

## DIRETRIZES PARA A CONSTRUÇÃO DE UM MOINHO DE BOLAS PARA A MOAGEM DE SÓLIDOS EM LABORATÓRIOS

Lucas F. de Paula<sup>a,\*</sup>, Alberth C. Alves<sup>a</sup>, Heden C. S. Alves<sup>a</sup>, Edimar A. Ribeiro<sup>b</sup>, Ana G. B. Madurro<sup>c</sup> e João M. Madurro<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, 38408-100 Uberlândia – MG, Brasil

<sup>b</sup>Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, 38408-100 Uberlândia – MG, Brasil

<sup>c</sup>Instituto de Genética e Bioquímica, Universidade Federal de Uberlândia, 38400-902 Uberlândia – MG, Brasil

Recebido em 04/09/2013; aceito em 08/11/2013; publicado na web em 03/02/2014

GUIDELINES FOR THE CONSTRUCTION OF A BALL MILL FOR GRINDING SOLIDS IN THE LABORATORY. In this paper, we show the construction of a low-cost, high-quality ball mill for obtaining finely divided powders, with the goal of presenting guidelines for achieving the best results for the milling process. This equipment allows for the adjustment of the size of the mill in order to process different quantities of material. The construction of mechanical and electrical components that provide increased efficiency, the choice of milling medium, and frequent problems experienced with homemade ball mills are discussed.

Keywords: ball mill; grinding media; finely divided powder.

### INTRODUÇÃO

Em função do crescente aumento do número de trabalhos voltados à nanotecnologia, diferentes necessidades experimentais voltadas ao preparo de novos materiais mostram-se emergentes. Muitos dos materiais sólidos empregados nestas abordagens, normalmente produzidos em pequena escala, requerem em suas aplicações finais a utilização de uma fina granulometria.

Um moinho de bolas universal, representado na Figura 1, é um dispositivo que, por meio de rotação, promove a sucessiva colisão de esferas, responsáveis pela quebra progressiva de um determinado material, reduzindo-o em partículas menores. Esse dispositivo também pode ser empregado para uma eficaz homogeneização de misturas.

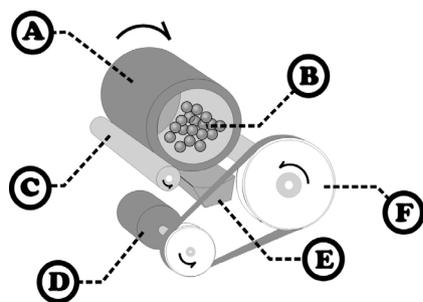


Figura 1. Representação esquemática de um moinho de bolas. A) Jarro de moagem; B) Meio de moagem (esferas); C) Rolos; D) Motor; E) Correia; F) Polia

A moagem pelo uso de um moinho de bolas é uma técnica tradicional no processamento de pós, frequentemente utilizada para a redução do tamanho de partículas, ou para a mistura de diferentes materiais.<sup>1</sup> A técnica é amplamente utilizada nos trabalhos industriais e laboratoriais no processamento de fármacos, minérios, fertilizantes, alimentos, metais, tintas, argamassas, materiais refratários, cerâmicas, óxidos, catalisadores, e diversos outros produtos.

Alguns materiais nanotecnológicos, como nanotubos de carbonos, e partículas nanométricas de óxidos, nitretos, hidretos e carbetos também têm sido confeccionados por uma variante deste gênero, chamada de moinho de bolas de alta energia.<sup>2,3</sup> Nesta situação, utiliza-se

longos regimes de operação e ímãs próximos ao moinho visando a obtenção de maiores energias de impacto das colisões entre as esferas em função da atração esfera metálica – magneto.

Assim como a trituração de materiais, observa-se que o moinho de bolas também é utilizado como reator para sínteses sem solvente (i.e., *solvent free*).<sup>4-6</sup> Em alguns casos pode-se adicionar ao moinho determinados fluidos que favoreçam o processo de moagem. Esse procedimento é também chamado de moagem por via úmida. A eficiência de ambos os processos depende de vários aspectos, mas normalmente observa-se que a moagem via úmida apresenta produtos de menor granulometria do que aqueles processados por via seca.<sup>7,8</sup>

Como a construção de baixo custo de um destes dispositivos mostra-se aparentemente simples, ocorre de indústrias e laboratórios confeccionarem suas próprias versões de moinhos de bolas, as quais nem sempre apresentam adequadas características de trabalho, baixas eficiências e alta contaminação de produtos finais. Assim, o presente trabalho visou apresentar detalhes da construção de um moinho de bolas para o processamento em pequena escala (0,5 – 3,5 Kg), bem como diretrizes que auxiliem a construção de equipamentos deste tipo exibindo alta qualidade, eficiência e longa durabilidade.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Meio de moagem

Visando a minimização de resíduos de moagem na amostra final, é interessante que o jarro e as esferas de um moinho sejam confeccionados com o mesmo material, e, além disso, é importante que este material seja mais duro que a amostra. Têm-se observado que alguns moinhos são montados de forma que o jarro seja de polietileno de alta densidade e as esferas de aço. Apesar destes materiais serem de fácil acesso, essa utilização deve ser evitada por aqueles que desejarem um mínimo de resíduo de moagem no material final, uma vez que essa diferença de dureza culmina em riscos do material menos duros, desgastando-o e contaminando o produto final.

A Tabela 1 mostra os valores de dureza e densidade de alguns materiais, na escala mohs, os quais podem servir de referência para a escolha de alguns destes materiais. Sabe-se que sólidos de maior densidade favorecem a eficiência do processo de moagem em função

\*e-mail: msc\_lucasferreira@yahoo.com.br

da esfera densa causar maior impacto sobre o material durante a queda (i.e., maior energia de colisão).

**Tabela 1.** Alguns materiais empregados para a moagem com moinhos de bolas

Material	Composição	Dureza (mohs)	Densidade (g m <sup>-3</sup> )
Vidro	Variável	5,5-7 <sup>9</sup>	2,4-2,8 <sup>8-10</sup>
Aço Inox*	Fe:C:Cr:Ni;	5,5-6	8
Ágata	SiO <sub>2</sub>	6,5 <sup>10</sup>	2,5-2,7 <sup>10</sup>
Porcelana	Variável	6-8**	2,6**
Zircônia	ZrO <sub>2</sub>	6,5 <sup>10</sup>	5,7 <sup>10</sup>
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-9 <sup>10</sup>	3,97 <sup>10</sup>
Carbeto de Tungstênio	CW	9 <sup>10</sup>	14-15 <sup>10</sup>

\*Para o aço inox AISI 304, bastante difundido no comércio/indústria, sua dureza na escala rockwell B é aproximadamente 80<sup>11</sup>

\*\*Valores obtidos pela média ponderal de suas composições.

Dos materiais citados, os jarros e esferas de porcelana apresentam um custo benefício atraente, tendo uma dureza suficiente para a moagem de diversos materiais e, por essa razão, nesta aplicação, foram utilizados jarros de porcelana de 1, 3 e 5 Litros (Chiarotti, São Paulo, Brasil), juntamente com esferas de porcelana de 13, 19 e 25 mm e ferragens apropriadas para a vedação do jarro, todos obtidos dessa mesma empresa.

Visando a obtenção de melhores resultados, o volume de amostra e esferas inseridas, deve estar próximo à 50% do volume do jarro. Além disto, a quantidade de esferas adequada para uma moagem sob maior eficiência está próxima a 20% do volume total. Por essa razão, um jarro normalmente suporta adequadamente cerca de 30% em volume de amostra.

### Velocidade de rotação

Caso a velocidade rotação de um moinho venha a exceder a determinadas magnitudes, o meio de moagem começa a centrifugar-se e então as esferas irão cair sobre as outras, reduzindo drasticamente a eficiência do sistema. Assim, a velocidade crítica ( $V_c$ ), em rpm, para um moinho de bolas pode ser calculada por:

$$V_c = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R-r}}$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade (981 cm/s<sup>2</sup>),  $R$  é o raio do moinho em centímetros, e  $r$  o raio das esferas de moagem em centímetros.

Considerando a utilização de esferas com raio de 0,65 cm e um moinho de raio 7,5 cm, sabe-se que a velocidade crítica é aproximadamente 114 rpm. Recomenda-se trabalhar-se com velocidades de cerca de 60-70% da velocidade crítica, uma velocidade razoável de trabalho seria entre 68 e 80 rpm.

### Escolha do motor

A escolha de um motor para o moinho requer alguns cuidados especiais, visando à obtenção de melhores rendimentos e o correto dimensionamento do sistema. Por exemplo, nesta aplicação, a utilização de um motor de corrente alternada, monofásico, de regime contínuo, de baixa rotação, mostra-se uma escolha bastante adequada. Motores de corrente alternada estão disponíveis para potências maiores, a custos mais acessíveis.

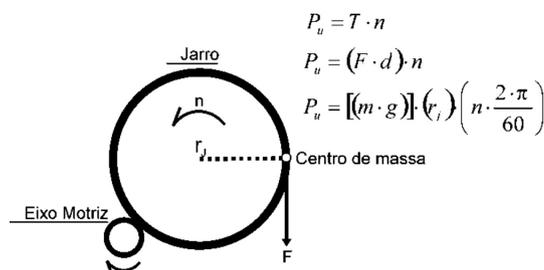
Um motor de um moinho de bolas deve ser preferencialmente de

regime contínuo, o que significa que ele opera realizando trabalho durante muito tempo, mantendo sua temperatura sob equilíbrio. Motores assim são também denominados de S1 segundo a norma NBR 17094 parte 2 da ABNT.<sup>12</sup> Essa característica é muito importante, pois algumas amostras necessitam de altos períodos de moagem até a obtenção da granulometria desejada. Nos moinhos de bola de alta energia essa característica é crítica em função das amostras frequentemente necessitarem de processamento em regimes de 200 h ou superiores.<sup>2</sup>

Têm sido observado que algumas construções do tipo *homemade*, ou mesmo modelos comerciais de moinhos de baixa qualidade, às vezes reutilizam motores de outros equipamentos tais como furadeiras, parafusadeiras, tanquinhos, máquinas de lavar, que não são de regime contínuo, e, por essa razão, tempos de moagens elevados normalmente tendem a aquecer demasiadamente o motor, prejudicando seu tempo de vida, ou mesmo danificando-o.

A escolha de um motor monofásico ocorreu uma vez que instalações trifásicas não são muito comuns em laboratórios, farmácias, pequenas indústrias e empresas. Os motores monofásicos comumente apresentam 2 ou 4 pólos, também conhecidos como motores de alta ou baixa rotação, respectivamente. Os motores de 4 pólos apresentam velocidades de rotação próximas a 1750 rpm e, portanto, a redução de velocidade para a calculada, aproximadamente 40 - 80 rpm, torna-se muito mais simples.

Para se definir a potência do motor é necessário conhecer o torque que será exigido pela carga, ou a curva de carga do equipamento. Uma estimativa segura para se calcular o torque necessário é admitindo a situação na qual toda a carga do moinho encontrasse na extremidade lateral exemplificada na Figura 2. Nesta situação, o torque máximo é requerido, em função do centro de massa estar deslocado totalmente na lateral do moinho, e se encontra a uma distância igual ao raio do moinho. Assim, se o motor se adequar a essa situação, todas as situações de menor demanda de torque serão satisfeitas.



**Figura 2.** Cálculo utilizado para obtenção da potência necessária ao sistema.  $P$  é a potência útil em W,  $m$  é a massa, em Kg, do sistema (jarro, esferas e amostra),  $g$  é a aceleração da gravidade em m s<sup>-2</sup>,  $r_j$  o diâmetro em metros do jarro, e  $n$  a rotação do jarro, em rpm

Calculou-se para um jarro de porcelana de 5000 mL, dotado de esferas e material para moagem, totalizando 23,8 Kg, rotacionado a 42 rpm, uma potência necessária de 141,6 W, e à essa potência, admitiu-se mais 10% para possíveis perdas no sistema, e 20% para sobredimensionamento, obtendo-se assim uma potência de 187 W. Assim, um motor de 1/3 de cv, de 85% de eficiência (i.e., 208 W) mostra-se adequado para o acionamento do moinho.

Utilizou-se neste trabalho um motor de corrente alternada, monofásico, com capacitor de partida, potência de 1/3 de cv, regime contínuo - S1, tensão 220 V, 4 pólos, 1750 rpm.

### Redução de velocidade

Optamos neste trabalho por reduzir a velocidade do motor para o moinho pelo uso de polias trapezoidais (também conhecidas como

polias em “V”) de alumínio com correia lisa. Estas polias tem um custo acessível, e não apresentam perdas significativas de potência.

A correia de perfil padrão tipo A (trapezoidal) é bastante comum, se aplica melhor à polias menores e é mais adequada à transmissões de movimentos de menor potência (< 3,5 cv) como é o caso deste moinho. O uso de correias de perfis menores não é recomendado, pois, podem exigir o uso de várias correias, tornando o sistema mais caro e menos simples. O dimensionamento adequado da redução das velocidades foi realizado pela relação velocidade angular/diâmetro:

$$D_1 \cdot n_1 = D_2 \cdot n_2$$

Assim, conforme mostrado na Figura 2, utilizamos uma polia menor de 50 mm de diâmetro acoplada ao motor, para uma polia maior de 250 mm de diâmetro, reduzindo a velocidade de 1750 para 350 rpm (1:5) no eixo do moinho.

Utilizamos como eixo do moinho uma barra maciça de aço trefilado, revestida de borracha totalizando 33 mm de diâmetro. Esse eixo transmite o movimento ao jarro do moinho em um sistema conhecido como roda de atrito, e assim, constitui também em uma segunda redução de rotação. Como os diâmetros dos jarros utilizados foram de 190, 240 e 275 mm, a velocidade de rotação foi reduzida para 60, 48 e 42 rpm, respectivamente, e, encontram-se abaixo da velocidade crítica de moagem, previamente calculada.

Visando a livre rotação do eixo do moinho, foi acoplado às extremidades rolamentos de esferas e mancais de suporte para a fixação desta estrutura à carcaça metálica do moinho.

### Estrutura metálica

As estruturas de suporte do moinho foram construídas de chapas ou perfis metálicos, pois a utilização de madeira compensada ou aglomerados de fibra de madeira de média densidade (MDF), pode não resistir à vibração gerada pelo sistema em funcionamento, uma vez que se deseja ter um equipamento de alta durabilidade. A estrutura metálica proposta visa adequar-se à possibilidade de pouco instrumental de usinagem mecânica.

Uma chapa de aço nº 12, de 1400 mm de comprimento e 530 mm de largura, foi dobrada a 15 mm de suas extremidades, num ângulo de 90°. A peça obtida é similar à exibida na Figura 3C. A essa chapa realizou-se dois cortes, para obtenção de duas chapas com comprimento de 400 mm e uma chapa com comprimento de 600 mm. Efetuou-se a soldagem de duas cantoneiras nas chapas de 400 mm visando suportar a chapa de 600 mm. A peça resultante tem um perfil estilo “H”, similar à exibida na Figura 3B.

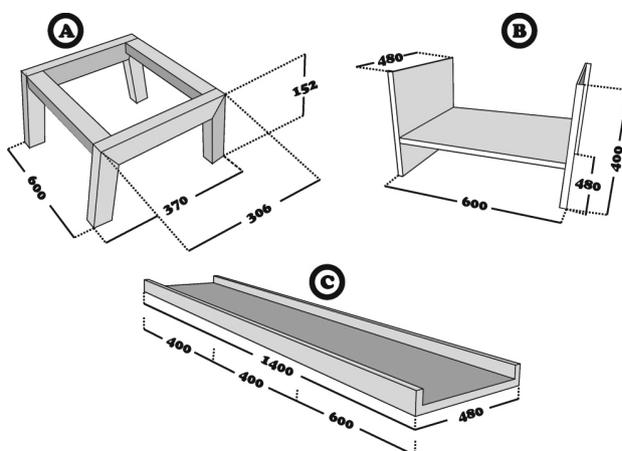
### Montagem do moinho

Utilizou-se dois eixos acoplados ao moinho, um deles foi acoplado à polia e será designado por eixo motriz, o outro apenas tem a função apoiar o jarro, e foi designado eixo secundário. Esse eixo secundário foi acoplado à estrutura metálica por meio de rasgos que possibilitam seu deslocamento horizontal, permitindo a inserção de jarros de variados tamanhos.

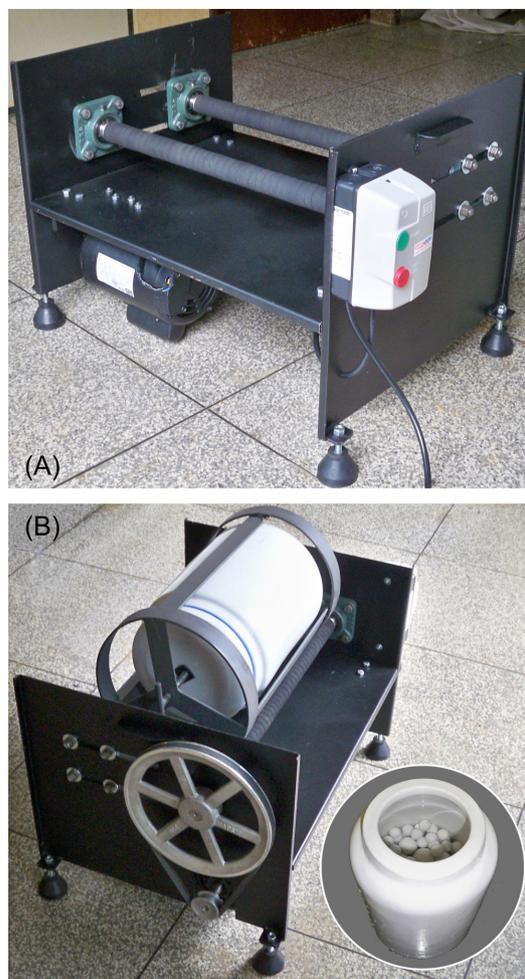
Ajustou-se suportes ou “pés” antivibracionais, que além de sua função trivial, permitem o nivelamento do moinho em superfícies irregulares sem deslocamentos indesejados.

O motor foi inserido de cabeça para baixo, debaixo da chapa central, e acoplado de forma que seu próprio peso esticasse a correia. Para isto acoplou-se o motor a uma dobradiça reforçada, conforme a Figura 4A.

Visando a proteção elétrica do motor, utilizou-se uma chave de partida magnética WEG, modelo PDWM, cujo relê foi ajustado para



**Figura 3.** Estruturas metálicas adequadas ao suporte de um moinho de bolas. A) Suporte construído com tubos metálicos retangulares; B) Suporte construído com chapas dobradas; C) Perfil de chapa utilizada para a construção do suporte apresentado em B



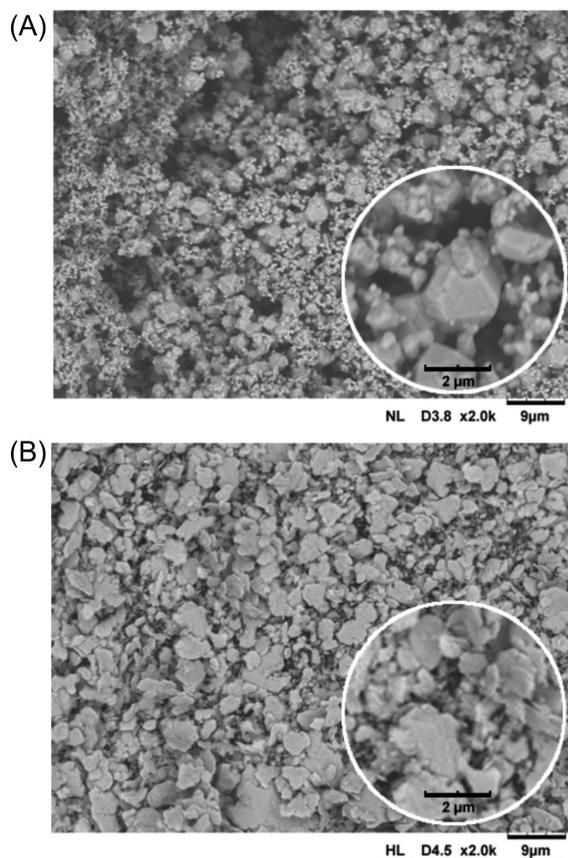
**Figura 4.** Moinho de bolas construído nas diretrizes propostas. A) Vista em perspectiva com detalhes para o motor e acionamento; B) Vista em perspectiva com detalhes para o sistema de transmissão/redução. O inserto apresenta o vaso com o meio de moagem

o desligamento acaso a corrente de pico ultrapassasse a 60% da faixa de trabalho. Assim, na eventualidade do eixo travar, o motor demandaria mais corrente e o sistema desarmaria evitando danos ao motor. A Figura 4 mostra o moinho com a montagem de todos os critérios supramencionados. A Figura 4B mostra o sistema completo, com o

vaso acoplado, e um inserto apresentando o vaso e as esferas, ambos de porcelana, preenchido com água, contendo o material a ser moído.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O equipamento confeccionado foi utilizado na moagem de prata metálica em pó, visando à obtenção de flocos de prata – principal matéria prima para o preparo de tintas condutoras de eletricidade, cuja área superficial é o advento tecnológico crítico. Nesta proposta inseriu-se 200 g de prata em pó (Figura 5A) produzida pela redução de sais de prata em solução, de granulometria inferior a 6 micrômetros. Os flocos obtidos (Figura 5B) após 24 h de moagem apresentaram área superficial média de 1,2541 m<sup>2</sup>/g e granulometria inferior à 15 µm, atingindo parâmetros adequados para aplicações tecnológicas.



**Figura 5.** Imagens de MEV com magnificação de 2000x, evidenciando a transformação morfológica do pó de prata micronizada (5A) e sua respectiva forma de floco (5B), após a moagem em via úmida, por 24h, empregando estearato de prata como lubrificante. Os insertos apresentam magnificação de 10.000x

O preparo do grafite em pó para a produção de nanoestruturas de carbono também mostrou-se interessante. Nesta aplicação, 300 g de grafite comercial de diâmetro médio de 100 µm foram submetidos à moagem por via úmida, por 12 h, resultando em partículas de diâmetro médio de 27 µm, conforme observado em análise granulométrica por difração laser em um granulômetro Malvern Mastersizer 2000, dispersas em água. Romero<sup>13</sup> relata que partículas de grafite inferiores a 40 µm são adequadas à obtenção fulerenos C<sub>60</sub> - C<sub>70</sub> e nanotubos de carbono de parede simples, por pirólise em plasma de hélio.

O moinho atende adequadamente às demandas laboratoriais, e já está em operação a mais de 2 anos, apresentando baixas margens de contaminação, robustez, alta qualidade, sendo sua construção de baixo custo e fácil manutenção.

## CONCLUSÃO

A construção de um moinho de bolas é possível de ser realizada a baixo custo de produção. O moinho produzido mostra-se adequado à redução granulométrica de diversos materiais sólidos, como os nanotubos de carbono. Sabe-se que moinhos deste tipo são eficientes misturados quando as esferas empregadas apresentam o mesmo tamanho.

A construção deste moinho pode ser direcionada a moagem de materiais específicos de alta dureza, sendo que este apresentado efetua moagens adequadas em materiais de dureza inferior a 6 mohs.

O trabalho pode ser aplicado também como diretriz ao preparo de aulas práticas no ensino de ciências dos materiais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à WEG equipamentos elétricos pelas valiosas informações cedidas para o desenvolvimento deste trabalho. Os autores também são gratos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e bolsas concedidas.

## REFERÊNCIAS

- Rubio, N.; Fabbro, C.; Herrero, M. A.; de la Hoz, A.; Meneghetti, M.; Fierro, J. L.; Prato, M.; Vázquez, E.; *Small* **2011**, 7, 665.
- Chen, Y. Em *Carbon Nanotechnology: Recent Developments in chemistry, physics, materials sciences and device applications*; Dai, L., ed.; Elsevier Science: Amsterdam, 2006, cap 3.
- Soni, P. R.; *Mechanical Alloying: Fundamentals and Applications*, 1<sup>st</sup> ed., Cambridge International Science Publishing: Cambridge, 2001.
- Bernhardt, F.; Trotzki, R.; Szuppa, T.; Stolle, A.; Ondruschka, B.; *Beilstein Journal of Organic Chemistry* **2010**, doi:10.3762/bjoc.6.7.
- Tullberg, E.; Peters, D.; Frejd, T.; *J. Organomet. Chem.* **2004**, 689, 3778.
- Rodríguez, B.; Bruckmann, A.; Bolm, C.; *Chem. Eur. J.* **2007**, 13, 4710.
- Dana, J.; Hurlbut, C.; *Manual de Mineralogia*, 1<sup>a</sup> ed., Livro Técnicos SA: Rio de Janeiro, 1969.
- <http://www.eastern.net.cn/Glass%20Beads.html>, acessada em Agosto 2013
- <http://www.hindustanglassbeads.com/products.htm>, acessada em Agosto 2013.
- Shackelford, J. F.; Alexander, W.; *CRC Materials Science and Engineering Handbook*, 7<sup>th</sup> ed., CRC Press: Boca Raton, 1991.
- [http://www.euro-inox.org/pdf/map/Tables\\_TechnicalProperties\\_EN.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf), acessada em Agosto 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17094: informação e documentação: referência – elaboração. Rio de Janeiro, 2000.
- Romero, J. G. V.; *Tese de Doutorado*, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2002.