



PROJETO DE UM MINI-MOINHO VIBRATÓRIO AUXILIADO POR TÉCNICAS DE METODOLOGIA DE PROJETO

Z.C. Silveira; R.C. Carvalho; B. M Purquerio; C.A. Fortulan

Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Centro, São Carlos – SP

CEP: 13566-590. E-mail: cfortula@sc.usp.br.

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos,

Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Compósitos.

RESUMO

Foi projetado um mini moinho vibratório, para múltiplos jarros auxiliados por técnicas de metodologia de projeto. Conformações de cerâmicas avançadas baseadas na compactação de pós, seguida de sinterização requerem partículas ultrafinas (abaixo de 1 micrometro). Foram considerados os requisitos de moagens simultâneas; pequenas quantidades de pós; com baixo consumo de energia; alta eficiência e praticidade de operação. Dessa forma, baseado em técnicas de metodologia de projeto, foi desenvolvido um procedimento para um projeto adaptativo de moinho vibratório. O moinho projetado é capaz de fazer moagem simultânea com até seis jarros com capacidade volumétrica individual total de 20 a 300ml. O projeto foi otimizado por análise de vibrações e planejamentos experimentais, e validado com moagens de alumina alfa, de diâmetro médio equivalente inicial de 5,2 micrometros analisadas por sedígrafo. Foram obtidos pós com diâmetro médio equivalente de 0,7 micrometros com fração de 18% abaixo de 0,2 micrometros.

Palavras chave: Cerâmica; moinhos; metodologia de projeto; moagem; otimização de moagem.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mercado mundial de componentes de cerâmica avançada tem apresentado um crescimento significativo, incluindo novas aplicações



no segmento industrial e na área de engenharia médica. Os processos de manufatura têm sido melhorados e o custo total dos produtos finais tem sido reduzido, implicando no aumento da dependência de matéria prima refinada. O Brasil é um país que se destaca em economia baseada no extrativismo de recursos minerais. Assim sendo, as atividades de processamento e manufatura desses materiais é uma forma significativa de se agregar valor ao produto final. A indústria cerâmica nacional voltada para a fabricação de pisos, revestimento cerâmicos, cerâmica elétrica e louças sanitárias apresenta forte participação no setor produtivo, o que a torna uma empresa com vantagem competitiva no cenário nacional e internacional. No setor de cerâmicas avançadas, diversas empresas vêm obtendo destaque e crescimento. A obtenção de pós-cerâmicos ultrafinos, para a fabricação de produtos de cerâmica avançada, em segmentos industriais e de bioengenharia, abrange outra importante área competitiva para a indústria nacional, frente às empresas multinacionais. Sob essa perspectiva, o objetivo desse trabalho é obter pós cerâmicos, em escala submicrométrica, para aplicações nas áreas de bioengenharia e industrial. Esse objetivo pode ser alcançado através da concepção, desenvolvimento e validação de um mini-moinho vibratório, através de um projeto adaptativo.

Cerâmica e processos de moagem

As cerâmicas avançadas podem ser classificadas como: cerâmica eletrônica, cerâmica estrutural, biocerâmicas e cerâmicas de revestimento. Essas cerâmicas são caracterizadas por elevado desempenho, obtidas a partir de matérias-primas sintéticas de alta pureza controladas por processos de precisão ^(6;9). O controle do tamanho e da distribuição granulométrica apresenta fundamental importância, na confiabilidade do produto final. A moagem se caracteriza pelo processo mecânico de redução do tamanho das partículas de um material sólido ou particulado, objetivando o aumento da superfície específica do material conseqüentemente aumentado sua reatividade. Partículas pequenas, com dimensões submicrométricas são necessárias em aplicações de cerâmica avançada, pois apresentam alta reatividade favorecendo a sinterização e garantindo elevada resistência mecânica do produto final. Wellenkamp (1999) ⁽⁷⁾ classifica as partículas cerâmicas em finas (inferior a 100µm) e ultrafinas (inferior a 10µm). Durante a moagem, os materiais

são simultânea e repetidamente, submetidos a tensões e atrito, que causam fraturas nas partículas. A distribuição de trincas nas partículas, sua propagação e a interação entre elas constituem fatos determinantes da redução do tamanho das partículas. Atualmente, não há um método de moagem amplamente utilizado que seja totalmente eficiente, para a produção de grandes quantidades de partículas, em proporção submicrométrica. Durante o processo de moagem, há um conjunto de variáveis críticas, que atuam diretamente na qualidade final do produto, como por exemplo, características da matéria-prima original; escolha do tipo de moinho; carregamento do moinho; formas de moagem; revestimento do moinho; tipo de moagem. A moagem pode ser classificada em dois grandes grupos: a moagem a seco e a moagem úmida. Os principais moinhos incluem o moinho de bolas, moinho de atrito, moinho vibratório e moinho a fluxo de energia. Dentre eles, o moinho vibratório é o que apresenta particular interesse.

Moinho vibratório

Em um moinho vibratório, uma vibração externa promove atrito e impacto, entre os elementos de moagem e o material a ser moído. Neste caso, é obtida uma distribuição do tamanho das partículas mais estreita do que o resultado obtido pelo moinho de bolas. O contato entre os elementos cilíndricos ocorre ao longo de uma linha, enquanto são usadas esferas, esse contato é feito pontualmente. A Figura 1 ilustra um moinho vibratório com vibração gerada por motor com contrapeso.

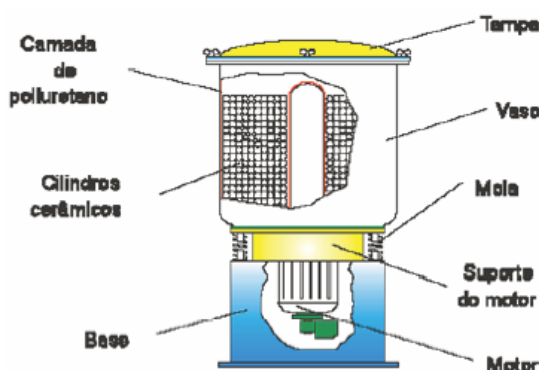


Figura 1 – Moinho vibratório ⁽³⁾.

Metodologia e projeto

A atividade de projeto atua como intersecção de atividades cultural e tecnológica abrangendo conhecimentos das ciências, engenharia, tecnologia, fabricação, *design*, economia, psicologia, política ⁽⁴⁾. O recente reconhecimento da



importância da metodologia e sistemática de projeto ou teoria de projeto ⁽⁴⁾ na concepção de produtos, sejam projetos alternativos, adaptativos ou inovadores se reflete em normas e diretrizes, como a VDI 2221 de 1985 e publicações da ASME em 1986, na *Mechanical Engineering*, na qual foram apresentadas recomendações e diretrizes, para o ensino e pesquisa na área. A literatura pertinente tem apresentado algumas propostas para abordagens sistemáticas ^(1;2;4;5) das atividades de projeto ou estratégias para a busca de soluções. De uma forma geral, apresentam pequenas variações e diferentes técnicas de solução de problemas, bem como o enfoque, ora mais técnico ^(1;4), ora mais organizacional ⁽⁸⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

A identificação da necessidade é a atividade que antecede qualquer projeto. Uma necessidade pode surgir de uma falha ou melhoria de produtos, ou inovação decorrente de avanços científico, tecnológico ou econômico ⁽⁴⁾. Para a proposta de um mini moinho vibratório, identificou-se que há falta de equipamentos nacionais capazes de moer partículas submicrométricas, principalmente em função da crescente demanda nas áreas de pesquisa com biomateriais e equipamentos de filtragem. As etapas de orientação, para o desenvolvimento e projeto do mini-moinho são apresentadas na Figura 2.

Reconhecimento da Necessidade

Grande parte dos laboratórios de pesquisa e desenvolvimento não possui equipamentos de moagem, principalmente para realizar a moagem de pós cerâmicos nessas dimensões, dificultando o andamento das pesquisas. Portanto, a necessidade se configurou em se obter um moinho vibratório, que comportasse jarros com baixa capacidade volumétrica (1 a 100g) de matéria-prima, com processamento múltiplo e simultâneo dos mesmos, para obtenção de pós em escala submicrométrica.

B) Definição do problema

O projeto foi classificado como sendo de cunho adaptativo ⁽⁴⁾, uma vez que o princípio de solução encontrado em projeto de moinhos vibratórios foi preservado. O



projeto do mini-moinho foi re-dimensionado e adaptado às novas condições de montagem e operação.



Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta.

Foi realizado um estudo inicial da viabilidade econômica e física, no qual foi levantado um custo inicial para a fabricação de um protótipo de um mini-moinho vibratório estimado em R\$ 6.500,00, valor compatível com os investimentos previstos em laboratórios de alta tecnologia. Esse valor incluiu a utilização de máquinas-ferramentas, mão-de-obra, materiais e ensaios experimentais.

C) Projeto Preliminar

O projeto proposto por Fortulan (1996) ⁽³⁾ foi utilizado como referência, para o pré-dimensionamento do mini-moinho. Da estrutura proposta, foram mantidas a base, o motor e o isolamento (molas) que foram redimensionados, com maior atenção ao suporte dos jarros. Como a principal diferença no mini moinho é a capacidade de produção de pós, o jarro único do moinho vibratório foi substituído por jarros de pequenas dimensões. Essa modificação permitiu a moagem simultânea de até seis jarros, com pequenas capacidades volumétricas. O esboço inicial do sistema é apresentado na Figura 3a. Para o projeto do jarro foram considerados: a espessura da parede, o revestimento interno, fechamento e sistema

de fixação no moinho. Um esboço do jarro é apresentado na Figura 3b. A vibração fornecida pelo motor é obtida pela adição de contra pesos, nas extremidades de seu eixo.

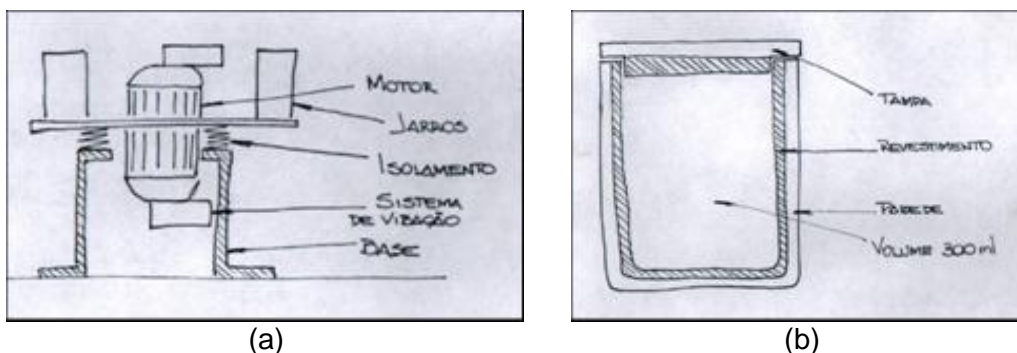


Figura 3 –Esboços: (a) mini moinho (b) jarros.

Nesta fase do projeto, técnicas sistemáticas de auxílio ao planejamento, busca e solução de problemas conceituais e técnicos são altamente indicadas. Cabe ressaltar que, o projeto preliminar responde a 90% das informações técnicas de um projeto referente a 10% do tempo total de todo o processo de projeto, porque se caracteriza pela fase de estudo do problema. Portanto, é uma etapa que demanda cuidado na exploração dos conjuntos de soluções viáveis. Inicialmente foi elaborada uma matriz de correlação para o sistema.

Características técnicas Necessidades dos usuários	Jarros e ped. dimensões	Polência do motor	Diferentes tam. jarros	Fixação de vários jarros	Fixação/Engate rápidos	Componentes padroniz.	Vibrações nos eixos	Material	Pouco espaço montagem	Sistema de fechamento jarros
Tamanho reduzido	●	●						●	●	
Baixo consumo de energia		●						●		
Alta eficiência de moagem	●		●				●			
Moagens simultâneas	●		●	●						
Facilidade de montagem do sistema					●	●				●
Facilidade de manutenção	●		●	●	●	●			●	●
Ciclos de vibração		●					●			
Peso reduzido		●						●	●	
Baixa contaminação			●					●		●
Fechamento/vedação dos jarros					●			●		●

Legenda:
 Correlação forte: ●
 Correlação moderada: ●
 Correlação fraca: —

Figura 4 – Matriz de correlação elaborada para o mini moinho vibratório.

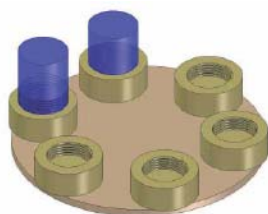
Dentre os usuários potenciais e a equipe de projeto, foram levantadas as principais necessidades dos usuários, e possíveis soluções técnicas, gerando uma matriz de correlação, apresentada na Figura 4. O resultado fornecido pela matriz

são os parâmetros de projeto de maior relevância, sob o ponto de vista dos usuários e de projeto. Sessões de *Brainstorming* foram realizadas com grupos multidisciplinares de estudo ao longo do desenvolvimento do projeto, focadas principalmente no sistema de fixação dos jarros e do sistema. Com os resultados obtidos foi elaborado um quadro morfológico (Figura 5), um método discursivo e portanto, mais organizado, no qual foi possível explorar e esgotar soluções de projeto, para cada parâmetro de projeto importante identificado com o *Brainstorming*. Tabelas considerando vantagens e desvantagens foram elaboradas, com o objetivo de refinar as soluções, considerando diversos aspectos de projeto, como por exemplo, processos de fabricação, custos, limitação física, peso e ergonomia. O quadro morfológico indicou uma solução, na qual é utilizado apenas um sistema de travamento para fixação dos três itens: base móvel, jarro e tampa.

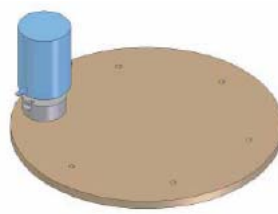
Parâmetro de Projeto	Soluções					
Material externo do jarro	Aço	Alumínio	Nylon	Cerâmica	Epoxi	
Material interno do jarro	Aço	Alumínio	Nylon	Cerâmica	Poliuretano	HDPE
Sistema de fixação da base	Rosca	"Liquidificador"	Magnético	Ventosas	"Marmita"	Cinta
Sistema de fixação da tampa	Rosca	Alça	Cônico	Grampo	Rolha	"Marmita"
Geometria	Cilíndrica alta	Cilíndrica regular	Prisma			
Processo de fabricação do jarro (externo)	Molde	Usinagem	Injeção	Fundição	Protótipo rápido	
Processo de fabricação do jarro (interno)	Prensagem isostática	Colagem de barbotina	Extrusão	Torneamento		

Figura 5 – Método morfológico aplicado para solução do sistema de fixação dos jarros no mini moinho.

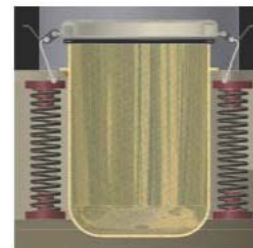
A Figura 6 ilustra algumas das alternativas levantadas para a fixação dos jarros na base.



(a)



(b)



(c)

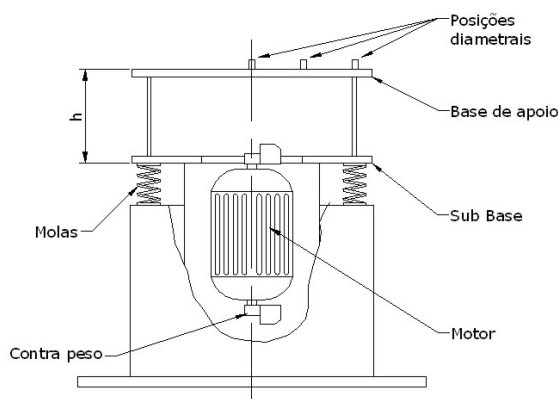
Figura 6 – Sistemas de fixação do jarro; (a) Rosca; (b) Engate rápido; (c) presilha tipo aplicada em "marmita".

D) Construção de um protótipo e ensaios experimentais

Com as informações adquiridas nos itens anteriores foi construído um protótipo do sistema, com o objetivo otimizar o processo de moagem. O protótipo e uma vista esquemática do mini moinho são apresentados na Figura 7. Os parâmetros de projeto considerados nesta avaliação foram: as posições diametrais do jarro de moagem, a frequência de rotação do motor, a altura da base de fixação dos jarros em relação à base vibratória e o número de molas na base do motor. Para a análise dinâmica foi utilizado um jarro maciço de alumínio, com massa correspondente à jarro carregado com mistura cerâmica. Inicialmente, foram identificadas as frequências naturais do sistema. Em seguida, com planejamentos fatoriais foram obtidas para cada combinação dos parâmetros, as amplitudes de vibração do jarro em quatro direções distintas (x , y , θ_x e θ_y). Esses ensaios tiveram como objetivo identificar a sensibilidade da resposta, em função da variação dos parâmetros de projeto pré-definidos.



(a)



(b)

Figura 7 – Protótipo do mini-moinho: (a) sistema físico e; (b) vista esquemática.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A) Avaliação de desempenho

Foi utilizado um motor com potência de 120W, com as seguintes especificações: motor trifásico, IP55W21 da WEG (220/380V), 60 Hz, considerando 4, 6 e 8 pólos. A vibração do motor foi obtida pela adição de contra pesos nas extremidades de seu eixo, sendo que a amplitude de vibração pôde ser variada pela adição ou remoção de massa dos seus contrapesos. Para cada moagem realizada, o material (Alumina da Alcan 5SG, com diâmetro inicial de 5.3 μm) foi analisado



obtendo-se uma distribuição do diâmetro esférico equivalente [μm] (Figura 10). Foram utilizados um moinho de bolas (MB) e o moinho vibratório (MV); 96h, tempo de moagem em horas e $N^\circ\text{mm}$, altura em mm da base suporte de jarros. A moagem obtida feita na altura de 38 mm do nível da base forneceu um pó com diâmetro externo de partícula igual a 2,05 μm posicionado a 100 mm da base; o diâmetro externo foi de 2,30 μm , e para a posição 200 mm, obteve-se o valor de 2,5 μm . Na busca por pós submicrométricos, a altura de 38 mm indicou melhores condições de eficiência de moagem, corroborando com os resultados da análise dinâmica e planejamentos fatoriais. Comparando com a moagem sobre rolos, na Figura 10, observa-se que o diâmetro externo obtido foi de 3,8 μm , muito superior ao vibratório. Essa condição indica sua baixa eficiência de moagem em pequenos diâmetros de jarro.

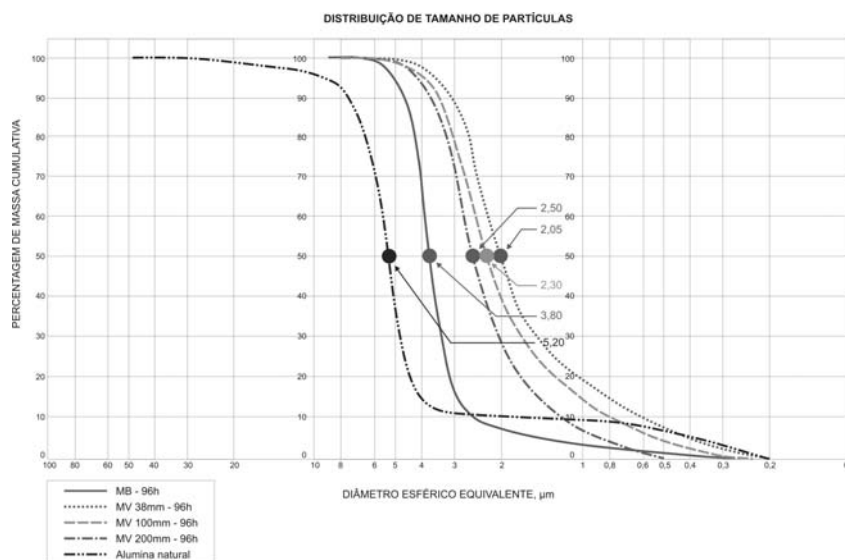


Figura 10 – Curva de moagem no mini moinho vibratório: Massa (%) x Diâmetro esférico equivalente (μm). MB

Otimização

Com o objetivo de se obter pós submicrométricos, foram realizadas uma série de moagens. Nos experimentos de otimização 01, elementos de moagem (130g de esferas 6.7mm) foram substituídos por 170g de esferas de zircônia de diâmetro de 3 mm, sendo o tempo moagem elevado para 120 horas. Foi adotada a posição inferior de 12 mm de altura, a partir do suporte dos jarros, porque a análise dinâmica e o planejamento experimental identificaram as maiores amplitudes de vibrações nesta posição. Com a substituição dos elementos de moagem, houve um aumento na área superficial dos elementos de 160% e um diâmetro médio equivalente igual a



1.6 μ m. Esse experimento forneceu 100% das partículas com valores inferiores a 3.5 μ m e superiores a 2.2 μ m, e 22% das partículas menores que 1 μ m (Figura 11 – MV12-20H-12). Nos experimentos de otimização 02, o experimento 01 foi repetido porém, com a remoção da base do suporte, eliminando-se 12 kg de peso adicional. Obteve-se um diâmetro médio equivalente igual a 1.15 μ m com 100% das partículas menores que 2.8 μ m e maiores que 0.2 μ m, sendo que 40% das partículas ficaram abaixo de 1 μ m. Com a remoção de peso no sistema, houve uma alteração significativa no processo de moagem (Figura 11 – MV12 – 120H). Em um último experimento (03), a massa dos contra pesos foi aumentada em 230g, individualmente, gerando um aumento de 43% na força centrípeta, que variou de 747N para 1070N, em cada extremidade do motor. A Figura 13 (MV12-120-01KN) apresenta o resultado deste incremento. Atingindo um diâmetro médio de 0.7 μ m das partículas, pode-se comprovar que o objetivo inicial do trabalho foi alcançado, uma vez que se trata da obtenção de pós submicrométricos. Obteve-se 100% das partículas abaixo de 2.2 μ m, e notadamente 23% abaixo de 0.2 μ m indicando a presença de uma considerável fração na escala nanométrica.

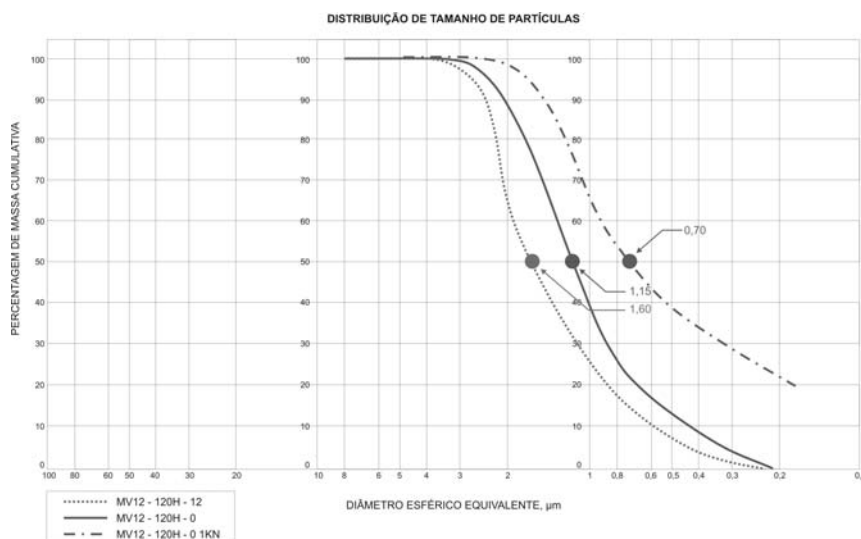


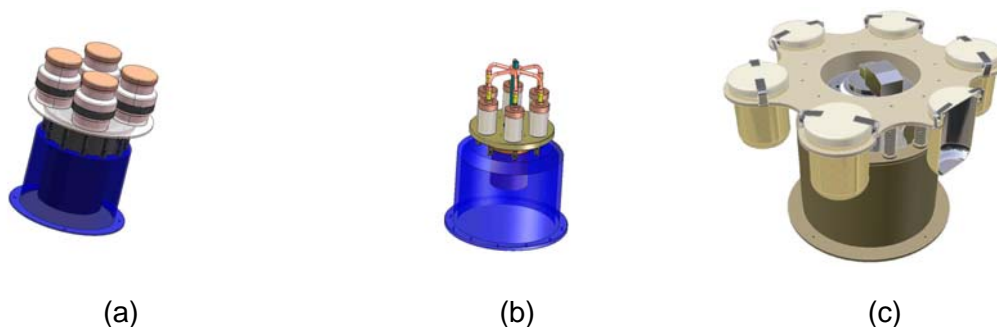
Figura 11 – Curva de moagem para o mini moinho vibratório: para 120 horas com os jarros posicionados na base inferior.

Projeto detalhado

As informações e respostas técnicas obtidas pelo Fluxograma proposto (Figura 3) baseado em técnicas de metodologia de projeto, geraram alternativas de projeto factíveis, para o projeto e construção de um protótipo de um mini-moinho vibratório,



capaz de fornecer pós cerâmicos em escala submicrométrica. A Figura 12 apresenta algumas soluções viáveis de projeto para o mini moinho vibratório.



(a) (b) (c)
Figura 12 – Projetos viáveis para o mini moinho vibratório.

CONCLUSÕES

A metodologia proposta foi capaz de fornecer as informações necessárias para orientar o desenvolvimento, o projeto e a construção do protótipo de um mini-moinho vibratório. As moagens resultaram em pós submicrométricos, em um moinho de fácil construção, manutenção e custo satisfatório. O processo de otimização da moagem, baseado nos resultados da análise dinâmica em conjunto com planejamentos experimentais, resultou em pós submicrométricos com tamanho médio equivalente de $0,7\mu\text{m}$. Foram obtidas ainda, 23% de partículas menores que $0,2\mu\text{m}$, evidenciando a presença de pós em escala nanométrica. A moagem por vibração teve um desempenho significativamente melhor, do que o resultado obtido pelo moinho de bolas. Nos experimentos comparativos de 96h, o resultado obtido pelo moinho de bolas resultou em um valor médio de $3,8\mu\text{m}$, comparado com o valor de $2,05\mu\text{m}$, obtido pelo moinho vibratório, sem otimização. No caso de moinho de bolas, a pequena altura de queda das partículas, em jarros de pequenas dimensões, não gera energia suficiente para fraturar as partículas. Por outro lado, a em moinhos vibratórios o processo de moagem ocorre, devido à força de impacto produzida pelo desbalanceamento de massas no motor elétrico, que mantêm a eficiência de moagem, para pequenos volumes de pós cerâmicos e metálicos.

AGRADECIMENTOS

À Fapesp e ao CNPq, pelo suporte fornecido para esse projeto, e ao Prof. Paulo Varoto, do Laboratório de Dinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos pelo fornecimento dos recursos necessários, para a realização dos ensaios dinâmicos do mini-moinho.



REFERÊNCIAS

1. N. Back *Metodologia de Projetos Industriais*. Ed. Guanabara Dois. (1983), p.1-60.
2. M. Baxter *Projeto de Produto*. Ed. Edgard Blücher. (2000), 260p.
3. C.A. Fortulan.; B.M. Purquerio Projeto e desempenho de um moinho vibratório para cerâmica avançada. In: *IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste*, (1996).
4. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen; K-H. Grote *Projeto na Engenharia*, Editora Edgard Blücher (Tradução da 6ª. Edição alemã). (2005), 412p.
5. M.M.A. Shabin Application of a systematic design methodology: an engineering case study. *Design studies*, vol.9, n.4, (1988), p. 202-207.
6. V. Smith et al Advanced ceramics: where do we go from here? *American Ceramic Society Bulletin*. vol. 73, n. 12, (1994), p. 49-52.
7. F-J. Wellenkamp *Moagens finas e ultrafinas de minerais industriais: uma revisão*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT (série Tecnologia mineral, 75). (1999) 56p. ISBN 85-7227-122-8.
8. www.numa.org.br (Acesso em Março/2007)
9. ABC, *Associação Brasileira de Cerâmica*. www.abceram.org. (Acesso em Dezembro de 2006).

DESIGN OF A MINI VIBRATORY MILL BASED ON DESIGN METHODOLOGY TECHNIQUES

ABSTRACT

It was designed a mini vibratory mill with multiple jars to obtain ceramic powder in sub micrometric scale. Advanced ceramic conformations obtained from powder compacted followed of sintering process require ultra thin particles (less than 1 micrometer). In this way, the parameters considered were: simultaneous mill; small quantity of powder; low power supply; high mill efficiency and operation easiness. Based on design methodology techniques, it was developed an adaptive design to vibratory mill. The mini vibratory mill can made simultaneous mill using until six jars with volumetric capacity from 20 to 300ml to each jar. The prototype was optimized considering dynamic analysis and design of experiments. The mill using alpha alumina particles with initial size on 5.2 micrometer were analyzed by sedigraph. After this optimization, ceramic powders were obtained with average size of the particles around 0.7 micrometers, with 18% of the particles under 0.2 micrometers.

Key-words: ceramic; milling; vibratory mill; design methodology; process optimization.