

## Dimensionamento de um moinho de bolas para a fabricação de compósitos poliméricos

### Ball mill design for polymer composites manufacturing

#### RESUMO

Thiago Daroz Pinheiro

[thiagopinheiro@alunos.utfpr.edu.br](mailto:thiagopinheiro@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Caio Augusto Garcia Sampaio  
Valente

[caio.t51@gmail.com](mailto:caio.t51@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Carlos Henrique da Silva

[carlos@utfpr.edu.br](mailto:carlos@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Este trabalho pretende analisar o processo de moagem e validar o dimensionamento de um moinho de bolas, visando entender o processo e obter eficiência na moagem. Para tal análise, foi selecionado apenas um material a ser moído, pó de um polímero termorrígido denominado de fenol-formaldeído, comumente chamado de baquelite. Durante o decorrer do projeto foi utilizado um modelo de moinho comercial, com jarro e esferas cerâmicas, e dois modelos dimensionados e construído, um jarro de aço carbono comum e outro de PVC, em ambos foi utilizado esferas de aço cromo. O processo foi analisado verificando principalmente o efeito de diferentes diâmetros de esferas e do tempo de moagem na granulometria do material moído. Pode-se afirmar que ao aumentar o tempo de moagem e reduzir gradualmente o diâmetro das esferas, resulta em uma granulometria reduzida, saindo de partículas com tamanho superior a 3000  $\mu\text{m}$  e chegando até 16,31  $\mu\text{m}$ , em média. Com tal redução, a interação entre os materiais do compósito é melhorada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Granulometria. Baquelite. Moagem.

#### ABSTRACT

This work intends to analyze the grinding process and validate the design of a ball mill, aiming to understand the process and obtain grinding efficiency. For analysis, only one material was selected to be ground, which is a powder from a thermoset polymer denominated phenol-formaldehyde, commonly know as bakelite. During the project, a commercial mill model was used, with ceramic jug and spheres, and two designed models, one with carbon steel jug and other with PVC jug, both using chrome steel balls. The process was analyzed by checking mainly the effect of different ball diameters and grinding time on the granulometry of the ground material. Increasing the grinding time and gradually reducing the diameter of the spheres, resulted in reduced granulometry, starting with particle size greater than 3000  $\mu\text{m}$  and reaching 16.31  $\mu\text{m}$ , on average. Such reduction could improve interaction between the composite materials.

**KEYWORDS:** Granulometry. Bakelite. Grinding.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

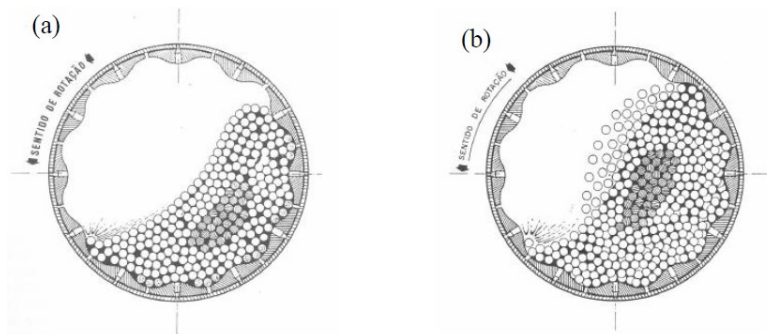


## INTRODUÇÃO

Segundo Aravind (2008) a redução do tamanho de partículas em um compósito e/ou blenda, melhora a interação entre os materiais, algo essencial para compreender a resposta do ponto de vista físico-químico destes materiais. Por este motivo, entender o processo de moagem é fundamental.

O moinho de bolas é um equipamento que utiliza um cilindro que sofrerá rotação, originando o movimento da carga em seu interior, ocasionando processo de fragmentação das partículas. A velocidade de rotação utilizada influencia o tipo de movimento das esferas, se do regime cascata ou catarata.

Figura 1 – Regime de moagem: (a) cascata; (b) catarata



Fonte: Beraldo (1987).

A operação de moagem se processa por meio de três mecanismos principais: impacto, compressão e cisalhamento (Valadão, 2007).

Na moagem em catarata, a velocidade do moinho carrega as esferas até uma posição bem elevada e essas caem sobre as outras esferas e sobre a polpa causando fragmentação das partículas por impacto. Deve-se usar esferas maiores para aumentar ainda mais a energia do meio moedor e baixo fator de enchimento (menos esferas). Este regime é adequado para a fragmentação de material de maior granulometria e para evitar a produção com menor granulometria. Na moagem em cascata, a velocidade baixa do moinho e o alto fator de enchimento fazem com que as esferas, ao alcançarem uma determinada altura, rolem sobre as outras, não havendo quase impacto e a moagem se dá por abrasão e atrito. Deve-se usar esferas de diâmetros menores. Este regime é adequado para a obtenção de um produto final de menor granulometria (Luz, 2010).

Para evitar que o material moído seja contaminado, geralmente utiliza-se como elemento de moagem a alumina ( $Al_2O_3$ ), tanto para o jarro quanto para as esferas. Também é possível utilizar esferas de aço inoxidável e realizar um revestimento de cromo duro no jarro. Estes materiais são utilizados também em função de sua alta densidade.

O processo de moagem pode ser conduzido através de dois tipos de processo, via seca ou via úmida, neste trabalho o processo utilizado foi de moagem a seco, no sistema de esferas com jarro.

Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência do processo de moagem, alterando condições como dimensão do cilindro, diâmetro e quantidade de esferas, além dos materiais do cilindro e esferas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar o processo de moagem, pó de baquelite comercial foi escolhido como material de referência.

A baquelite foi moída no Laboratório Geral do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC-UTFPR) em um moinho de bolas da marca Quimis, modelo Q298-2. Foram utilizadas esferas de alumina de aproximadamente 40 mm de diâmetro e um jarro cerâmico com 230 mm de diâmetro e 310 mm de comprimento. O processo de moagem foi contínuo e durou 4 horas a uma rotação de 150 RPM. Após isso, a baquelite passou por peneira de *mesh* 40.

Figura 2 – Fotografia do moinho de bolas QUIMIS Q298-2 do DACOC-CT.



Fonte: Autoria própria (2019).

Devido suas grandes dimensões, mesmo sendo ele um moinho de laboratório, verificou-se a necessidade de se projetar um moinho menor, visando economia de material e de esferas.

Para dimensionar este moinho, alguns parâmetros devem ser selecionados (a escolha desses valores foi baseada no trabalho de Oliveira, 2012):

- Fator de enchimento: 30% - representa o percentual de volume do moinho ocupado pelas esferas (considerando o espaço vazio entre elas);
- Volume de carga: 50 – 60% - representa o percentual de volume do moinho ocupado pelo material a ser moído;
- Velocidade de trabalho: 60 – 85% da velocidade crítica.

A velocidade crítica se dá através da equação 1:

$$v_c = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (1)$$

onde  $v_c$  é a velocidade crítica em rpm,  $g$  é a aceleração da gravidade em  $m/s^2$ ,  $r$  é o raio do jarro em m.

Durante o projeto, foram desenvolvidos dois jarros, conforme Figura 3. Inicialmente foi fabricado um jarro de aço carbono comum com 35mm de diâmetro e 100mm de comprimento, conforme apresentado na Figura 3-a.

Figura 3 – a) Fotografia do jarro metálico montado, mostrando corpo metálico e tampa de acrílico. b) Fotografia do jarro de PVC



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2019).

Visando a obtenção de material de menor granulometria que a obtida com o moinho de alumina, foi selecionado esferas de aço cromo de 8mm de diâmetro. O número de esferas necessárias foi calculado utilizando as equações apresentadas no Quadro 1, onde as células em vermelho são os parâmetros de entrada e as em azul são as variáveis calculadas.

Quadro 1 – Parâmetros de cálculo para o dimensionamento de moinho de bolas

Diâmetro (mm)	35,00	D
Comprimento (mm)	100,00	l
Volume interno (mm <sup>3</sup> )	96211,28	$V_i = \frac{\pi D^2}{4} * l$
Diâmetro esferas (mm)	8,00	d
Volume un. esf. (mm <sup>3</sup> )	268,08	$V_e = \frac{\pi d^3}{6}$
Fator de empacotamento	0,68	FAE
Fator de enchimento	0,30	f
Número de esferas	73	$N = FAE * f * V_i / V_e$
Velocidade crítica (RPM)	226	$v_c = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}}$
Densidade Pani (g/mm <sup>3</sup> )	0,00133	$\delta$
Volume materia prima min (mm <sup>3</sup> ) (Volume de carga: 50%)	4618,14	$V_{min} = 0,5 * f * (1 - FAE) * V_i$
Massa materia prima min (g)	6,14	$m_{min} = \delta * V_{min}$

Fonte: Autoria própria (2019).

Para imprimir a rotação do jarro foi utilizado o torno mecânico, do Laboratório de Protótipos (LaProto-DAMEC), da Equipe Imperador UTFPR (Projeto Baja) com rotação de 150 RPM, que é aproximadamente 66% da rotação crítica, durante um período de 4 horas.

Durante a etapa de validação deste jarro metálico, detectou-se a ocorrência de contaminação do material moído por fragmentos de sua parede. Portanto o



material do jarro inicial, aço carbono comum, foi substituído por policloreto de vinila (PVC), conforme mostra a Figura 3-b.

Utilizando um tubo e dois caps comerciais de PVC, foi fabricado um jarro de 100 mm de diâmetro e de comprimento.

Com este jarro, foram utilizadas esferas de 6 e 3 mm de diâmetro, 1500 e 11500 unidades respectivamente. Para o dimensionamento do jarro, e cálculo da quantidade de esferas foram utilizadas as mesmas equações do Quadro 1.

O processo de moagem com o Jarro de PVC foi realizado no moinho de bolas do Laboratório de Manufatura Aditiva, com rotação de 92 RPM, por um período de 4 horas e 113 RPM por mais 4 horas, totalizando 8 horas de moagem, tanto para esferas de 6 mm quanto para a de 3 mm. As rotações mencionadas representam aproximadamente 69 e 84% da velocidade crítica.

Com objetivo de verificar a eficiência do processo, foi utilizada a mesma amostra em todas as moagens.

A medição do tamanho de partícula foi realizada no Laboratório de Caracterização de Partículas do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) em um granulômetro fabricado pela Microtrac com o analisador S3500 e o acessório TurboTrac.

Como parâmetro, os resultados da granulometria foram analisados considerando o D50, sendo o diâmetro mediano, aquele que divide a metade menor da metade maior da amostra. Também se optou por avaliar a largura do pico da distribuição, considerando o intervalo entre o 16% e 84%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados granulométricos do material aplicado nos processos de moagem descritos anteriormente.

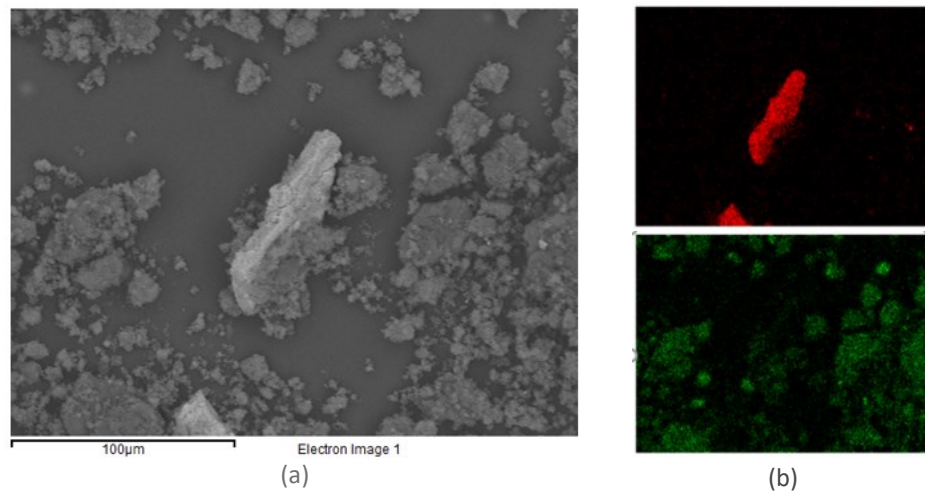
Tabela 1 – D50 de cada amostra, para diâmetro das esferas e tempo de moagem

Amostra	Diâmetro da Esfera (mm)	Tempo de Moagem (h)	D50 (um)
O	-	-	-
A	40	4	295,50
B	8	4	-
C	6	8	31,84
D	3	4	22,91
E	3	8	16,31

Fonte: Autoria própria (2020).

Comparando as amostras de A a D, pode-se notar que o que o diâmetro das partículas diminui proporcionalmente com a redução do diâmetro das esferas no processo de moagem. Analisando as amostras D e E, é possível verificar que o diâmetro das partículas diminui ao aumentar o tempo de moagem. A amostra B é referente ao material contaminado pelo jarro metálico, informado na seção anterior, conforme figura 4.

Figura 4 – a) Partícula de aço encontrada no material moído. b) Mapeamento de ferro (vermelho) e fósforo (verde) da Figura 4-a.



Fonte: Autoria própria (2019).

Vale ressaltar que a contaminação foi identificada na moagem de um outro polímero denominado polianilina, não a baquelite. Porém após a identificação do contaminador, foi decidido descartar a utilização do jarro metálico.

A medição do tamanho de partícula da amostra O não foi realizada devido seu estado comercial possuir granulometria superior a 1500 µm, conforme Figura 5, que é o limite superior de leitura do granulômetro.

Figura 5 – Comparação do tamanho de partícula da baquelite não moída com uma esfera de 3mm de diâmetro

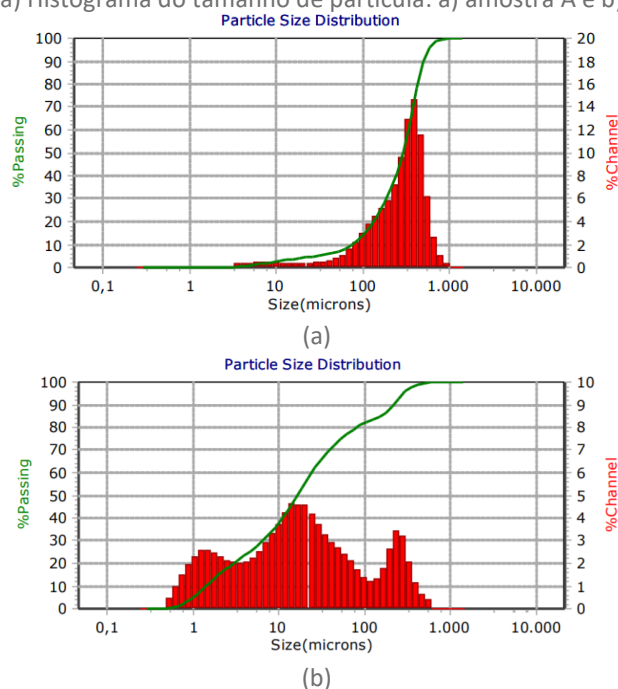


Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 6-a é possível verificar que o diâmetro de partícula da amostra A é homogêneo. Na Figura 6-b é apresentando o histograma do tamanho de partícula da amostra E, e seu resumo na Tabela 2. Com esses dados é possível observar que o diâmetro de partícula da amostra não é homogêneo. Esse efeito pode ser reduzido por:

- Aumentar a variedade e esferas, reduzindo a amplitude entre os diâmetros;
- Aumentar o tempo de moagem;
- Peneirar o material antes e após a moagem.

Figura 6 – a) Histograma do tamanho de partícula: a) amostra A e b) amostra E.



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2 – Resumo do histograma da medição de distribuição de tamanho de partícula mostrada na Figura 6 b)

Resumo dos picos		
Diâmetro (um)	Volume (%)	Largura (um)
223,70	19,10	189,10
15,67	63,90	35,19
1,27	17,00	1,08

Fonte: Autoria própria (2020).

## CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados foi possível entender de forma mais detalhada o processo de moagem e de dimensionamento de um moinho de bolas, obtendo boa eficiência. Pode-se afirmar que ao aumentar o tempo de moagem e reduzir gradualmente o diâmetro das esferas, resultam em uma granulometria reduzida do pó. Posteriormente serão realizadas modificações no processo de moagem, com o objetivo de melhorar a eficiência e alcançar partículas sub micrométrica.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à UTFPR, ao Professor Carlos Henrique da Silva, Professor Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz, Mestrando Caio Augusto Garcia Sampaio Valente e ao Doutorando Antonio Verguetz Silva, ao DAMEC, DAQBi, DACOC, ao IFPR.

## REFERÊNCIAS

ARAVIND, D.; ZHONG-ZHEN, Y.; YIU-WING, M. Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites. **Materials Science and Engineering: R: Reports**. v. 63, n. 2, p. 31-80, mai. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X08001009>. Acesso em: 18 nov. de 2019.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blücher, 1987.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5ª Edição, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

OLIVEIRA, R. F. **Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas**, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9CAG47>. Acesso em: 03 de dezembro de 2019.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.