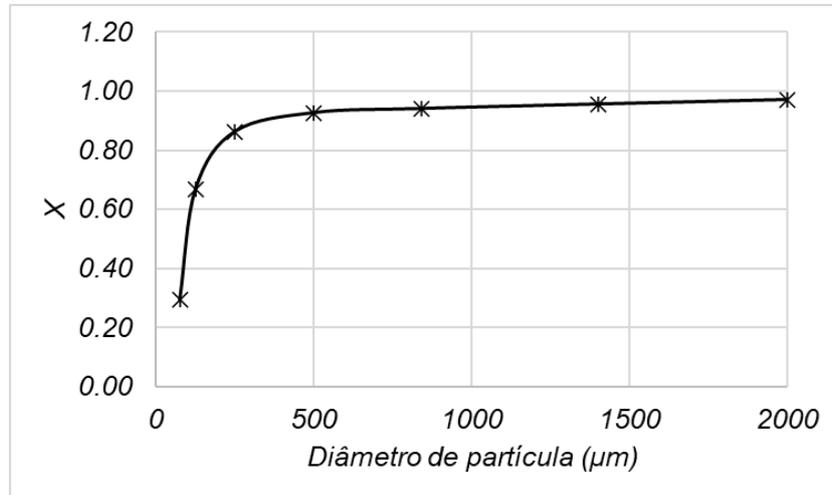
Figura 11: Distribuição acumulativa do teste 3.



Fonte: Autores (2019).

A Figura 11 elucida que mais de 50% do material moído no teste 3 resultou em um produto final com partículas menores que 250 μm .

Figura 12: Distribuição acumulativa do teste 4.

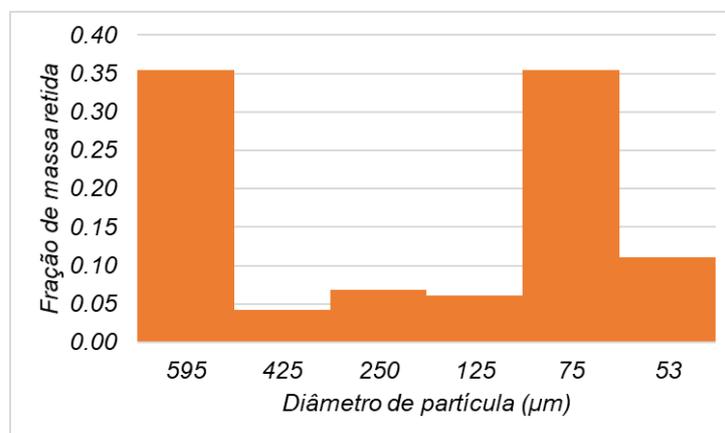


Fonte: Autores (2019).

A distribuição acumulativa do teste 4, ilustrada pela Figura 12, evidencia que aproximadamente 90% do material moído resultou em um produto final com partículas menores que 500 μm . A diferença nas curvas das distribuições acumulativas dos testes 3 e 4 pode ser explicada pela grande desproporção em suas granulometrias iniciais. As distribuições acumulativas de todos os testes mostram que a maioria das partículas após a moagem, possui diâmetro final menor que o diâmetro inicial.

Os histogramas com os valores de fração em massa retida em cada peneira versus o diâmetro de partícula estão representados nas Figuras 13 a 16.

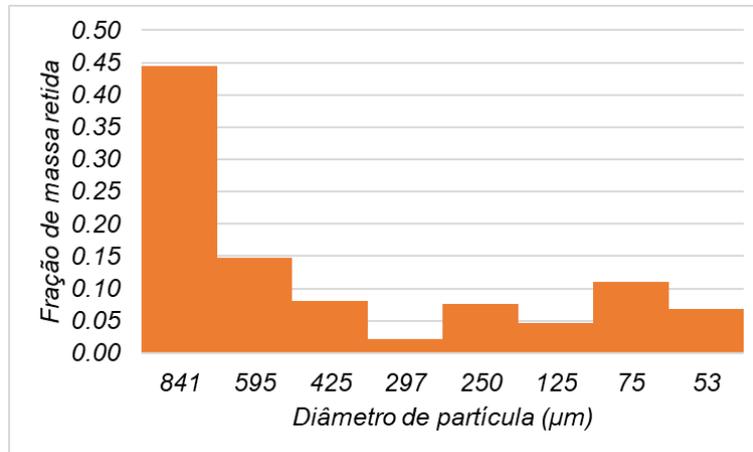
Figura 13: Histograma do teste 1.



Fonte: Autores (2019).

A partir do histograma do teste 1 observa-se que a maioria das partículas ficaram retidas nas peneiras de 595 μm e 75 μm . Essa diferença pode ser explicada pela falta de homogeneidade da granulometria inicial do material.

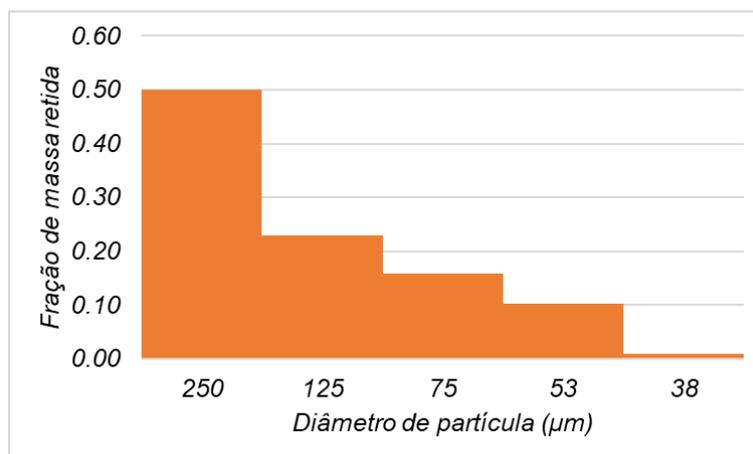
Figura 14: Histograma do teste 2.



Fonte: Autores (2019).

O histograma do teste 2 mostra que a maioria das partículas ficaram retidas na peneira de 841 μm . A baixa redução do tamanho de partícula pode ser explicada pelo tempo de moagem utilizado, que foi o menor dentre os 4 testes.

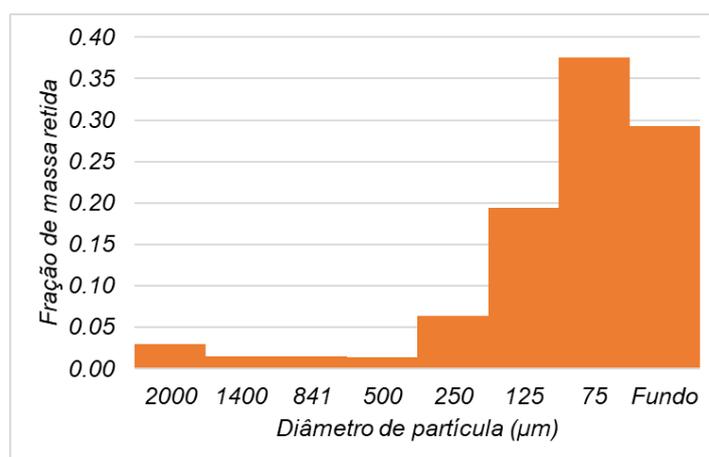
Figura 15: Histograma do teste 3.



Fonte: Autores (2019).

No teste 3, 50% do material peneirado após a moagem ficou retido na peneira de 250 μm .

Figura 16: Histograma do teste 4.



Fonte: Autores (2019).

A partir do histograma do teste 4 nota-se que a maioria das partículas ficaram retidas nas peneiras de 75 µm e no fundo.

Os histogramas dos testes 3 e 4 apresentam grande diferença na redução final do tamanho das partículas, isso pode ser explicado pelo tempo de moagem e pela granulometria inicial do material utilizado.

4. Considerações Finais

O projeto teve como intuito a construção de um moinho de bolas de baixo custo, com utilidades reais para o Departamento de Engenharia Química, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), sendo utilizado no auxílio para o preparo de amostras, em trabalhos de iniciação científica, Trabalho de Conclusão de Curso, ou para o uso em práticas de laboratório de engenharia química. O objetivo principal do equipamento, foi a redução da granulometria de partículas, que no caso deste trabalho foi utilizado a rocha fosfática. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, chegando a uma redução de até 96,95% do tamanho inicial das partículas. A limitação enfrentada durante o trabalho se deu na quantificação dos resultados finais da moagem, a análise granulométrica realizada por meio de peneiramento foi realizada em etapas, já que a capacidade das peneiras era menor que a quantidade de produto moído, resultando assim em valores desiguais para cada teste. Para trabalhos futuros, fica como sugestão o estudo das variáveis do processo, tais como quantidade de bolas, velocidade de rotação, tempo de moagem, e tipo de material a ser moído pelo equipamento, com o objetivo de aprimorar ainda mais o mesmo.

Referências

Chaves, A. P. (2002). *Teoria e Prática de Tratamento de Minérios [3ª ed.]*. Signus. São Paulo, 674p.

Figueira, H. V. O., Luz, A. B. & Almeida, S. L. M. (2010). *Tratamento de Minérios: Britagem e Moagem [5ª ed.]*. CETEM-CNPq-MCT, Rio de Janeiro - RJ, 143-210p.

Lima, M. A. M. (2006). *Introdução aos materiais e processos para designers*. Ciência Moderna. Rio de Janeiro. 240p.

Manzini, E., Vezzoli, C. & Carvalho, A. T. (2002). *O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais*. Edusp. São Paulo. 366p.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Bruno Costa Rocha – 20%

Gustavo Fernandes Teixeira – 20%

Renata Soares Trindade – 20%

Edu Barbosa Arruda – 20%

Davi Leonardo de Souza – 20%