Roni Cesar de Carvalho

Projeto de um mini-moinho vibratório auxiliado por técnicas de metodologia de projeto

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan

São Carlos
2007

Aos meus pais,
Hideko e Dirceu, pelo amor,
compreensão, incentivo, paciência, e amparo
nos momentos mais duros de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Carlos A. Fortulan, orientador, pela amizade, apoio, companheirismo e incentivo no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Titular Benedito de Moraes Purquerio, pelas contribuições que enriqueceram o trabalho.

À Dra. Zilda de Castro Silveira, pela co-orientação em metodologia de projetos, planejamento estatístico de projeto e análise de vibrações.

Ao Professor Titular Paulo Sérgio Varoto e seus alunos Marcelo G. de Souza e Thiago R. Cicugna, por co-orientar e colocar a disposição sua equipe e equipamentos para análise das vibrações.

Aos amigos e companheiros

Alejandra, Amauri, Cassius, Cláudia, Henrique, Karen, Rodrigo, Rogério, Romeu, Thaís, Volnei;

Hitoshi, Paulo Amâncio, Paulo Ramos, Wagner;

Danilo Manzali e Vitor Fontana.

Aos meus pais, Hideko e Dirceu, meus irmãos, Carlos Renato e Reni, e à minha companheira Maria Alice.

Á Deus, por tornar possível a execução deste trabalho e estar presente a todo o momento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Moinho de bolas. (FORTULAN et al. 1995).....	31
Figura 2.2 – Seção de uma câmara de um moinho de atrito horizontal. BARTHEL et al. 1994	32
Figura 2.3 – Moinho vibratório. (FORTULAN et al. 1996).....	33
Figura 2.4 – (a) Corpo do projeto, em (b) Corpo do projeto envolvido por um projeto de produto específico (PUGH, 1995)	37
Figura 2.5 – Corpo de projeto com dados de métodos independentes disciplinares. (PUGH, 1995)	38
Figura 2.6 – Corpo do projeto com dados adicionais de fontes dependentes disciplinares e tecnológicas (PUGH, 1995).....	39
Figura 2.7 – Modelo ativo do “Total Design”. (PUGH, 1995)	40
Figura 2.8 – Legenda das etapas (BACK, 1990).....	40
Figura 2.9 – Viabilidade do projeto, fase I (BACK, 1990)	42
Figura 2.10 – Projeto preliminar, fase II. (BACK, 1990).....	43
Figura 2.11 – Projeto detalhado, fase III. (BACK, 1990).....	44
Figura 2.12 – Revisão do projeto, fase IV. (BACK, 1990).....	45
Figura 2.13 – Etapas do projeto incorporado. (PAHL; BEITZ, 1996)	49
Figura 2.14 – (a) Armação robusta; (b) Sistema de coordenação de projeto. (WHITFIELD, 1999)	50
Figura 2.15 – Fluxo de atividades de projeto. (SHAHIN, 1998)	51
Figura 2.16 – Processo de desenvolvimento de produtos industriais. Fonte: (http://www.numa.org.br ; ROZENFELD,H.,1997).....	53
Figura 2.17 – Modelo de referência da F.I.M. Etapas x Tempo. Fonte: www.numa.org.br	59
Figura 3.1 – Metodologia empregada no projeto do mini-moinho vibratório	70
Figura 3.2 – Metodologia de projeto estendida elaborada para a concepção e desenvolvimento de um mini-moinho vibratório	72
Figura 3.3 – Esquema de referência, para aquisição dos dados da análise dinâmica	77
Figura 3.4 – Jarro para moagem vibratória e sobre rolos feito em nylon	78
Figura 3.5 - Carregamento dos jarros, e (a) para moagem vibratória e em (b) para moagem em moinho de bolas.....	79
Figura 3.6 – Sedígrafo 5000 ET – Micromeritics	80

Figura 4.1 – Esboço inicial de um mini-moinho vibratório.....	84
Figura 4.2 – Idéia inicial do Jarro	85
Figura 4.3 - (a) molde interno em perspectiva, (b) corte total do molde interno.....	92
Figura 4.4 - Montagem comercial da “luva”.....	94
Figura 4.5 – fixação do jarro, a) rosca simples e com aplicação múltipla; em b) por pressão com mola e trava.....	96
Figura 4.6 - (a) sistema de fixação por engate rápido, (b) detalhe de fixação no jarro	97
Figura 4.7 - Fixação tipo presilha de marmitta, em (a) vista em detalhe e múltipla em (b) variação do tipo de presilha.....	97
Figura 4.8 – Fixação derivadas: (a) guia e trava impedem os movimentos do Jarro; (b) alternativa para travamento do Jarro – Outra versão de guia e trava.....	98
Figura 4.9 – Alternativa para travamento do Jarro com trava por base de mola.....	98
Figura 4.10 – Híbrido de presilha com assento cônico: em (a) jarro na base e em b) fixação da tampa, o jarro e a base, simultaneamente	99
Figura 4.11 – Fixação da tampa, jarro e base, simultaneamente através de presilhas, em (a) destaque individual e em (b) aplicações múltiplas	99
Figura 4.12 – (a) alternativa para o sistema único de travamento por meio de extensores, (b) alternativa para o sistema único de travamento por meio de presilhas tipo Marmitta	100
Figura 4.13 – Moinho protótipo considerado “banco de ensaios”.	101
Figura 4.14 - (a) concepção do molde em gesso, (b) desenho do núcleo para o molde de gesso	102
Figura 4.15 - Molde externo projetado e fabricado	102
Figura 4.16 - (a) molde de gesso sendo preenchido, (b) revestimento colado a verde antes do acabamento	103
Figura 5.1 – Moinho protótipo para instrumentação: em (a) com acelerômetros nas direções x e y; em (b) esquemático.....	104
Figura 5.2 – Variação dos picos de amplitudes de vibração em função das diferentes alturas da base.....	105
Figura 5.3 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para Massa (%) x diâmetro esférico equivalente (μm).....	109
Figura 5.4 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para 120 horas de moagem com jarros fixados na sub base.....	111
Figura 5.5 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para 120 horas de moagem com jarros fixados na sub base.....	112

Figura 5.6 - Ilustração do aumento do peso dos contrapesos do motor	113
Figura 5.7 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para 120 horas de moagem com jarros fixados na sub base.....	114
Figura 5.8 – Detalhamento da abertura da tampa do jarro	115
Figura 5.9 – Detalhamento da abertura das presilhas.....	116
Figura 5.10 – Detalhamento da abertura da tampa do jarro	116
Figura 5.11 – Detalhamento da fixação da campana protetora	117
Figura 5.12 – Corte frontal, exibindo todo interior.....	117
Figura 5.13 – Corte no jarro	118
Figura 5.14 – Perspectiva – Corte visualizando contrapeso inferior	119
Figura 5.15 – Vistas superior e frontal.....	120
Figura 5.16 – Perspectiva dos componentes em vista explodida	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Classificação dos moinhos quanto às moagens fina e ultrafina. (WELLEKAMP, 1999)	30
Tabela 3.1 - Tabela de correlação para o moinho vibratório	75
Tabela 4.1 – Elaboração do Quadro Morfológico para a concepção de múltiplos jarros para moinhos vibratórios.....	87
Tabela 4.2 - Quadro de Vantagens e desvantagens da geometria para os jarros	88
Tabela 4.3 – Quadro de Vantagens e desvantagens dos materiais selecionados para a fabricação da parte externa dos jarros.....	88
Tabela 4.4 - Quadro de Vantagens e desvantagens para o processo de fabricação do corpo externo do jarro.....	89
Tabela 4.5 – Quadro de Vantagens e desvantagens dos materiais selecionados para a fabricação da parte interna dos jarros.....	90
Tabela 4.6 - Quadro de Vantagens e desvantagens para o processo de fabricação do corpo interno do jarro.....	91
Tabela 4.7 - Quadro de Vantagens e desvantagens do sistema de fixação das tampas nos jarros	93
Tabela 4.8 – Quadro de Vantagens e desvantagens do sistema de fixação dos jarros na base do moinho vibratório	95
Tabela 5.1 – Parâmetros de entrada e os níveis pré-definidos.....	106
Tabela 5.2 – Matriz experimental para avaliação das respostas dinâmicas do mini-moinho vibratório	107

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Motivação	19
1.2. Objetivos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Materiais cerâmicos	22
2.2. Processos de moagem de pós cerâmicos	25
2.2.1. Tipos de moagem quanto ao meio.....	26
2.2.2. Moagem por processo de impacto e atrito	27
2.2.3. Moagens a fluxo de energia.....	29
2.3. Tipos de moinho	29
2.3.1. Moinho de bolas	30
2.3.2. Moinho de atrito	31
2.4. Moinho vibratório	32
2.5. Projeto e metodologia	34
2.6. Considerações sobre a visão global do processo do projeto	51
2.6.1. Desenvolvimento do projeto como visão de negócio.....	52
2.7. Tendências: novas filosofias e ferramentas comparativas de apoio ao processo de projeto	53
2.7.1. CAD/CAE/CAM.....	55
2.7.2. Engenharia simultânea	57
2.8. Técnicas de criatividade para métodos de busca de solução e análise para processo de projeto	60
2.9. Considerações sobre o Planejamento Experimental	66
3. METODOLOGIA	70
3.1. Tarefas de trabalho	71
3.2. Métodos de busca de soluções para o sistema Mini-Moinho Vibratório	74
3.3. Análise de vibração	75
3.3.1. Descrição do sistema.....	76
3.4. Análise experimental de moagem	77
3.4.1. Carregamento dos jarros	78
3.4.2. Análise do tamanho de partículas	79
4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO MINI-MOINHO VIBRATÓRIO	82
4.1. Identificação da necessidade	82

4.2.	Estudo da viabilidade física e econômica	83
4.3.	Concepção do mini-moinho e jarros	83
4.3.1.	Concepção do mini-moinho - geral	83
4.3.2.	Concepção dos jarros	84
4.3.3.	Sistema de fixação da tampa do jarro	92
4.3.4.	Sistema de fixação do jarro na base do moinho.....	94
4.4.	Projeto preliminar.....	100
4.4.1.	Construção de um protótipo	100
4.4.2.	Fabricação do revestimento interno do Jarro	101
5.	RESULTADOS.....	104
5.1.	Análise Dinâmica.....	104
5.2.	Montagem da matriz experimental e aquisição dos dados	106
5.3.	Ensaio e resultados de moagem	108
5.3.1.	Otimização.....	110
5.4.	Projeto definitivo detalhado.....	114
6.	CONCLUSÕES	122
	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

RESUMO

CARVALHO, R. C., Projeto de um mini-moinho vibratório auxiliado por técnicas de metodologia de projeto. São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 130p.

Concepção, desenvolvimento de projeto e fabricação de um mini-moinho vibratório para cerâmica avançada. Diversas áreas de engenharia são hoje dependentes de componentes de cerâmica avançada. A conformação da cerâmica, baseada na compactação de pós, seguida de sinterização, tem encontrado diversas aplicações em processos de manufatura dos produtos cerâmicos avançados. Tamanhos de partículas pequenas (abaixo de $1\ \mu\text{m}$) e controle da distribuição granulométrica são desejáveis, porque aumentam a reatividade das partículas cerâmicas. O presente projeto busca pela concepção de um moinho que processe pequena quantidade de material em múltipla moagem no atendimento das necessidades de ambientes de trabalho de desenvolvimento e fabricação de peças especiais tais como os laboratórios e indústrias de pequeno porte. Normalmente os moinhos encontrados no mercado são para escalas maiores e moagem simples. Dessa forma, baseado em técnicas de metodologia de projeto, principalmente na busca de soluções para a concepção e desenvolvimento, tanto do sistema “moinho vibratório”, quanto dos jarros, procurou-se desenvolver um procedimento para um projeto adaptativo de moinho vibratório. Foi projetado e construído um moinho para moagem simultânea de seis jarros com volume útil de moagem de 20 a 300 ml em cada jarro. Foram realizadas moagens de alumina de tamanho médio inicial de $5,2\ \mu\text{m}$ as quais foram analisadas em sedígrafo. Foram obtidos pós com $0,7\ \mu\text{m}$ de diâmetro médio equivalente e pós com 18% abaixo de $0,2\ \mu\text{m}$.

Palavras chave: Cerâmica; metodologia de projeto; moagem; moinho vibratório; ensaios de vibrações.

ABSTRACT

CARVALHO, R. C.,. Project of a vibratory mini-mill aided by techniques of project methodology. São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 130p.

Conception, project development and manufacture of a vibratory mini-mill for advanced ceramics. Diverse areas of engineering today are dependent on advanced ceramic components. The ceramic conformation, based on powder compaction, and followed by sintering, has been found to have many different applications in manufacturing process in advanced ceramic products. Small size particles (below 1 μm) and the control of particle size distribution are desirable, as they increase the reactivity of ceramic particles. The present project involves a search for the conception of a mill that process simal amounts of material in multiple milling to meet the requirements of research laboratories and small industries. Normally the mills available on the market are for larger scale and simple, milling. Therefore based on techniques of project methodology, mainly in brainstorming for conception and development, not only on the "vibratory mill system" but also on the jars, it was developed a procedure for an adaptable project for a vibratory mill. A mill for the simultaneous milling of six jars with milling volume from 20 to 300 ml on each jar was projected and built. Alumina with medium particle size of 5.2 μm , were milled using the "vibratory mill system" and analyzed by sedigraph. After milling the particles had an average diameter of 0.7 μm with 18% of the particles below 0.2 μm .

Words key: ceramic; project methodology; milling; vibratory mill; vibrations analyses.

1. INTRODUÇÃO

O mercado mundial de componentes de cerâmicas avançadas continua a crescer e muitas novas aplicações têm sido desenvolvidas nas diferentes áreas industriais. Muitas mudanças têm ocorrido na indústria de cerâmicas avançadas, os processos de manufatura têm sido melhorados, e conseqüentemente o custo total nos produtos finais tem sido reduzido. Entretanto, os custos elevados atribuídos aos produtos obtidos com cerâmicas avançadas, tanto na área industrial, quanto de pesquisa, incluem a etapa do processo de moagem de quantidade pequenas de pós cerâmicos considerando que hoje, ofertas de material cerâmico submicrométricos atentam na faixa de 1 a 10g. Essas quantidades reduzidas, feitas individualmente, implicam na redução da eficiência de moagem com moinho de bolas, devido ao baixo impacto em função de seu diâmetro reduzido. Produtos manufaturados com cerâmicas avançadas ou estruturais possuem uma série de vantagens e algumas limitações inerentes ao material, dentre as características mais importantes, podem ser citadas suas elevadas resistências à compressão, baixas condutividades térmica, altas dureza, manutenção das resistências mecânicas às altas temperaturas e biocompatibilidade. Sendo a maioria das cerâmicas, materiais inertes, podendo ser utilizadas para aplicações em ambientes mais agressivos, normalmente relacionadas com dificuldades e alto custo de manutenção. Com essas características, os materiais cerâmicos podem ser utilizados desde produtos industriais até materiais bio-cerâmicos.

O Brasil é um país que tem forte economia baseada no extrativismo de recursos minerais, portanto torna-se muito oportuno quando se agrega valores a estes materiais com os processos manufatura, pois a geração de emprego acaba sendo a maior

conquista. Em alguns casos, a moagem de cerâmicas pode agregar alto valor estratégico, pois como exemplo, os materiais cerâmicos com dimensões submicrométricas têm seus valores magnificados por cerca de uma ordem de grandeza e quando estão em escala nanométrica estima-se até 3 ordens de grandeza na mesma pureza.

A Indústria Cerâmica Brasileira, no sub-setor de pisos, revestimentos, cerâmicas elétricas e louças sanitárias, é muito vigorosa, fazendo que esta seja uma das vantagens competitivas do país. No sub-setor de cerâmicas avançadas, diversas empresas vêm obtendo destaque e crescimento, considerando que a obtenção de pós cerâmicos ultrafinos certamente pode ajudar este sub-setor a integrar a vantagem competitiva do país no setor cerâmico.

1.1. Motivação

O histórico do Laboratório de Tribologia e Compósitos (LTC/EESC/USP), fortemente ligado ao desenvolvimento, projeto e fabricação de máquinas especiais e máquinas ferramentais, e em continuidade à pesquisa de materiais cerâmicos industriais e bio-compatíveis, forma a motivação principal deste trabalho. O foco é a investigação do processamento de produtos de cerâmica avançada aplicáveis à engenharia, atender às necessidades de laboratórios de Pesquisa e Desenvolvimento de centros de pesquisa, e pequenas e médias empresas e produzir pós cerâmicos em pequenas quantidades. Essa investigação incorpora teorias de metodologia de projeto e o projeto adaptativo de um moinho vibratório, com tamanho reduzido para aplicação de pequenas quantidades na formação de pós.

1.2. Objetivos

Desenvolvimento de um mini-moinho vibratório que possibilite a sua obtenção a um custo baixo com tecnologia totalmente nacional.

Estudo de técnicas em Metodologia de Projeto e suas aplicações na concepção, desenvolvimento e projeto detalhado de um mini-moinho vibratório.

Moagem de pós cerâmicos, em pequenas quantidades, de tamanhos sub-micrométricos em uma distribuição estreita de partículas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais cerâmicos

A cerâmica é uma classe de materiais que acompanha o homem desde os primórdios da civilização. Após a Era das cavernas, o homem se tornou agricultor e para tanto necessitou de abrigos e ferramentas que armazenassem líquidos e alimentos. As vasilhas tinham que ser resistentes ao uso, impermeáveis a umidade e de fácil fabricação [Acertubos]. Essas facilidades para confecção de vasilhas foram encontradas na argila que foi aplicada para a fabricação de diversos artefatos. A partir desse momento iniciou-se um novo processo no qual se utilizava a argila para outros fins. A capacidade da argila de ser moldada quando misturada em proporção correta de água, e de enrijecer após a queima, permitiu que ela fosse utilizada na construção de casas, de vasilhames para uso doméstico e armazenamento de alimentos, vinhos, óleos, perfumes, na construção de urnas funerárias e até como base para a escrita. Todas essas inúmeras aplicações são marcos da Arqueologia que estuda a história das civilizações baseada em fragmentos desses utensílios.

A ABC (Associação Brasileira de Cerâmica) afirma que o setor cerâmico é amplo e heterogêneo, e se divide em sub-setores, levados em conta a matéria-prima, propriedades e áreas de utilização das cerâmicas e assim classifica-as como cerâmica

vermelha, materiais de revestimento, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro, cimento, cal e cerâmica avançada.

Cerâmicas vermelhas são aquelas que apresentam coloração avermelhada como tijolos, telhas e argila.

Materiais de revestimento são materiais em formas de placas, usados na construção civil, como azulejo, porcelanato, lajota, entre outros.

Cerâmicas brancas compreendem materiais de corpo branco e recoberto por uma camada vítrea transparente e incolor, necessárias por razões estéticas ou técnicas. São subdivididas em louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos, cerâmica artística e cerâmica técnica.

Materiais refratários são os produtos cerâmicos que têm como principal característica suportar altas temperaturas nas condições específicas de processo e operação de equipamentos industriais, além de esforços mecânicos, químicos e variações bruscas de temperatura.

Isolantes térmicos podem ser classificados em materiais refratários isolantes, isolantes térmicos não-refratários, e fibras ou lãs cerâmicas.

Fritas e corantes são segmentos cerâmicos que conferem algum acabamento. Fritas (ou vidrado fritado) se dá a partir da fusão da mistura de diferentes vidros moídos. Corantes constituem-se de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos.

Abrasivos utilizam matéria-prima e processos semelhante aos da indústria cerâmica, como o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício.

Vidro, cimento e cal são segmentos muitas vezes não considerados como integrantes da família da cerâmica.

Cerâmicas avançadas são as cerâmicas de qualidade elevada, desenvolvidas a partir de matérias-primas sintéticas de alta pureza e por meio de processos rigorosos (ABC,2005).

Smith (1994) classifica as cerâmicas avançadas em quatro áreas: cerâmica eletrônica, cerâmica estrutural, compósitos e revestimento de cerâmica.

As cerâmicas estruturais são aquelas sujeitas a elevadas solicitações e incluem os componentes sujeitos ao desgaste, os componentes de bombas e válvulas, componentes de motores automotivos, as ferramentas e matrizes de corte e os componentes biomédicos.

As cerâmicas eletrônicas incluem os substratos e suportes para semicondutores, capacitores, piezoelétricos, resistores e termo-resistores.

Os compósitos de matriz cerâmica e matriz metálica são os mais novos segmentos nas famílias dos materiais avançados. Nas cerâmicas estruturais se encontra os micro-compósitos e os nano-compósitos, o hibridismo entre micro e nano-compósitos tem sido como um novo conceito em desenvolvimento de cerâmicas super-resistentes e supertenazes.

Os recobrimentos cerâmicos, ainda que grande parte de suas aplicações sejam empregadas como soluções provisórias para superar as deficiências das cerâmicas monolíticas, têm desenvolvido seu próprio segmento de mercado e se destacam nesta década como uma das mais crescentes áreas de aplicação.

Nas quatro áreas da cerâmica avançada o controle do tamanho e da distribuição granulométrica apresenta fundamental importância no sucesso e desempenho dos produtos. Em função do método de conformação e do produto selecionado, o tamanho de partículas e o controle da distribuição granulométrica são desejáveis. Partículas pequenas, com tamanho menor que um micrômetro ($1\ \mu\text{m}$), são necessárias para aplicações de cerâmica avançada, pois apresentam alta reatividade favorecendo a sinterização, garantindo a elevada resistência mecânica do produto final. Vários tipos de moinhos são empregados na obtenção de pequenas partículas cerâmicas. Dentre eles o moinho vibratório é o que apresenta particular interesse, pois possibilita a obtenção de uma distribuição granulométrica mais estreita e um tamanho médio de partículas relativamente menor que o moinho de bolas (WANG, 1976).

2.2. Processos de moagem de pós cerâmicos

Quanto ao tamanho, Wellenkamp (1999) classifica as partículas cerâmicas em finas (menor que $100\mu\text{m}$) e ultrafinas (menor que $10\mu\text{m}$). Para o processamento de cerâmicas avançadas são empregadas partículas de diâmetros médios de um micrômetro ou menores, onde são tomadas como medida o diâmetro esférico equivalente, calculados em medidas de área de superfície ou por microscópio eletrônico. Isto infere áreas de superfície maior que $1\text{m}^2/\text{g}$ para partículas esféricas de $D=6/A\rho$ onde:

D = diâmetro [μm]

A = área de superfície [m^2/g]

ρ = densidade [g/cm^3]

Grandes quantidades de pós de elevada área superficial e pequeno tamanho de partículas são hoje produzidas comercialmente. Alumina, carbetos de silício, sílica e titânia são produzidos em centenas de milhares de toneladas todo ano. Cada material tem exigência única para produção econômica e freqüentemente a morfologia de partícula ou impurezas é influenciada pelo processo industrial que pode não ser adequado às necessidades gerais dos produtos finais. (WANG, 1976).

Idealmente, se os materiais de uma composição desejada pudessem ser instantaneamente reduzidos para tamanhos submicrométricos por um simples processo de moagem, muitos outros processos complexos de preparação química seriam desnecessários. Moagem por atrito, impacto e outros processos de redução de tamanho (como atomização do líquido) são empregados. Infelizmente nenhum método de moagem utilizado é totalmente eficiente, nem apropriado a produzir pequenas quantidades de partículas na proporção submicrométrica. Várias técnicas, clássicas e recentes, merecem menção para este propósito, e muitas técnicas de moagem convencionais podem ser capazes de produzir partículas em torno de $0,1$ a $1\mu\text{m}$ em laboratório ou mesmo em processo industrial.

Entende-se por moagem, um processo no qual o tamanho das partículas de um material sólido é reduzido, objetivando-se o aumento da superfície específica desse material sólido, a obtenção de uma mistura mais homogênea e de contato mais íntimo entre os diferentes materiais de uma composição. A moagem tem um papel importante no processamento de pós finos e quimicamente homogêneos, pois é através deste processo que se torna possível a obtenção de novos materiais com propriedades melhoradas. (RIBEIRO, 2001).

Durante a moagem, os materiais são simultânea e repetidamente submetidos à aplicação de tensões e ao atrito, onde ocorrem várias fraturas nas partículas. A distribuição de trincas nas partículas, sua propagação e a interação entre elas constituem fatos determinantes da redução do tamanho delas.

O processo de moagem consiste dos seguintes estágios:

Redução do tamanho de agregados por moagem;

Fratura de partículas individuais, formação de defeitos e mudanças internas nas partículas durante moagens longas;

Reaglomeração durante períodos muito longos de moagem.

No processo de moagem, existem variáveis críticas caracterizadas como: matéria-prima original e ações de moagem; tipo de moinho; carregamento do moinho; meios de moagem; revestimento do moinho; tipo de moagem.

2.2.1. Tipos de moagem quanto ao meio

Processos de moagem são também classificados quanto ao meio: em moagem a seco e moagem a úmido. Na moagem a seco têm-se como meio de moagem os elementos de moagem (tais como as esferas e cilindros), os materiais da composição e eventuais aditivos químicos como lubrificantes; há, porém um forte atrito que causa o desgaste dos elementos de moagem e revestimento do moinho e um forte atrativo econômico, pois se evita a dispendiosa etapa posterior de secagem. Na moagem a úmido, incorpora-se ao meio

uma quantidade de líquido (30 a 70 vol%) que promove a obtenção de uma suspensão. A viscosidade e a concentração do líquido são fatores importantes neste processo de moagem. Em baixas viscosidades, a abrasão se acentua, diminuindo a vida útil dos elementos de moagem, assim como a do revestimento dos jarros. O tipo de líquido usado na moagem depende da sua reatividade química com relação ao revestimento do jarro, meio de moagem e o material cerâmico. O meio líquido mais utilizado para obtenção de uma suspensão é a água.

2.2.2. Moagem por processo de impacto e atrito

Para partículas abaixo de 10 μm , os processos de moagem são notavelmente ineficientes. Esta ineficiência se dá principalmente devido à tendência à re-aglomeração das partículas pequenas com baixa pressão de compactação, mas a grande área superficial das partículas pequenas e a inabilidade para se concentrar a energia de fraturas em um número pequeno de partículas contribuem significativamente à ineficiência. (WANG, 1976).

Bolas e moinhos de barras são extensamente usados para redução de tamanho de partículas. Uma grande variedade de elementos de moagem é usada para bolas ou barras. Os materiais preferenciais são os densos, duros de alta massa específica. A alumina, aço, zircônia estão entre os mais comuns, entretanto podem ser usados pedaços de sílica natural (seixos), e outros meios especializados como carbeto de silício ou específicos para aplicação onde há necessita-se baixa contaminação ou contaminação nula.

Nos moinhos de bola ou barras, a velocidade de giro do jarro tem uma importância significativa na eficiência de moagem. Numa velocidade otimizada, ocasiona impactos entre os elementos de moagem (similar a uma cascata) com o meio de moagem. Numa rotação muito inferior resulta em moagens lentas e com tendência ao acúmulo e escorregamento na parte inferior do moinho. Numa rotação muito acima, causa ao meio, uma força centrífuga, onde induz a “colagem” do meio nas paredes do moinho, não havendo impacto e, portanto perda significativa da eficiência de moagem. Para pequenos moinhos (em escala

laboratorial) o diâmetro do pó também afeta a otimização da velocidade de rotação. A relação entre a velocidade e a rotação de moagem tem sido estudada com vários materiais. Pode-se substituir a rotação por vibração, que se trata de um moinho vibratório, onde muito mais impactos por segundo podem ser conseguidos. Estima-se para este moinho, um número de impactos uma ordem de magnitude superior. Uma quantidade similar de pós também pode ser produzida em um moinho vibratório. Devido ao surgimento de pós-aglomerados que limita a eficiência de moagem são geralmente introduzidos aditivos orgânicos auxiliares de moagem como lubrificantes, defloculantes e outros.

Recentes desenvolvimentos em moagens para tamanhos submicrométricos (SADIER et al., 1975) incluem dispositivos de moagem que consistem em uma câmara estacionária e um eixo móvel com barras verticais rotacionadas através do meio de moagem, o moinho de atrito. O meio de moagem normalmente consiste em uma suspensão entre meios de moagem. São informadas reduções de tamanho notáveis (SADIER et al., 1975) embora as maiores das medidas sejam apresentadas como área superficial não como tamanho de partículas. Áreas superficiais equivalentes ao diâmetro esférico de $0,1\ \mu\text{m}$ de foram obtidos com 2 horas de moagem de atrito, comparadas a 30 horas de moagem por vibração, enquanto que uma moagem de bolas convencionais obtém-se apenas $4\ \mu\text{m}$ de tamanho de partícula em 30 horas. Nessa tal moagem intensiva com água como meio líquido, algumas hidratações na superfície de partícula de óxido podem ser esperadas, através da classificação das partículas empacotadas e sinterizadas que é similar aos outros pós submicrométricos. Uma vantagem dessa técnica (ou qualquer técnica de atrito) está na habilidade de produzir partículas submicrométricas de composições difíceis de prepararem em outras técnicas. ZrO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 e outros materiais que são convertidos à pós em poucas horas de moagem. Grãos médios a grossos são introduzidos na moagem, algumas partículas comparativamente maiores aos outros processos podem ser introduzidas. O problema da contaminação também deve ser considerado, pois o desgaste das barras e da parede câmara é pronunciado.

2.2.3. Moagens a fluxo de energia

São moinhos nos quais as partículas são pressurizadas em um fluido (líquido ou gás) que são submetidas ao auto-cisalhamento ou são lançados na forma de jatos um contra o outro.

Projetos em larga escala são usados para moagem de pigmentos e outras partículas de materiais finos como a sílica gel. Jatos tangenciais injetam uma alta pressão de gás na qual rapidamente se expandem, causando impactos entre as partículas em alta velocidade. A eficiência de moagem é alta, abaixo de 10 μm e a contaminação é mínima desde que a maioria das colisões aconteça no fluxo de gás e não contra a parede do moinho.

Em um moinho de fluxo de energia, a preparação da partícula é sempre um problema, porque partículas muito finas são difíceis de colidirem, devido à seu pequeno volume. Volumes grandes de gases são empregados, ciclones são ineficientes para a separação das partículas de tamanhos micrométricos. Fluxos aquosos em alta pressão ou ar comprimido são fluídos típicos para este tipo de moagem. Quando são empregados fluxos aquosos as pequenas partículas de óxidos tendem a se hidratar a menos que estas sejam removidas do fluxo rapidamente. (WANG, 1976).

2.3. Tipos de moinho

Existem vários tipos de moinhos para moagem de cerâmica fina ($< 100\mu\text{m}$) e ultrafina ($< 10\mu\text{m}$) segundo Wellekamp (1999), Tabela 1. Sendo que os mais comumente empregados nas indústrias e laboratórios de cerâmica avançada, que geralmente processam materiais com tamanhos iniciais menores que $10\mu\text{m}$ são os: moinho de bolas, moinho vibratório e moinho de atrito. [www.quimica.com.br/revista]

Tabela 1. Classificação dos moinhos quanto às moagens fina e ultrafina. (WELLEKAMP, 1999).

Moinho Esforço	Pressão	Arraste	Impacto	Choque	Granulometria*	Ambiente
Moinhos com Meio Moedor						
a) moinhos cilíndricos		x	x		fina	seco/úmido
b) moinhos vibratórios		x	x		fina	seco/úmido
c) moinhos planetários	x	x			ultrafina	seco/úmido
d) moinhos de atrição		x			ultrafina	úmido
Moinhos de Choque						
1. Moinhos com rotor						
a) moinhos universais				x	fina	seco
b) moinhos de pinos				x	ultrafina	seco
c) moinhos de rotor				x	ultrafina	seco
2. Moinhos a jato						
a) oval				x	ultrafina	seco
b) espiral				x	ultrafina	seco
c) contra fluxo				x	ultrafina	seco
Moinhos de Rolos Verticais	x	x			fina	seco
Moinhos de R. de Alta Pressão	x				fina	seco

2.3.1. Moinho de bolas

Também conhecido como moinho Alsing [RIBEIRO, 2001] consiste basicamente num cilindro rotativo fechado nas extremidades, carregado até pouco mais da metade do volume (~55 vol%) com bolas de cerâmica e material em processo. O processo de moagem se dá pelo efeito de cascata das bolas, onde ocorrem ações de cisalhamento e choque. A Figura 2.1 ilustra um moinho de bolas. Há variações do moinho de bolas como o moinho de jarros que se trata do emprego de um jarro carregado sobre rolos girantes e moinho contínuo.

Figura 2.1 – Moinho de bolas. (FORTULAN, 1995)

2.3.2. Moinho de atrito

Concebido em 1920 por *Andrew Szegvari* que gerou na fundação da empresa *Union Process Inc.* em 1946. Trata-se fundamentalmente de uma câmara que contém um eixo árvore composta por braços de aço (revestidos ou não em material cerâmico) e elementos de moagem. O giro do eixo árvore impõe o movimento com alto atrito entre os elementos de moagem, braços e material de moagem. Há três tipos básicos de moinhos de atrito: por batelada, por moagem contínua e por circulação, podendo ser fabricado nas posições horizontal ou vertical. A Figura 2.2 apresenta uma seção de uma câmara de um moinho de atrito. (SZEGVARI, 1994, BARTHEL et al. 1994).

Figura 2.2 – Seção de uma câmara de um moinho de atrito horizontal. BARTHEL et al. 1994

2.4. Moinho vibratório

Neste equipamento uma vibração externa promove a ocorrência de atrito e impacto entre os elementos de moagem e o material a ser moído. Predominantemente empregam-se cilindros como elemento de moagem, e neste caso obtém-se uma distribuição do tamanho das partículas que é mais estreita que no moinho de bolas, isto é devido ao contato nos cilindros ocorrer em uma linha e nas esferas em um ponto. A Figura 2.3 ilustra um moinho vibratório com vibração gerada por motor com contrapeso.

Figura 2.3 – Moinho vibratório. (FORTULAN, 1996)

Revestimento

Os vasos podem ser revestidos de vários materiais, dependendo do desgaste, tipo de contaminação e eficiência da montagem, como poliuretano, aço inox, tijolos cerâmicos, alumina de alta densidade, borracha vulcanizada, porcelana, etc. O material quimicamente ideal é aquele que possui a mesma composição do material a ser moído.

Cada vaso do mini-moinho vibratório possui a superfície interna com cantos curvos e arredondados que favorece o movimento dos materiais em processo e evita a indesejável sedimentação e acúmulo de material.

Dentre as opções para revestimento, o elastômero de poliuretano é um dos mais favoráveis devido à sua polimerização ocorrer em temperaturas inferiores à 100°C e à pressão atmosférica. Isso permite a obtenção de um revestimento de forma simples sem o emprego de moldes complexos.

Nas condições típicas de moagem, o poliuretano é muito resistente ao desgaste por abrasão. Eventual desgaste pode ser ainda tolerado devido à sua decomposição orgânica durante a sinterização.

Estrutura

A estrutura tem por função atribuir a rigidez necessária ao funcionamento projetado do moinho, assim como comportar as molas de vibração do moinho e permitir a fixação à uma superfície. A estrutura é composta de: flange da base, tambor externo, flange inferior, suporte inferior, flange do motor, caixa do motor, flange superior, suporte superior e suporte de molas.

Ainda poderá ser incorporado entre o suporte para molas e os flanges, um grampo para as molas, mas não se considera na primeira montagem do moinho.

Motor

O sistema vibratório mais empregado é obtido a partir de um motor elétrico. A vibração pelo motor é obtida pela adição de contrapesos nas extremidades de seu eixo. A amplitude de vibração pode ser variada pela adição ou remoção de massa dos seus contrapesos.

Vasos de moagem

Os vasos de moagem têm a função de comportar o material cerâmico a ser processado na operação de moagem. Cada vaso é composto de tampa, borracha de vedação e tambor. É constituído de aço ABNT1020 com revestimento interno de poliuretano, com vedação de borracha vulcanizada.

2.5. Projeto e metodologia

As necessidades humanas exigem soluções que estão diretamente ligadas ao projeto de engenharia, e a relação engenharia/projeto é forte. Ao se analisarem a solução encontrada para essas necessidades, observa-se que a diferença entre os objetivos de um projeto de engenharia dos demais está na sua extensão de contribuição dos fatores tecnológicos utilizados na sua elaboração. Os projetos são divididos em etapas, conforme

desenvolvidos, numa determinada ordem cronológica de atividades, (ASIMOW, 1962). Atualmente, os produtos são desenvolvidos de forma multidisciplinar, envolvendo fatores de diversas naturezas, e pessoas com diferentes conhecimentos e habilidades, o que torna a metodologia de projeto essencial para o desenvolvimento e melhoria de produtos e processos.

O primeiro autor que abordou de uma forma orientada as atividades desenvolvidas ao longo do processo de projeto de engenharia foi Asimow, em 1962, com a obra *Introduction to design: fundamentals of engineering design*. A metodologia proposta procura determinar de forma extensiva e encadeada, todos os passos do desenvolvimento de produtos. Apresenta grande importância histórica, por se tratar de um trabalho pioneiro no desenvolvimento de metodologias de projeto.

Asimow (1962) baseou seu trabalho na morfologia para desenvolvimento de um projeto. Segundo o modelo, o projeto irá se desenvolver através da série de fases apresentadas. Dentro do modelo proposto pelo autor uma nova fase não começará antes que a anterior esteja completa, mas esta determinação pode ser modificada para alguns casos.

O modelo é dividido em dois grupos principais: Fases primárias do projeto (Fases I, II, e III) e Fases relacionadas ao ciclo produção-consumo (Fases IV, V, VI e VII). O primeiro grupo está relacionado às atividades para desenvolvimento da concepção do projeto, enquanto o segundo grupo engloba as atividades ligadas ao desenvolvimento da produção e serviços de apoio.

A Fase I compreende um estudo de exeqüibilidade do projeto. Dentro desta fase o autor propõe uma série de passos que resultará em um produto bem determinado e com possibilidades de fabricação. Dentre as etapas necessárias, o autor propõe a análise das necessidades do mercado, identificação do sistema, concepções para o projeto, e análise física, econômica e financeira.

A Fase II é denominada projeto preliminar. Nesta fase as várias concepções determinadas na primeira fase serão avaliadas, e como resultado tem-se uma concepção

promissora. As atividades propostas para a determinação do projeto preliminar são: seleção da concepção de projeto, modelos matemáticos, análise de sensibilidade, análise de compatibilidade, otimização, projeção no futuro, previsão do comportamento, testes e simplificações.

A Fase III é denominada projeto detalhado. A concepção escolhida na fase anterior e que apresenta a probabilidade de ser um bom produto, será detalhada. As atividades são: preparação para o projeto, descrição dos subsistemas, descrição dos componentes, descrição das partes, desenhos de montagem, construção experimental, programa de testes do produto, análise e previsão de reprojeção.

As fases de IV a VII compõem as etapas de metodologia ligadas ao desenvolvimento da produção.

Muitos autores desenvolveram seus trabalhos a partir da metodologia apresentada por Asimow (1962), adaptando-a as necessidades do contexto atual. Como exemplo pode-se citar o trabalho de Ertas e Jones (1993).

Em 1966, Woodson, T., com a obra *Introduction to engineering design*, trata sobre a forma sistemática de desenvolvimento de projetos de engenharia.

Em 1996, Pahl, G. e Beitz, W. publicaram artigos em revistas descrevendo a prática de projeto como resultados de pesquisas de diversos centros acadêmicos na Alemanha. Surge assim, a sistematização do processo de desenvolvimento de produtos.

A abordagem de Pugh (1995) foi fortemente influenciada pela experiência prática, que o próprio autor obteve atuando durante anos como projetista e gerente de projetos em diversas indústrias. Sua principal preocupação era com a busca de um uso total das atividades de projeto, uma visão que ultrapassam as visões locais e parciais em cada setor tecnológico específico. Para definir um modelo de metodologia de projeto deu uma significativa ênfase à educação, gerando o modelo “*total design*”. O modelo proposto segue 6 etapas, interativas e aplicações através dos tipos de projetos (independente da disciplina tecnológica envolvida). Cada etapa é representada por um cilindro, no qual é empregado um

conjunto específico de conhecimentos compostos por diversas visões tecnológicas parciais, Figuras 2.5 a 2.8.

Esse modelo de projeto dinâmico consiste em:

Entender a necessidade do cliente;

Especificar: utilizar ferramentas de controle e desenvolvimento;

Fase conceitual do projeto;

Detalhamento do projeto;

Fabricação e lançamento no mercado.

Figura 2.4 – (a) Corpo do projeto , em (b) Corpo do projeto envolvido por um projeto de produto específico (PUGH, 1995)

Figura 2.5 – Corpo de projeto com dados de métodos independentes disciplinares. (PUGH, 1995).

Figura 2.6 – Corpo do projeto com dados adicionais de fontes dependentes disciplinares e tecnológicas (PUGH, 1995)

Figura 2.7 – Modelo ativo do “Total Design”. (PUGH, 1995)

Back (1983) apresentou uma metodologia do processo do projeto que foi dividida em 8 fases (Figura 2.9):

Figura 2.8 – Legenda das etapas (BACK, 1983)

Estudo da viabilidade (Fase I) – iniciado em sua maioria por um grupo de projetistas, busca atender uma solução útil para os problemas apresentados. Busca viabilizar a idéia em um estudo de exeqüibilidade, ou não, se a experiência em projetos torna essa fase supérflua. Constatam se as necessidades originais são realmente válidas, exploram problemas gerados pelas necessidades e identificação de seus elementos, coletas de sugestões e soluções, e por fim, discutem as soluções potencialmente úteis (uma boa solução teria uma base na produção, compensação econômica e viabilidade financeira), Figura 2.10;

Projeto preliminar (Fase II) – inicia-se por um conjunto de soluções úteis obtidas na fase anterior, onde terá como meta à escolha da melhor concepção para o projeto. A solução sobrevivente é experimentalmente aceita para exames mais detalhados e em seguida submete-se à idéia em questões de como o comportamento do produto com o tempo, gosto do consumidor, concorrência e disponibilidade de matéria-prima, Figura 2.11;

Figura 2.9 – Viabilidade do projeto, fase I (BACK, 1983)

Figura 2.10 – Projeto preliminar, fase II. (BACK, 1983)

Projeto detalhado (Fase III) – surge a concepção desenvolvida no projeto preliminar, e tem por finalidade fornecer as descrições de engenharia de um projeto frutífero e verificado. Até este ponto, o projeto foi caracterizado pela sua grande fluidez e grandes mudanças podiam ser efetuadas sem grandes perdas financeiras. Desenvolve-se um *lay-out* padrão com status provisório (à medida que o relatório do projeto se desenvolve, o projeto experimental é apropriadamente iniciado), são construídos modelos experimentais (*mock*

up's e protótipos parciais). A partir desta fase, toda concepção deverá ter um fim e ser concluída, caso contrário, o projeto deverá ser abandonado, Figura 2.12;

Figura 2.11 – Projeto detalhado, fase III. (BACK, 1983)

Revisão e testes (Fase IV) – são testados modelos experimentais construídos inicialmente especificamente para tal situação na fase anterior. As respostas provenientes nesta fase fornecem uma base para reprojeto e refinamentos, até que se consiga uma solução adequada, Figura 2.13;

Figura 2.12 – Revisão do projeto, fase IV. (BACK, 1983)

Planejamento da produção (Fase V) – a decisão da produção de um determinado produto envolve um compromisso econômico enorme, na qual uma confiança deverá ser depositada na decisão tomada, que poderá ser tomada pela administração, que repousa a

responsabilidade final pelo sucesso da empresa. Seguem então os passos do planejamento de produção:

- Planejamento detalhado dos processos de fabricação;

- Projeto de ferramentas e gabaritos;

- Planejamento, especificação e projeto de nova produção e instalação de fábrica;

- Planejamento do sistema de controle de qualidade;

- Planejamento para o pessoal de produção;

- Planejamento de controle de produção;

- Planejamento do sistema de fluxo de informação;

- Planejamento financeiro;

Planejamento do mercado (Fase VI) – objetiva planejar uma forma de distribuição do produto que seja eficiente e flexível, subdividindo-se em:

- Projeto da embalagem dos produtos;

- Planejamento do sistema de armazenagem;

- Planejamento das atividades de promoção;

- Projeto do produto tendo em vista os problemas que surgem na distribuição;

Planejamento do consumo (Fase VII) – visa adequar serviços ao projeto e aperfeiçoamentos através dos passos:

- Projetar para a manutenção;

- Projetar para a confiança que o produto deve inspirar;

- Projetar para a segurança;

- Projetar para a conveniência de utilização;

- Projetar para os aspectos estéticos;

- Projetar para a economia de operação;

- Projetar para uma vida útil adequada;

Obter dados do serviço que possam prover uma base para o aperfeiçoamento do produto, para projetos futuros e para projetos de produtos diferentes, porém relacionados ao original.

Planejamento da obsolescência (VIII) – visa tornar ainda útil o produto em desuso futuramente como projetar um produto mais durável fisicamente do que sua vida útil produtiva, ou tecnológica, ou então projetar um produto que após sua vida útil ainda possa ser reutilizado em atividades ou tarefas secundárias, ou seus componentes possam ser reaproveitáveis.

Essa ordem seqüencial e cronológica de atividades é seguida na maioria dos projetos, e muitos autores seguem um princípio. Porém detalhes ou etapas podem ser diferenciados, tornando o projeto de engenharia específico num setor ou etapa. Asimow (1962) divide as etapas do processo de uma forma semelhante à citada, porém reúne as Fases III e IV, pois no Projeto Detalhado – Fase III se inicia os testes individuais e os detalhamentos são ajustados. Assim protótipos são construídos e testados, possibilitando uma revisão de componentes e conjuntos. Reajustes ou re-projetos serão efetuados, até a aprovação para a produção.

Pahl e Beitz (1996) propõem uma metodologia diferenciada de processos de projeto, denominada de Projeto Incorporado, na qual se baseia no desenvolvimento do processo nos critérios técnicos e econômicos e informações auxiliares decorrentes do próprio processo. Inicia-se de uma estrutura de trabalho ou um conceito de um produto técnico, onde submeterá algumas etapas pré-estabelecidas, chegando a um layout primário, e posteriormente, através de aperfeiçoamentos e as últimas correções, um layout definitivo, Figura 2.14.

A versão de Shahin (1998) não se distorce dos demais pontos de vista dos autores citados, porém, durante o processo, existe a possibilidade de retorno à fase anterior caso haja imperfeições ou se encontre erros que não compensem a continuidade do projeto sem uma prévia reformulação, Figura 2.16. A prática nem sempre condiz com a realidade. Segundo uma pesquisa feita por Gremyr (2003), apenas 18% das indústrias de todo o Reino Unido utilizam uma metodologia de projeto robusto (Robust Design Methodology - RDM), no qual tem se mostrado eficiente na teoria, e busca agir na melhoria do projeto e produtividade. Também conhecido como Método de Taguchi, seu criador, o Dr. Genichi

Taguchi, buscou uma filosofia no qual a qualidade é medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta em relação ao valor esperado da mesma.

Whitfield (1999) defende a idéia de um projeto bem embasado, focado no produto final. Cita em *Multi-objective robust concept exploration within the made-to-order sector*, onde expõe uma idéia de um projeto que quanto mais detalhada e mais baixa for a sensibilidade e variação na utilização num projeto, mais reforçado e influente se torna o projeto. Enfatiza o Método Taguchi, e a filosofia por ele usada, e mescla as idéias do *Robust Design* e Método Taguchi, Figura 2.15.

Figura 2.13 – Etapas do projeto incorporado. (PAHL; BEITZ, 1996)

Figura 2.14 – (a) Armação robusta; (b) Sistema de coordenação de projeto. (WHITFIELD, 1999)

Figura 2.15 – Fluxo de atividades de projeto. (SHAHIN, 1998)

2.6. Considerações sobre a visão global do processo do projeto

Um projeto pode ser definido como uma série de atividades programadas com início e fim determinados. O projeto de engenharia tem como finalidade a aplicação de conhecimentos científicos para problemas técnicos, e então aperfeiçoá-las em função de diferentes necessidades: viabilidade econômica e física, sustentabilidade. A criação mental de um produto novo é a tarefa do engenheiro projetista (projetista de produto) em primeira instância e grupo multidisciplinares para encontrar idéias e soluções e desenvolver produtos de um meio específico. Possui a responsabilidade desde suas idéias, conhecimento, habilidade em um meio de técnica, economia e propriedades ecológicas de produtos decisivos.

O processo do projeto compreende uma série de atividades cujo objetivo é produzir um produto ou um processo baseado nas ciências aplicadas e novas tecnologias. Projeto é uma atividade da engenharia que afeta todas as áreas da vida humana. Usa leis e

discernimento da ciência, constrói sob experiência especial, e provem os pré-requisitos das realizações físicas das soluções de idéias.

Segundo DIXON (1966) e PENNY (1970) apud PAHL & BEITZ (1996) o trabalho de engenheiros de produto se encontra na intersecção de 2 eixos setoriais: cultural (numa linha compreendida entre políticos e a arte) e técnica (que compreende a ciência e a produção). Do ponto de vista psicológico, projeto é uma atividade criativa rodeada por temas matemáticos, físicos, químicos, mecânicos, termodinâmicos, hidrodinâmicos, de engenharia elétrica, engenharia de produção, tecnologia de materiais e “*design*”, bem como o conhecimento e experiência do domínio do interesse. Enquanto que do ponto de vista sistemático, projeto é uma otimização de objetivos dados associados conflitantes. Já pelo lado organizacional, é uma parte essencial do ciclo de vida do produto.

2.6.1. Desenvolvimento do projeto como visão de negócio.

Projetos relatados para produção em massa são geralmente iniciados por um grupo de engenheiros de produto, após análises do mercado. Os requisitos estabelecidos geralmente deixam um grande espaço de soluções para engenheiros de produto.

No caso de uma ordem aleatória para um produto específico unitário ou de baixa produção, usa-se quantidades reduzidas de requisitos. Nestes casos, é sensato basear suas soluções em uma companhia com bases sólidas em projetos e desenvolvimentos em produção ordinária. Tal desenvolvimento geralmente ocupa apenas pequenos passos importantes a fim de limitar riscos envolvidos.

Se os riscos envolvidos forem apenas partes do produto, o requisito e o espaço do projeto são ainda mais estreitos e a necessidade de interagir com outros grupos de designers é alta. Quando isso ocorre para a produção de um produto, existem questões de design predispostas em máquinas de produção, gabaritos e ferramentas, e equipamentos de inspeção. Para estas tarefas, cumprir requerimentos funcionais e obrigações técnicas é especialmente importante, Figura 2.17.

Figura 2.16 – Processo de desenvolvimento de produtos industriais. Fonte: (<http://www.numa.org.br>; ROZENFELD,H.,1997).

Quanto à organização do projeto e o processo de desenvolvimento, dependerá do primeiro momento da organização geral da empresa. O desenvolvimento de produtos e sua produção, em companhias de produtos orientados, serão responsáveis por separar as divisões da companhia, baseadas em tipos específicos de produtos.

2.7. Tendências: novas filosofias e ferramentas comparativas de apoio ao processo de projeto

A utilização intensiva de softwares dedicados tem encontrado grande demanda em atividades no desenvolvimento e melhoria de produtos. Nesse contexto, ferramentas computacionais de suporte à concepção e detalhamento de sistema e produtos (CAD); simulação da fabricação (CAM), simulação e análise de esforços, deformações (CAE), gerenciamento de recursos (CAPP e PDM) ou gerenciamento de dados na empresa (SAP) se apresentam cada vez mais como alternativas viáveis e consolidadas ao auxílio às atividades de processo do projeto. Futuramente, tarefas rotineiras, como projetos variáveis,

serão amplamente empreendidas por computadores, deixando os projetistas livres para se concentrar no projeto original e produtos específicos, que serão suportadas por ferramentas computacionais que realçarão a criatividade, conhecimentos de engenharia, e experiência de projetistas (PAHL e BEITZ, 1996).

O desenvolvimento de sistemas focados em aperfeiçoamento do conhecimento e do processo facilitará de toda e qualquer informação, incluindo dados específicos de projeto, detalhes de componentes e informações sobre produtos existentes. Estes sistemas também auxiliam a análise, otimização e combinação de soluções, porém não substituirão os projetistas, que terão o poder de decisão e serão ainda mais cruciais devido ao grande número de soluções possíveis geradas, e também pela da necessidade de coordenar os inputs dos especialistas envolvidos nos projetos modernos multidisciplinares.

Computer Integrated Manufacturing (CIM) tem como objetivo auxiliar na organização empresarial e na troca de informações. O sistema de gerenciamento de projeto na estrutura CIM aperfeiçoa o planejamento e controle das necessidades e possibilidades do processo de projeto. Consiste num método de manufatura controlado integralmente por computador, baseando-se num sistema de controle de circuito fechado, composto por sensores que informam o processo em tempo real. E a Engenharia Simultânea expõe a idéia de redução e otimização do tempo e processo de fabricação do produto através de realizações coincidentes de fases, focando-se na flexibilidade, otimização da produção e qualidade, e redução no tempo de processo de produção.

Medidas atuais são exigidas ao projetista como maior domínio do conhecimento multidisciplinar na área tecnológica e humana. Paralelamente a esses desenvolvimentos aos quais influenciam os métodos de trabalho de projetistas, surgem desenvolvimentos tecnológicos e medidas que possibilitam enriquecer o projeto de uma forma mais ágil e barata. A integração da mecânica, eletrônica e softwares de engenharia tem resultado em muitos desenvolvimentos de produto interessantes. Pode ser concluído que as pressões nos projetistas são grandes e será maior futuramente. Logo, surge uma nova forma dos projetistas lidarem com tal situação e evoluírem, desta forma, no processo. É essencial que

os futuros projetistas não apenas entendam a ciência tradicional e fundamentos da engenharia, mas também conhecimentos específicos e organização e métodos gerais.

2.7.1. CAD/CAE/CAM

SILVA (2001) expõe a versatilidade das tecnologias atuais que dão um grande auxílio ao designer atualmente. Os termos CAD, CAE e CAM estão diretamente relacionados com a redução de custo de desenvolvimento e fabricação de um produto através da utilização de computadores, eliminando a necessidade e o custo de se realizar experimentos com protótipos.

Define o sistema *Computer Aided Design* (CAD) como sendo composto por um software e hardware que oferecem em conjunto recursos gráficos para gerar desenhos utilizando o computador, no qual pode ser bidimensional - como o desenho de uma peça ou uma planta de uma casa, onde são representadas apenas vistas ortogonais ou perspectiva - ou tridimensional - que consiste em apresentação de uma terceira dimensão e, como sendo um sólido, pode-se girar o objeto e visualizá-lo em diferentes posições.

O modelo sólido, tridimensional, simula de forma virtual, a peça real, podendo ser representada visualmente como estrutura aramada (*wireframe*), modelo de superfície e modelo de sólido. O *wireframe* utiliza linhas interligadas, que representa as possíveis arestas que unidas dão a forma do sólido. Porém se houver complexidade nas superfícies da peça, a imagem pode se tornar confusa. Dessa forma, com um recurso através de algoritmos, a visualização em modelo de superfície oculta as arestas que supostamente não seriam visíveis no modelo real. Já o modelo sólido, a peça é apresentada em volume real, tridimensional e com características de sensação de luz e sombra.

O CAD tem como vantagem permitir calcular interferências entre peças (no caso de uma montagem), calcular seu volume e massa, centro de gravidade, determina com precisão a distância entre superfícies (ou ângulo), permite pequenas animações básicas para visualização de algum mecanismo, por exemplo. E por fim, o sistema CAD permite a

integração com outros sistemas como CAE e CAM, assim o modelo construído pode ser transferido ao sistema CAE para simulação de comportamento (elétrico ou mecânico), e/ou transferido para um CAM para simular e programar sua usinagem numa máquina CNC.

O principal objetivo do *Computer Aided Engineering* (CAE) é reduzir o tempo e custo de desenvolvimento do produto aumentando sua qualidade, onde um engenheiro projetista poderá avaliar com precisão o projeto sem ter a necessidade de construir protótipos. É usado na simulação do comportamento da peça na situação real, onde se podem calcular as tensões mecânicas, deslocamentos, distribuição de temperatura, fluxo de calor na peça, etc. Existem CAEs especialistas em simulações particulares, por exemplo um circuito elétrico, onde sabendo-se o sinal de entrada, determina-se o sinal de resposta gerado pelo circuito, ou ainda calcular resistências de alguma peça que receberá um determinado esforço. *Computer Aided Manufacturing* (CAM) é definido como o uso do computador no planejamento, gerenciamento e controle de manufatura. Caracteriza-se por estimar custos (material e produção) de um produto a ser fabricado; planejamento do processo (seqüência de operações e processos otimizados); cálculos de parâmetros ótimos de usinagem, como rotação da ferramenta ou da castanha de um torno, velocidade de avanço, número de passes, etc; gerar um programa seqüencial para a máquina operatriz; cálculo de tempo de produção.

Outras ferramentas auxiliares estão presentes no processo do projeto como CAPP e PDM. O *Computer Aided Process Planning* (CAPP) possui basicamente a função de selecionar e definir os processos a serem executados em uma peça de maneira econômica, de acordo com as especificações do projeto, verificando as condições de venda (como volume de vendas e prazos). O documento resultante do planejamento do processo, conhecido como plano de processo é a base para se realizar o planejamento da produção e serve como referência à produção propriamente dita. Por isso é que se considera o planejamento do processo como o elo entre projeto e o planejamento da produção e também o chão de fábrica. *Product Data Management* (PDM) é uma tecnologia de software que visa gerenciar todas as informações e processos relativos ao ciclo de vida de um

produto. Entendendo-se ciclo de vida como todo o período compreendido desde a concepção de um produto até sua obsolescência, passando pelas etapas de projeto e produção. A tecnologia PDM propõe-se a explorar ao máximo os benefícios da engenharia simultânea, controlando a informação e distribuindo sistematicamente para as pessoas que a necessitam. Várias nomenclaturas como, PIM (*Product Information Management*), TDM (*Technical Document Management*), TIM (*Technical Information Management*) e EDM (*Electronic Document Management*) são usadas com significados semelhantes. Porém todos estes sistemas podem ser classificados dentro de dois grupos distintos: PDM e EDM. Sistemas EDM são todos aqueles focados no gerenciamento de documentos podendo ou não estar relacionados à engenharia. Já os sistemas PDM são voltados para o gerenciamento do produto e de suas partes, possuindo assim funcionalidades especiais como controle da estrutura de produto e controle das modificações de engenharia.

2.7.2. Engenharia simultânea

A evolução dos produtos industrializados acontece num ritmo cada vez maior devido à grande concorrência entre as indústrias produtoras. Logo, é vantagem para uma empresa, lançar seu produto o quanto antes, à frente do seu concorrente, para poder obter um maior lucro. A solução básica encontrada foi a busca na redução do ciclo de desenvolvimento dos produtos. No início dos anos 80, adotou-se a idéia de aumentar o grau de paralelismo das atividades em desenvolvimento, assim uma fase não se inicia necessariamente ao término, mas durante as atividades da anterior.

Esse paralelismo das atividades de desenvolvimento de produto foi batizado de Engenharia Simultânea, pelo DARPA (*Defense Advanced Research Project Agency*) iniciado em 1982 e publicado em 1988 [www.numa.org.br].

Além dessas diversas definições adotadas, deve-se ressaltar a ênfase atual de se modelar os processos de negócio das empresas, onde há filosofia utilizada no processo de

desenvolvimento de novos produtos que visa o aumento de qualidade do produto focado no seu público alvo, redução do ciclo de desenvolvimento e redução de custos.

Tal filosofia engloba a idéia de trabalho em equipe, sendo essa equipe composta por pessoas de diversas áreas, tornando-a mais flexível e multifuncional. Essa equipe poderá adquirir ou perder integrantes profissionais durante o processo de desenvolvimento do produto. Os clientes e fornecedores deverão compor o grupo durante algumas atividades, tornando o processo e o produto extremamente prático e objetivo, uma vez que estes podem observar e lidar com tal produto e sentir a real necessidade de melhoria. Essas atividades em equipe devem ter o auxílio de recursos, métodos e técnicas integradas como QFD, FMEA, Taguchi, etc. Apesar de se ter focado o trabalho nas necessidades do cliente, pode-se afirmar que ainda há outras definições que completam a filosofia, como a melhoria contínua do produto, e novos conceitos a se adquirir.

O estudo realizado pelo DARPA definiu Engenharia Simultânea da seguinte forma [WINNER et al., 1988 apud PRASAD, 1996]:

“Engenharia Simultânea é uma abordagem sistemática para o desenvolvimento integrado e paralelo do projeto de um produto e os processos relacionados, incluindo manufatura e suporte. Essa abordagem procura fazer com que as pessoas envolvidas no desenvolvimento considerem, desde o início, todos os elementos do ciclo de vida do produto, da concepção ao descarte, incluindo qualidade, custo, prazos e requisitos dos clientes”.

A partir dessa definição surgiram muitas outras. O conceito de Engenharia Simultânea tornou-se muito mais abrangente o emprego de recursos computacionais - CAD/CAE/CAM/CAPP/PDM - e a utilização de metodologias - DFX, QFD, entre outras (ROZENFELD, 1997).

Todas essas definições continuam válidas. No entanto, a definição de Engenharia Simultânea deve ser adequada à ênfase atual de se modelar os processos de negócio das empresas.

Com base nos conceitos de modelagem de processos de negócio, pode-se definir Engenharia Simultânea como sendo a filosofia utilizada no processo de desenvolvimento (ou alteração) de novos produtos, visando:

Aumento de qualidade do produto, com foco no cliente;

Diminuição do ciclo de desenvolvimento e

Diminuição de custos.

Figura 2.17 – Modelo de referência da F.I.M. Etapas x Tempo. Fonte: www.numa.org.br

Estudo da viabilidade: agrega soluções úteis a um problema pré-concebido através de alguma deficiência de produtos no mercado ou pelo surgimento de uma nova necessidade. Após, exploram-se os problemas gerados pelas necessidades onde são identificados seus elementos, e então se concebem as soluções mais plausíveis e viáveis física, econômica e financeiramente;

Projeto preliminar: seleciona a melhor das soluções apontadas na fase anterior, onde a escolhida é submetida a exames ainda mais detalhados;

Projeto detalhado: fornece informações técnicas do produto tornando-o mais palpável, onde ocorrem cálculos, dimensionamento, etc., assim torna-se desenvolvido, detalhado e descrito;

Revisão e testes: testa os modelos experimentais construídos inicial e especificamente para tal situação;

Planejamento da produção: planeja os processos de fabricação conforme a exigência, projeta gabaritos e ferramentas, planeja sistemas voltados para qualidade, pessoal de produção, planeja o controle de produção, fluxo de informações e financeiro;

Planejamento do mercado: planeja uma forma de distribuição do produto que seja eficiente e flexível, como projetos de embalagem, planejamentos de armazenagem, atividades promocionais;

Planejamento para consumo e manutenção: adequar serviços ao projeto e aperfeiçoamentos como projetos de manutenção, confiabilidade, segurança, interfaces, aspectos estéticos, economia de operação, vida útil adequada, e obtenção de dados para aperfeiçoamentos;

Planejamento da obsolescência: são planejamentos que visam além da vida útil do produto, como projeto de um produto mais durável fisicamente do que sua vida útil, o planejamento de uma nova utilidade após o desuso da primeira, ou projeto de componentes reaproveitáveis.

2.8. Técnicas de criatividade para métodos de busca de solução e análise para processo de projeto

A inovação é um conceito fundamental para se obter sucesso na área comercial e como fator de independência financeira e intelectual, no qual a economia de livre mercado depende de certa forma, da competição entre as empresas, para superar marcas estabelecidas por outras empresas. Novidades em produtos são constantemente lançadas

para atrair o consumidor e conseqüentemente frear a venda dos concorrentes. Com o lançamento dos produtos globalizados, aumenta a pressão competitiva que vem do exterior. Em decorrência, a vida média dos produtos no mercado está cada vez menor. Novas tecnologias e filosofias surgiram para auxiliar as atividades do processo de desenvolvimento do projeto, condição que reduz significativamente o tempo entre o reconhecimento de uma necessidade e o lançamento do produto propriamente dito.

Estatísticas apontam que nem todos os produtos lançados obtêm sucesso. Os números variam, pois há diferentes entendimentos sobre o que se pode considerar um novo produto e o que se constitui em um sucesso. De um modo geral, de cada 100 idéias sobre novos produtos, 30 serão desenvolvidas, 13 serão lançadas no mercado e apenas 10 serão lucrativas. Portanto, o projeto é uma ferramenta que, juntamente com as demais, pode trazer algum diferencial ao produto, e conseqüentemente o sucesso. O segredo de uma boa inovação é a gerência de risco, e deve estar especialmente atenta para situações como o estabelecimento de metas (verificar se o produto satisfaz os objetivos propostos, aceitação, custo de fabricação) e eliminação do produto (tão logo se comprove que o produto não atingirá as metas estabelecidas), [BAXTER, 2000].

Para se desenvolver novos produtos, com uma grande probabilidade de sucesso, é necessária a inclusão de novidades, melhorias, preços atrativos, foco no consumidor; diferenciações e vantagens competitivas, que busca o vendedor; simplicidade na fabricação e facilidade na montagem, que busca o engenheiro de produção; novos materiais, processos e soluções formais, que busca o projetista; e poucos investimentos e retorno rápido, que busca o empresário. Isso exige que o projetista de produto seja extremamente criativo, e a partir desta necessidade alguns princípios e métodos foram desenvolvidos para se aperfeiçoar a criatividade.

Preparação: segundo soluções criativas descobertas ao longo da história, como no caso de o “Eureka!”, de Arquimedes, é fundamental que o projetista conheça bem o problema e a necessidade que o futuro produto a ser projetado irá suprir. Thomas Edson afirmava que “criatividade é 1% de inspiração e 99% de transpiração”, ou seja, é necessário

que se tenha uma preparação, e que o projetista esteja ciente da real necessidade, e somente assim poderá criar, associar e combinar algumas idéias mais criativas. Geralmente os problemas de projeto de produto são complexos, e têm diversas metas, muitas restrições e um grande número de soluções possíveis. Quando se está projetando, deve-se atender a maioria das necessidades, tanto para o consumidor, quanto para o produtor, em diversos fatores. Existem dois métodos de ferramentas de preparação para se cumprir essa etapa: análise paramétrica, onde são apresentadas medidas quantitativas, qualitativas e classificatórias do problema; e análise do problema, que procura reduzir o problema a conceitos cada vez mais abstratos. A preparação para definir o problema deve começar com o pensamento divergente, de modo que permita explorar uma ampla gama de alternativas para a solução do problema, examinando-se todos os ângulos possíveis de sua solução. E posteriormente, reduzem as alternativas e apenas uma definição para o projeto a ser desenvolvido. A definição do problema pode ser suficientemente ampla, para comportar diversas alternativas de solução, mas deve conter objetivos claros e fronteiras bem estabelecidas. É importante que o problema seja definido de maneira bem simples e concisa, de modo que todos os participantes do projeto consigam entendê-lo.

Geração de idéias: é um ato fundamental, para pensamento criativo. Muitas técnicas de criatividade são citadas na tentativa de unir essas idéias que estavam separadas. Algumas requerem pouco tempo e esforço. Assim, os possíveis benefícios de uma solução inovadora geralmente justificam os seus custos.

Baxter (2000) exhibe a existência de três categorias principais para a geração de idéias:

Redução do problema: que se examinam os componentes, características e funções do problema, tentando resolvê-lo, modificando uma ou mais dessas características. Elas se propõem a resolver o problema, mudando apenas alguns aspectos. É uma técnica reducionista, pois focaliza a atenção sobre o produto existente e não enxerga além dele;

Expansão do problema: que tenta explorar idéias, além do domínio imediato do problema. Essas técnicas procuram alargar as perspectivas de problema, abrindo um amplo leque de possíveis soluções, não se restringindo ao produto existente;

Digressão do problema: que procura fugir do domínio imediato do problema, usando pensamento lateral. Algumas dessas técnicas começam com o problema original e estimulam as incursões laterais, afastando-se deliberadamente do problema. Outra maneira é partir de algo completamente diferente, para ir se aproximando do problema, como forma de agir das soluções convencionais.

Procedimento para geração de idéias: para muitas pessoas, quando se necessita de uma ferramenta para geração de novas idéias, significa efetuar um *Brainstorming* (tempestade de idéias). Porém, essa técnica tem mostrado pouco eficiente. Segundo Baxter (2000), a principal característica do *Brainstorming* baseia-se nas idéias de uma pessoa, que inspira outras pessoas e, assim idéias vão fluindo respectivamente. Porém, deve-se observar que as idéias do grupo podem fluir para um número limitado de linhas de raciocínio, reduzindo-se em poucos princípios, ou então seguir uma linha de idéia de poucas soluções viáveis. A partir dessa primeira idéia, outras surgirão baseadas nessa primeira. Poucas idéias poderão surgir diferentemente da idéia inicial. Dessa forma, o resultado obtido não será muito diferente daquele que seria conseguido individualmente. Isso significa que há risco de se ter idéias dirigidas para uma linha de pensamento, prejudicando a busca de soluções mais amplas. Também há a separação entre a fase de idéias e a fase de julgamento das idéias. No projeto de produtos, nem sempre é simples avaliar uma idéia, antes que ela seja desenvolvida em projeto conceitual, configuração e protótipo para ser testado. Isso pode envolver um custo e um tempo significativos.

O processo de evolução do pensamento criativo pode seguir as seguintes etapas:

Pensamento intuitivo e discursivo;

Intuição criativa (substituindo intuição confusa usando a intuição adequadamente);

Características de pensamento intuitivo;

Parada de pensamento errôneo;
Aproximação da solução;
Mentalidade criativa;
Métodos para registrar as soluções.

Várias ferramentas de geração de idéias são citadas por Baxter (2000) e classificadas por Pahl & Beitz (1996) como:

Métodos convencionais

Procura de literatura – busca e pesquisa de dados na forma simples, em artigos, livros, revistas especializadas, entre outros.

Análise de sistemas naturais – comparação e análise entre o produto tecnológico e formas naturais encontradas na natureza.

Análise de sistemas de técnicas existentes – comparação e análise das técnicas já existentes em outros produtos e processos.

Analogias – comparação do produto com algo ou alguém, utilizando-se da semelhança marcante para associação, baseando-se nas propriedades de um objeto no qual é transferido para outro diferente.

Métodos intuitivos

Brainstorming – um grupo de pessoas gera progressivamente idéias a partir de uma inicial. O objetivo é atingir o maior número de alternativas, a fim de se esgotar as idéias, e por fim selecionar uma delas.

Brainwriting (Método 6.3.5) – baseado no *brainstorming*, induz os participantes ao esgotamento das idéias, porém essas sendo escritas de diferentes formas e limitadas por um tempo demarcado.

Método de combinação – consiste em combinar diferentes métodos para se obter um melhor desempenho.

Métodos discursivos

Estudo sistemático de processos físicos

Busca sistemática com esquemas de classificação auxiliar

Uso de catálogos técnicos de projeto

Pahl & Beitz (1996) classificam os métodos de busca e avaliação de soluções, tornando esse processo mais específico e objetivo. Em primeira instância, dividem em apenas métodos gerais e métodos específicos, onde não estão necessariamente vinculados ao outro, mas poderão chegar a um resultado comum, tornando o projeto ou o produto melhor elaborado e direcionado.

Os métodos gerais são efetuados inicialmente, assim elaboram as principais fases do processo do projeto, subdivididas em métodos convencionais, intuitivos e discursivos e complementa-se uma à outra de várias maneiras. Já nos métodos específicos, são discutidas as questões e os temas mais detalhados e seus processos passo a passo. As soluções encontradas pelos métodos convencionais podem ser estendidas e complementadas utilizando os métodos intuitivos e discursivos.

A utilização de técnicas estatísticas, no processo de desenvolvimento de projetos auxilia principalmente na etapa de avaliação do desempenho do componente ou sistema, seja com enfoque na melhoria dos mesmos ou na concepção de um projeto inovador. No que se refere à indústria, a aplicação de planejamentos experimentais representa uma das ferramentas, que pode aperfeiçoar o tempo de lançamento de produtos, condição para se obter competitividade industrial. Em termos de processos industriais e de pesquisa, abordagens com experimentos projetados afetam diretamente a qualidade e produtividade dos mesmos. Dessa forma, técnicas estatísticas referentes a planejamentos projetados, bem como a aplicação conjunta com técnicas numéricas de otimização tem como objetivos principais, sistematizar matematicamente planejamentos, para que todas as variáveis independentes (parâmetros de projeto) sejam combinadas e avaliadas em função da

resposta de interesse, bem como identificar e minimizar fontes de variabilidade e otimizar as variáveis independentes dentro de um espaço de projeto de interesse.

2.9. Considerações sobre o Planejamento Experimental

Na década de 20, o pesquisador inglês Sir Ronald Fischer desenvolveu métodos estatísticos para redução, estimativa e distribuição de dados, análise da variância e teoria de erros. Esse estudo fundamentou a Estatística voltada ao projeto e análise de experimentos. Na década de 50, surgiu o conceito de projeto robusto que, através dos trabalhos de Taguchi, visava a redução da influência de fatores externos para a obtenção de produtos e sistemas insensíveis a um grande número de fatores de ruído [Barros Neto; *et al.* 2001].

Os modelos matemáticos podem se apresentar sob dois aspectos: (a) Modelos determinísticos, nos quais todos os parâmetros são bem conhecidos ou; (b) Modelos probabilísticos, nos quais os modelos matemáticos podem ser parcialmente considerados, mas há desconhecimento do comportamento de alguns parâmetros [Montgomery & Runger 2003]. Na engenharia experimental, o engenheiro freqüentemente se depara com a tarefa de explorar as relações entre uma série de respostas (y^s) e um número de predições de variáveis independentes, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Portanto, pode haver diferentes níveis de sensibilidade de conhecimento sobre a natureza das relações entre essas variáveis. Se houver um conhecimento significativo, uma função matemática pode ser estabelecida, acompanhada de um erro estimado (ϵ) entre a resposta (y) e as variáveis (x_s). Neste caso, o modelo é denominado mecanístico descrito sob a forma de $y = f(x) + \epsilon$. Há grande número de problemas, nos quais se pode verificar e ajustar o modelo experimental a um modelo teórico pré-estabelecido. Devido a abordagem cada vez mais multidisciplinar dos sistemas e processos na engenharia, a obtenção de modelos determinísticos se torna cada vez mais complexa.

Em muitos desses casos, os modelos empíricos são aplicados, auxiliando nos métodos de ajustes de modelos. Para a obtenção de modelos empíricos, a resposta (y) deve ser aproximada através das variáveis (x'_s). As respostas ou observações de y para vários níveis de x_s podem ser aproximadas por funções (curvas, ou em casos mais complexos, superfícies), através de técnicas estatísticas, como por exemplo, através do método de mínimos quadrados. Esta aproximação da função por $g(x)$ para o relacionamento $y = g(x) + \varepsilon$, é um modelo empírico.

Silveira [2004] propôs uma metodologia para identificação e otimização de componentes de máquinas rotativas, baseado em planejamento de experimentos, com enfoque na técnica da superfície de resposta. A técnica de superfície de resposta explora as superfícies obtidas pelos planejamentos de 1ª ordem, e posteriormente aumenta sua ordem, com o objetivo de buscar através de cubo experimental regiões que otimizem o espaço de projeto. A grande questão no planejamento experimental é decidir qual o caminho dos pontos experimentais que se revelam melhores em determinados aspectos para uma análise [Box *et al.* 1978]. Para o estudo de um sistema, há duas opções estratégicas considerando a pesquisa de valores extremos. A primeira consiste em se determinar um conjunto de fatores de influência, ou seja, o objetivo corresponde a uma pesquisa de extremos (valores máximos e mínimos). A segunda estratégia consiste na pesquisa do valor nominal, ou seja, pesquisar ou obter a modelagem do sistema. Portanto, pesquisa-se um modelo capaz de fornecer a resposta do sistema por uma configuração arranjada dos fatores.

Os planejamentos experimentais de 1ª. ordem são indicados para análise exploratória ou para se iniciar um procedimento de análise em superfícies de resposta (MSR), ajustando planejamentos fatoriais 2^k e planejamentos fracionários 2^{k-p} , dada pela equação (5.1).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k \quad (5.1)$$

Com $N > k$ pontos experimentais.

A forma geral dos modelos de 1ª. ordem é dado pela equação (5.2):

$$y_n = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_{in} + \varepsilon_n \quad (5.2)$$

$$\text{Ou, } y = X\beta + \varepsilon$$

Sendo:

$$X = \begin{matrix} N \times (k+1) \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{kN} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

A matriz X representa as variáveis independentes, o vetor β os valores obtidos pela regressão linear e ε representa o erro aleatório. Os efeitos principais e de interação podem ser estimadas em um planejamento 2^k com n réplicas, através de:

$$Efeito = \frac{\text{contraste}}{n2^{k-1}} \quad (5.3)$$

O contraste é obtido pelo algoritmo de Yates, obtendo-se os efeitos principais ou de interação correspondente em função das respostas para cada combinação. Os efeitos são obtidos pela divisão do valor de contraste pela metade do número de experimentos. Os planejamentos de 1ª. ordem podem ser expandidos para pontos experimentais adicionais

$k = \sqrt[4]{\alpha}$, que permite a estimativa dos coeficientes de uma superfície quadrática (2ª. ordem).

3. METODOLOGIA

Foi proposta uma metodologia para o desenvolvimento do projeto de um mini-moinho vibratório, Figuras 3.1, e constam das etapas: identificação da necessidade; estudo da viabilidade física e econômica; concepção do mini-moinho e jarros; projeto preliminar; projeto detalhado e fabricação do moinho. O trabalho foi limitado a fases de projeto do produto até a validação do protótipo que equivale às fases de I a IV de Back (1993); ou até a etapa 7 do fluxo de atividades de projeto proposto por Shahin (1998). Não foram abordadas neste momento, embora seja reconhecida a necessidade na continuidade, as questões relativas a negócio neste projeto, sejam: homologação de produto; homologação de processo; produção; validação; ensinar a empresa, propostas por Rozenfeld (1997).

,Figura 3.1 – Metodologia empregada no projeto do mini-moinho vibratório.

3.1. Tarefas de trabalho

O trabalho foi executado por introduções de tarefas na metodologia adotada na Figura 3.1 desmembrando numa metodologia estendida por tarefas, Figura 3.2.

A primeira tarefa do projeto englobou o planejamento de um produto de dimensões reduzidas. Inicialmente, foi constatado a necessidade de um equipamento de baixa capacidade volumétrica e processamento simultâneo, necessidade esta própria do LTC (Laboratório de Tribologia e Compósitos) e de consultas por outros laboratórios (DEMa – UFSCar, Materiais – EESC-USP; DEMa - UNICAMP, e outros), em geral laboratórios de P&D e empresas que trabalham com cerâmica avançada. Este projeto fora classificado como projeto de cunho “adaptativo”. Segundo Pahl et al. (1996) um projeto adaptativo é aquele no qual, o princípio de solução é preservado e, somente a configuração é adaptada às novas condições de montagem. Neste trabalho, o mini-moinho vibratório é tratado como um projeto de máquina especial, no qual o trabalho desenvolvido foi baseado na necessidade dos usuários de misturas e componentes cerâmicos.

Figura 3.2 – Metodologia de projeto estendida elaborada para a concepção e desenvolvimento de um mini-moinho vibratório.

Dessa forma, baseado em um dos procedimentos de planejamento do produto descrito por Pahl, et al. (1996), são feitas as devidas modificações levantadas nas seguintes etapas e atividades.

A identificação ou análise da necessidade deve ser feita com foco em objetivos, uma vez que o planejamento do produto envolve uma ampla faixa de possíveis soluções. Todo produto apresenta um ciclo de vida, e este deve ser delimitado, tanto para descarte, quanto para a inserção de novas tecnologias. A percepção da própria competência ocorre pelo *benchmarking*, com potenciais “concorrentes” e a capacidade tecnológica e econômica de viabilizar o produto. O estágio de tecnologia ocorre pelo conhecimento adquirido, competências necessárias e infra-estrutura. A construção de estratégias de busca, com base no “nicho” de mercado identificado anteriormente, se concentra no fato de lançar um novo produto no mercado atual, ou se novos mercados deverão ser alcançados, ou ainda com maior risco, se ter novos mercados com novos produtos. Assim, a idéia é se encontrar um nicho vantajoso de mercado e as tendências a médio e longo prazo. Com esse processo de seleção, deve haver um número limitado de áreas de busca do produto.

A etapa posterior busca novas idéias para um produto. Os campos de busca selecionados são examinados mais detalhadamente com auxílio de métodos de busca utilizados no desenvolvimento de produtos: métodos intuitivos, discursivos, matrizes morfológicas e composições sistemáticas. Nesta etapa, são estimuladas as inter-relações gerais de produtos técnicos com o respectivo grau de viabilidade, com base em suas funções técnicas.

As idéias geradas são submetidas a um método de seleção para análise da viabilidade econômica, viabilidade física e vantagens funcionais para o usuário final. Nesta etapa, trabalha-se com valoração binária (sim/não) para distinguir idéias promissoras de produtos das demais.

Na definição de produtos, sua proposta deverá contemplar: a descrição das funções; incluindo uma lista de requisitos preliminares; formulação de todos os requisitos do produto de forma clara considerando o processo de buscas de soluções; indicação de uma meta ou projeção de custos com relação à fabricação e produção do produto.

A metodologia para projetos oferece uma grande vantagem ao engenheiro de desenvolvimento ou projetista, quanto à faixa de possíveis soluções para determinados problemas, não ficando dependente de se ter uma idéia em um determinado momento.

3.2. Métodos de busca de soluções para o sistema Mini-Moinho Vibratório

No desenvolvimento de novas cerâmicas, após síntese, torna-se necessário à moagem do pó cerâmico. Eficiência, praticidade e tamanho submicrométrico são características fundamentais a serem buscadas nas partículas cerâmicas quando se necessita de alto desempenho. Normalmente de custos elevados, em ensaios de pesquisa e desenvolvimento, estes pós necessitam serem trabalhados em mínimas quantidades.

A identificação da necessidade baseada nas consultas do próprio laboratório LTC-USP (que entre outros busca pela moagem e mistura de bateladas de 1 grama de biovidro e 2 gramas de hidroxiapatita) e outros laboratórios gerou a tabela de correlação expressa pela Tabela 3.1. Para que fossem levantadas as possíveis soluções construtivas, em uma primeira etapa, para o mini-moinho vibratório sob a visão de um sistema mecânico foi utilizada a técnica de criatividade *Brainstorming*, com um grupo de pesquisadores dentro da disciplina de pós graduação *Projeto e Manufatura de Componentes Cerâmicos* - SEM 5852, composto de nove membros, com ou sem o conhecimento técnico especializado (Anexo I). Foram realizadas quatro sessões: a primeira, na qual foram levantadas algumas sugestões de construção do mini-moinho, e as demais sessões para refinar essas soluções.

Tabela 3.1 - Tabela de correlação para o moinho vibratório.

<div> REQUISITOS TÉCNICOS </div> <div> NECESSIDADES LEVANTADAS </div>	Volume do jarro reduzido	Potência do motor	Diferentes tamanhos de jarros	Inserção simultânea dos jarros	Engate rápido	Componentes padronizados	Vibrações nas direções x, y e z	Ambientes de pouco espaço	Escolha dos materiais e fechamento
Tamanho reduzido	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Baixo consumo de energia	○	●	○	○	○	○	○	○	○
Alta eficiência na moagem	○	○	●	○	○	○	○	○	○
Moagens simultâneas	○	○	○	●	○	○	○	○	○
Facilidade na montagem	○	○	○	○	●	○	○	○	○
Facilidade na manutenção	○	○	○	○	○	●	○	○	○
Irregularidades na moagem	○	○	○	○	○	○	●	○	○
Peso total reduzido	○	○	○	○	○	○	○	●	○
Reduzida contaminação	○	○	○	○	○	○	○	○	●

Legenda
Forte correlação ●
Média correlação ○
Frac correlação ○

A tabela de correlação compara as necessidades levantadas que seriam provavelmente encontradas em um ambiente prático e os requisitos técnicos tidos como solução. Ao observar as correlações, nota-se os pontos de forte correlação formando uma diagonal, o que mostra que existe uma resolução técnica para cada necessidade existente.

3.3. Análise de vibração

Foram realizados o planejamento experimental e a análise dinâmica do mini-moinho vibratório. Inicialmente foi realizada a análise dinâmica do moinho como corpo rígido

obtendo frequências naturais do sistema e em seguida, aplicadas planejamento experimental baseado na variação de alguns parâmetros de projeto. Estes experimentos integrados mostram o comportamento da resposta como uma função da combinação de diferentes níveis destes parâmetros.

3.3.1. Descrição do sistema

O mini-moinho vibratório desenvolvido possui capacidade de sustentar até seis jarros nos quais são colocados os elementos de moagem e o material a ser moído. A base do moinho onde são fixados os jarros é apoiada sobre molas e aloja em sua parte inferior interna, o motor elétrico vibratório. O motor vibratório fornece uma potência de 120W, com especificação: motor trifásico, IP55W21 da WEG (220/380 V), 60 Hz e 0,12 kW. Foram utilizados 4 e 6 pólos (carcaças 63) e 8 pólos (carcaça 71). A vibração do motor foi obtida pela adição de contra pesos nas extremidades de seu eixo. A amplitude de vibração pode ser variada pela adição ou remoção de massa dos seus contrapesos.

A primeira etapa da análise dinâmica do mini-moinho vibratório consistiu em se determinar frequências naturais do sistema como um corpo rígido. Para realizar esses ensaios foram posicionados acelerômetros nas direções x e y e (θx) , acoplados nos canais 1, 2 e 4 da placa de aquisição de dados da *Brüel & Kjaer*, especificada como *Kistles 13pe/N* com quatro canais ligados à um amplificador de sinais. A excitação externa foi feita através de um *shaker* com função aleatória. A excitação externa compreendeu a faixa de 0 a 20 Hz. Para a aquisição de dados, foram utilizados três canais: canal 1 para aquisição dos sinais na direção x , canal 2 para aquisição dos sinais na direção y e canal 4 para aquisição na direção θx , obtidas como RMS (*Root Medium Square*) das amplitudes de vibração. Os números de pólos do motor: 4, 6 e 8 fornecem: 1790 rpm, 1135 rpm e 805 rpm simulados pela variação com a frequência da rede em um motor de 4 pólos e na rede 60 Hz, 38 Hz e 27 Hz, respectivamente. A Figura 3.3 ilustra a referência adotada na vista superior da base suporte

de jarros do mini-moinho. Os recursos e experimentação dinâmica foram realizados no Laboratório de Dinâmica (LabDin –EESC – USP).

Figura 3.3 – Esquema de referência, para aquisição dos dados da análise dinâmica.

3.4. Análise experimental de moagem

As posições pré-determinadas pela análise de vibrações foram experimentadas com moagem de alumina 5SG da Alcan. Foi projetado e construído um jarro em nylon, com volume total de 60ml (Figura 3.4).

A alumina foi selecionada para o ensaio experimental por ser considerado um material universal, de alta dureza. Considera-se que a obtenção de resultados satisfatórios em moagem de alumina pode ser estendida para outros materiais cerâmicos.

Inicialmente foram realizados moagens com tempo inicial de moagem de 96 horas no moinho vibratório e no moinho de rolos. A moagem sobre rolos, equivalente ao conhecido “moinho de bolas” foi planejada para certificar das necessidades do moinho vibratório para pequenas capacidades volumétricas. A moagem por rolos é largamente utilizada e muito prática de ser feita, e requisitos técnicos de moagem precisam ser obtidos para justificar sua substituição.

Figura 3.4 – Jarro para moagem vibratória e sobre rolos feitos em nylon

3.4.1. Carregamento dos jarros

O jarro para moagem vibratória foi preenchido em 75 vol% do total com esferas de ZrO_2 de diâmetro médio de 6,7mm, totalizando 130g de esferas e ocupando 80 vol% (volume aparente) do total do jarro. O volume útil foi considerado até o preenchimento de 80 vol% útil do jarro descontado o volume das esferas e, foi considerado igual a 20ml (Figura 3.5a).

Para moagem sobre rolos (típico moinho de bolas) o jarro foi carregado com seu nível de esferas de ZrO_2 de diâmetro médio de 6,7mm a 45% do diâmetro totalizando 90g de esferas e o nível da suspensão foi completada até 55% do diâmetro (Figura 3.5b). Foi rotacionado a 150 rpm. (GRECOVICH, 1976; e NGK, 1988)

Figura 3.5 - Carregamento dos jarros, e a) para moagem vibratória e em b) para moagem em moinho de bolas.

Suspensão: As suspensões planejadas em 20ml (volume útil) foram elaboradas para uma relação de 30 vol% de sólidos resultando em: 23,88g de alumina 5S-G, 13,70g de água destilada e 0,3 g de dispersante (Dispersal 130).

3.4.2. Análise do tamanho de partículas

As medidas das distribuições dos tamanhos de partículas foram realizadas no equipamento Sedigraph 5000 ET, produzido pela Micromeritics, cedido pela UFSCar. Obteve-se por este equipamento a leitura da distribuição do tamanho esférico equivalente [Figura 3.6].

Figura 3.6 – Sedígrafo 5000 ET - Micromeritics

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO MINI-MOINHO VIBRATÓRIO

Baseado na metodologia apresentada na Figura 3.1 que fora desmembrado na Figura 3.2 e considerando a tabela de correlação apresentada na Tabela 3.1 foi iniciado o processo de projeto do mini moinho.

4.1. Identificação da necessidade

A moagem de pós cerâmicos em dimensão submicrométrica para uso em aplicações avançadas (biocerâmica, cerâmica eletrônica, cerâmica estrutural), quando realizada comercialmente é normalmente feita em grandes quantidades (acima de 4 kilogramas), exigindo moinhos vibratórios de grande porte. Com base em informações levantadas nos centros de pesquisa e profissionais relacionados com pequenas empresas do segmento cerâmico, observou-se que quando há a necessidade de moagem de pequenas quantidades de pós cerâmicos (de 1 a 100g) não há moinhos apropriados para essa pequena quantidade de pós.

Dessa forma, identificou-se a necessidade de um mini-moinho vibratório, para a moagem de pequenas quantidades de pós cerâmicos com volume interno útil de aproximadamente 10 a 300 ml.

O novo conceito foi adaptado de moinhos em escala comercial já desenvolvido no LTC (Laboratório de Tribologia e Compósitos) em 1996. O laboratório conta com informações e recursos para o desenvolvimento deste projeto.

Nesse sentido, o grupo de pesquisa do LTC-USP, já projeta e viabiliza moinhos vibratórios em escala comercial desde 1996. Essa condição assegura os fundamentos para um projeto adaptativo de mini-moinhos vibratórios.

4.2. Estudo da viabilidade física e econômica

Foi levantado um custo inicial para a fabricação de um protótipo de um mini-moinho vibratório estimado em R\$ 6.500,00 de custo de fabricação, valor este compatível com os investimentos previstos em laboratório de alta tecnologia. O Departamento de Engenharia Mecânica conta também com a Infraestrutura para a manufatura do equipamento (oficina mecânica, materiais cerâmicos) e ensaios vibracionais e através das associações conta com o equipamento para análise do tamanho de partículas.

Este valor pode ser dividido entre os subsistemas do conjunto, obtendo-se aproximadamente: R\$3.000,00 para o motor; R\$1.500,00 para a estrutura; R\$2.000,00 para os jarros.

4.3. Concepção do mini-moinho e jarros

A concepção do mini moinho foi dividida em três partes: a geral, que engloba motor; os jarros, onde serão feitos as moagens e o sistema de fixação do jarro.

4.3.1. Concepção do mini-moinho - geral

Primeiramente, teve-se a idéia de se criar um projeto adaptativo do Moinho Vibratório produzido anteriormente no LTC-USP. Logo, manteve-se a base, motor e o isolamento (molas) do moinho desenvolvido em 2004 e apresentado por Fortulan (1994). A diferença principal estaria na capacidade de produção dos pós. Assim, o jarro principal do Moinho Vibratório foi substituído por seis mini-jarros de capacidade de 300ml. Dessa forma, podem-

se moer pós em pequenas quantidades, e seis tipos diferentes simultaneamente. Esboço inicial apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Esboço inicial de um mini-moinho vibratório.

4.3.2. Concepção dos jarros

O projeto do jarro deve levar em consideração a espessura da parede; o revestimento quando for necessário; a tampa e o sistema de fixação da tampa. No atendimento da pequena capacidade volumétrica, foi definida que a capacidade dos jarros deva variar de 10 a 300ml de volume útil. O conceito do projeto é mantido e variado proporcionalmente suas dimensões. Um esboço do jarro é apresentado pela Figura 4.2.

Figura 4.2 – Idéia inicial do Jarro.

As propostas de soluções construtivas, para a concepção dos jarros e o tipo de fixação no sistema mecânico (mini-moinho vibratório) foram levantadas utilizando-se novamente a técnica de Brainstorming, por um grupo de pesquisadores do Laboratório de Tribologia e Compósitos, composto de nove membros, com ou sem o conhecimento técnico especializado. Foram realizadas duas sessões: a primeira, na qual foram levantadas sugestões quanto ao produto jarro, e em uma segunda sessão para a montagem do quadro morfológico, foi discutido os possíveis parâmetros do componente. Para tanto, foram realizadas pesquisas na Internet, Catálogos e, na própria experiência profissional de cada membro da equipe.

As necessidades e sugestões para a concepção e desenvolvimento do componente “Jarro para moagem em mini-moinho vibratório” foram levantadas na sessão de *Brainstorming*, tendo como resultado os seguintes requisitos:

- Volume interno útil;
- Baixa contaminação;
- Eficiência durante a moagem;
- Facilidade de acesso;
- Facilidade de manutenção;

Tipo de fixação do jarro ao mini-moinho de jarros;
 Evitar uso de borracha devido ao amortecimento;
 Fácil fixação, devido à manipulação de pessoas sem muita experiência;
 Processo de fabricação;
 Geometria dos elementos de moagem;
 Não soltar com a vibração
 Tempo de moagem;
 Design funcional e agradável;
 Evitar contaminação;
 Material leve;
 Material da parte externa e interna do jarro;
 Evitar desgaste e aquecimento excessivo durante o processo de moagem.

Uma vez levantadas às necessidades através da aplicação do *Brainstorming*, procurou-se listar os parâmetros associados às necessidades descritas. Em uma segunda sessão de *Brainstorming* foram levantados os seguintes parâmetros e possíveis alternativas de projeto:

Materiais externos: aço; alumínio e poliamida;
 Materiais internos: aço, alumínio, poliamida, cerâmica de alumina, poliuretano;
 Espessura da parede: a menor possível;
 Sistema de fechamento: alças “tipo marmitta”; cônico tipo rolha, alça “do tipo panela de pressão”;
 Sistema de fixação na base: ventosas, rebite, alveolar, grampo, rosca, rosca rápida tipo copo de liquidificador;
 Formato: cilíndrico regular; cilíndrico com forma alta; cantos arredondados;
 Processo de fabricação (parte externa): injeção, usinagem, soldagem.
 Processo de fabricação (parte interna), considerando material cerâmico: prensagem isostática, colagem de barbotina, extrusão, torneamento.

Dessa forma, foi elaborado um quadro morfológico do jarro, para a busca de soluções ou criatividade com ênfase em métodos discursivos. A Tabela 4.1 apresenta previamente o resultado da aplicação dessa técnica, com a opção proveniente da combinação dos parâmetros de projeto.

Tabela 4.1 – Elaboração do Quadro Morfológico para a concepção de múltiplos jarros para moinhos vibratórios.

Parâmetro do 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	ventosa	marmitta	cinta
Sistema de fixação da tampa	rosca	alça	cônico	grampo	rolha	marmitta
Geometria	cilíndrica alta	cilíndrica regular	prisma			
Processo de fabricação	molde	usinagem	injeção	fundição	prototipagem	
Processo de fabricação do interior do jarro	prensagem isostática	colagem de barbotina	extrusão	torneamento		

Os parâmetros de projeto obtidos para os jarros, foram analisados utilizando a técnica de “Vantagem e Desvantagem” para refinar as soluções, considerando-se: custos, dificuldade de fabricação, limitação de espaço. A Tabela 4.2 apresenta uma discussão sobre a forma do vaso e a Tabela 4.3 apresenta esse estudo para o material externo do jarro. Foram cotados custos relativos ao tipo, dimensão e quantidade de material necessária para a fabricação da parte externa dos jarros, na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Quadro de Vantagens e desvantagens da geometria para os jarros.

Materiais externo:	Vantagens	Desvantagens
Cilíndrica regular	Fabricação facilitada	Baixo aproveitamento do volume
Cilíndrica alta	Fabricação facilitada	Melhor aproveitamento do volume
Prisma	Fabricação por soldagem	Baixa homogeneidade da moagem Zonas de acúmulo do material

Foi selecionado o formato cilíndrico alto, pois permite o carregamento em volume regular deixando um excedente para pressurização de eventuais vapores e movimentação do material e dos meios de moagem.

Tabela 4.3 – Quadro de Vantagens e desvantagens dos materiais selecionados para a fabricação da parte externa dos jarros.

MATERIAL EXTERNO DO JARRO

Material externo	Vantagens	Desvantagens
Aço inoxidável	Calandrado e soldado com eletrodo revestido, MIG ou TIG. Custo intermediário Excelente resistência mecânica e à oxidação	Alto custo Soldagem dificultada
Aço carbono	Calandrado e soldado com eletrodo revestido, MIG ou TIG. Baixo custo Excelente resistência mecânica	Alta oxidação - revestimento e manutenção
Alumínio	Fácil se usinado a partir de um <i>blank</i> leve	Custo relativamente elevado Soldagem dificultada
Nylon	Usinagem a partir de blank Resistência mecânica razoável Sem contaminação Não aceita adesivos leves	Custo relativamente elevado Resistência mecânica razoável

Preço de materiais – cotação em 25/05/2005 – em Antari – comércio de Metais Ltda:

Aço Inox SAE 304 – Tarugo 4": R\$24,00/Kg;

Aço Inox SAE 304 – Chapa 1/8": R\$20,00/Kg;

Nylon 6.6 – Tarugo 4”: R\$ 27,00/Kg;

Alumínio – Tarugo 4”: R\$ 20,00/Kg;

Aço SAE 1020 – Tarugo 4”: R\$ 5,00/Kg;

Aço SAE 1020 – Chapa 1/8”: R\$ 4,00/Kg.

Foi selecionado o aço inoxidável (SAE 304) para material externo pela baixa contaminação e manutenção, além de ter aspecto agradável com laboratórios.

Da mesma forma, foi tratado o processo de fabricação dos corpos externo que esta apresentada na Tabela 4.4. Tratando-se de aço inoxidável foi selecionado o processo de usinagem, seguido de calandragem e soldagem.

Tabela 4.4: Quadro de Vantagens e desvantagens para o processo de fabricação do corpo externo do jarro.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Material externo	Vantagens	Desvantagens
Usinagem	Processo econômico para poucas unidades	Perda de material Tempo de fabricação elevado
Injeção	Processo econômico para um número elevado de peças Possibilidade de atender a formas complexas	Matriz de custo muito elevado Aplicável somente em materiais poliméricos
Fundição	Economia de materiais Possibilidade de atender a formas relativamente complexas	Perda das propriedades mecânicas Aplicável a materiais poliméricos e ligas de alumínio
Prototipagem rápida	Possibilidade de atender a formas complexas Se empregada na fabricação de moldes é altamente rentável	Custo elevado Aplicável a poucas peças Resistência mecânica baixa Aplicável praticamente a materiais poliméricos

A Tabela 4.5 apresenta o estudo para o material interno do jarro e as cotações para alguns materiais complementares.

Tabela 4.5 – Quadro de Vantagens e desvantagens dos materiais selecionados para a fabricação da parte interna dos jarros.

MATERIAL INTERNO DO JARRO

Material externo	Vantagens	Desvantagens
Aço inoxidável		Impróprio devido ao desgaste e contaminação
Cerâmica	Alta dureza Inércia química para a maioria das aplicações Alta eficiência de moagem	Fabricação onerosa
Alumínio	Leve	Baixa dureza - imprópria devido ao desgaste
Nylon	Único vaso (sem extremo)	Desgaste: embora não prejudique com contaminação Não contribui com a moagem
Poliuretano	Aplicado como fundição (moldagem no local)	Baixo desgaste Não contribui com a moagem Alto custo
HDPE	Baixo custo	Alto desgaste Não contribui com a moagem

Preço de materiais – cotação em 16/11/2005 – em Compton Ltda.

Poliuretano: Adiprene LF1800A – R\$ 29,47/Kg (proporção 90,1%), venda mínima 22,7Kg; Cuamine M – R\$ 21,56/Kg (proporção 9,9%), venda mínima: 10 Kg. Os demais materiais foram citados e referidos anteriormente.

O material interno do jarro em cerâmica de alta alumina foi selecionado devido ao baixo desgaste, aumento da eficiência de moagem e pela infraestrutura do laboratório disponível para sua manufatura, o que diminui sua principal desvantagem.

A Tabela 4.6 apresenta as discussões sobre o processo de fabricação do interno do vaso em material cerâmico. Para a fabricação interna de cerâmica (alta alumina – 96%) o processo selecionado foi de colagem de barbotina.

Tabela 4.6- Quadro de vantagens e desvantagens para o processo de fabricação do corpo interno do jarro.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO INTERNO CERÂMICO

Material externo	Vantagens	Desvantagens
Prensagem isostática	Excelentes propriedades mecânicas Aplicável a quase todos materiais Boa precisão dimensional	Molde de custo elevado Necessidade de usinagem externa posterior Melhor em lotes de número intermediário
Colagem de barbotina	Custo de fabricação baixo	Baixa precisão dimensional Perdas de processo Acabamento manual Não aplicável a alguns materiais sintéticos (zircônia)
Extrusão	Formas cilíndricas facilitadas	Custo elevado da matriz Aplicável a lotes grandes Necessidade de montagem de partes (fundo)
Torneamento (massa plástica)	Custo muito baixo	Baixa precisão dimensional Baixa propriedade mecânica Dificuldade para materiais sintéticos (alta alumina, zircônia e outros)

Com base nas Tabelas anteriores foram feitos os esboços do molde interno do jarro (de 20 a 300ml de volume útil) que estão apresentados nas Figuras 4.3 a e b.

Figura 4.3- (a) molde interno em perspectiva, (b) corte total do molde interno.

4.3.3. Sistema de fixação da tampa do jarro

Da mesma forma foi elaborada uma tabela com base nas técnicas de vantagens e desvantagens (Tabela 4.7), e em seguida foram elaborados esboços manuais e em CAD do sistema de fixação da tampa nos jarros e geometria, os esboços serviram para melhorar a participação do grupo no processo de geração de idéias.

Tabela 4.7- Quadro de vantagens e desvantagens do sistema de fixação das tampas nos jarros.

SISTEMA DE FIXAÇÃO DA TAMPA

Material externo	Vantagens	Desvantagens
Rosca	Fixação adequada	Tempo elevado de fixação Requer força para aperto e soltura Contaminação com material na descarga do jarro
Alça	Fixação adequada	Requer maior número de peças
Cônico	Fixação incerta	Soltura previsível
Grampo	Fixação adequada	Custo relativamente elevado Peso e volume considerável
Rolha	Fixação adequada	Pressão de vapor gerada pode abrir
Marmita	Fixação adequada	Barulho excessivo Fabricação dificultada para poucas unidades

A configuração comercial mais utilizada é apresentada pela Figura 4.4, nela uma trava é fixada no prolongamento do corpo externo do jarro e é pressionado por um parafuso com braço.

A discussão da melhor fixação da tampa do jarro foi feita hibridizada com o sistema de fixação do jarro na base do moinho.

Figura 4.4 - Montagem comercial da “luva”.

4.3.4. Sistema de fixação do jarro na base do moinho

Aplicando a técnica de *Brainstorming*, foi idealizado um novo quadro morfológico de vantagens e desvantagens que está apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Quadro de Vantagens e desvantagens do sistema de fixação dos jarros na base do moinho vibratório.

SISTEMA DE FIXAÇÃO DA BASE

Material externo	Vantagens	Desvantagens
Rosca	Fixação razoável	Tempo elevado para fixação Possibilidade de travamento
Liquidificador	Fixação razoável Engate rápido	Fabricação dificultada por usinagem (CNC) soltura previsível
Magnético	Fixação rápida	Soltura previsível Alto custo
Ventosa	Fixação rápida	Amortecimento elevado Soltura previsível após muitas horas
Marmita	Fixação rápida	Barulho excessivo Na posição fina afrouxamento de aperto
Cinta	Fixação intermediária	Sistema de aperto requer folga

Nas discussões algumas idéias foram detalhadas e são apresentadas:

Rosca: mostrada pelas Figuras 4.5, mostra uma rosca simples (a) considerada de rápido engate, não havendo a necessidade de nenhuma ferramenta. Porém, com a vibração, a rosca tende a se soltar e perder sua função principal de moagem. Assim surgiu a idéia de adicionar algum sistema semelhante aos de lâmpadas de automóveis (Figura 4.5b), que se apóiam num anel, e sob pressão de uma mola, faz com que o problema de possível afrouxamento, seja eliminado, além de manter as propriedades vantajosas e necessárias da opção anterior, porém de difícil construção, além de exigir muito material e peças, que poderia acarretar num aumento de massa na parte móvel, e conseqüentemente um aumento na complexidade do processo de moagem.

(a)

(b)

Figura 4.5 – Fixação do jarro: (a) rosca simples e com aplicação múltipla; em (b) por pressão com mola e trava.

Liquidificador, a Figura 4.6 mostra uma ilustração desta fixação, considerando um engate rápido comum à maioria dos usuários.

Figura 4.6 - (a) sistema de fixação por engate rápido, (b) detalhe de fixação no jarro

Tipo alça de marmita: a Figura 4.7 apresenta uma ilustração desta opção em (a) em detalhe e múltipla e em (b) uma variação da presilha para o sistema denominado de marmita.

Figura 4.7- Fixação tipo presilha de marmita: em (a) vista em detalhe e múltipla. em (b) variação do tipo de presilha

Outras opções derivativas foram abordadas, discutidas e ilustradas para facilitar a compreensão. A Figura 4.6 mostra um jarro que desliza sobre um guia e uma trava, que o

impede de se deslocar. A Figura 4.9, que pode ser considerada uma variação desta opção anterior, mostra também um guia e uma trava para assegurar o jarro na base móvel.

Figura 4.8 – Fixação derivadas: (a) guia e trava impedem os movimentos do Jarro; (b) alternativa para travamento do Jarro – Outra versão de guia e trava.

Figura 4.9 – Alternativa para travamento do Jarro com trava por base de mola.

Outras opções foram sugeridas como alternativas de travamento do jarro com a base móvel. Um outro conceito de travamento pode ser feito através de uma trava em forma de cunha que possibilita a inclusão do jarro na base. Uma solução derivada que apresenta uma boa funcionalidade é a apresentada na Figura 4.10, onde o jarro apresenta uma aba de sustentação que é alojada na base para a fixação e uma presilha em forma de cunha semicircular é presa aos componentes.

Figura 4.10 – Híbrido de presilha com assento cônico: em (a) jarro na base e em (b) fixação da tampa, o jarro e a base, simultaneamente.

Com base nas informações foi selecionada a solução em que utiliza apenas um sistema de travamento para fixação dos três itens: base móvel, jarro e tampa. A Figura 4.11 ilustra uma possibilidade empregando o sistema de trava apresentado pela Figura 4.10 e a Figura 4.12 ilustra um sistema único de travamento que consiste em prensar a tampa e o jarro contra a base móvel verticalmente. Com a pressão exercida do sistema, o jarro fixa-se sob compressão, por meio da tampa e da base móvel.

Figura 4.11 – Fixação da tampa, jarro e base, simultaneamente através de presilhas: em (a) destaque individual e em (b) aplicações múltiplas.

Figura 4.12 – (a) alternativa para o sistema único de travamento por meio de extensores; (b) alternativa para o sistema único de travamento por meio de presilhas tipo Marmita.

Estes sistemas relacionados acima apresentam resultados eficientes de travamento do jarro em relação à base móvel, porém mais complexos. Isso poderia encarecer o produto se fosse analisado em termos de produção em série. Além disso, vale ressaltar que falta o travamento da tampa em relação ao jarro, que acarretaria em mais um custo adicional na produção.

4.4. Projeto preliminar

4.4.1. Construção de um protótipo

Para otimização dimensional do mini-moinho vibratório foi projetado e construído um protótipo com função de um banco experimental, apresentado pela Figura 4.13.

Neste banco é possível variar a posição do jarro de moagem, a frequência de giro do motor, a altura do jarro com relação à base vibratória. Uma primeira análise foi obtida com o uso de acelerômetros fixados por rosca em um vaso em alumínio similar, construído em escala, com capacidade volumétrica de 50ml. Neste ensaio foi realizado planejamento estatístico de projeto, onde foram determinadas as variáveis significativas, nelas foram classificadas três posições relevantes que foram correlacionadas em moagem de alumina.

Figura 4.13 – Moinho protótipo considerado “banco de ensaios”.

4.4.2. Fabricação do revestimento interno do Jarro

Uma fabricação importante do jarro foi à fabricação do revestimento em cerâmica. O projeto selecionado foi o de colagem de barbotina referente às dimensões da Figura 4.3. As Figuras 4.14 apresentam os esboços dos moldes de gesso, nos quais a retração linear é de 25% e a retração diametral de 21%. Essas estimativas foram obtidas através de um novo *Brainstorming*, no qual foram alterados os diâmetros internos de borda de vedação de 50 [mm] para 60 [mm], e também considerando não ter borda no diâmetro interno do jarro, neste caso a tampa ilustrada na figura 4.14a não é utilizada durante a colagem.

Figura 4.14 - (a) concepção do molde em gesso, (b) desenho do núcleo para o molde de gesso.

A Figura 4.15 apresenta o núcleo do molde fabricado e a Figura 4.16 o molde de gesso e a peça moldada.

Figura 4.15 - Molde externo projetado e fabricado.

(a)

(b)

Figura 4.16 - (a) molde de gesso sendo preenchido, (b) revestimento colado a verde antes do acabamento.

5. RESULTADOS

Foram realizadas inicialmente análises dinâmicas do sistema por onde se identificou a frequência natural do sistema e com o auxílio do planejamento experimental foram exploradas as amplitudes de vibrações em função das variações dos parâmetros de projeto: altura base suporte dos jarros; número de molas; número de pólos do motor e posição do jarro na base.

Posteriormente com base nos resultados dinâmicos foi realizada experimentação de moagem e otimização do projeto e carregamento do jarro.

5.1. Análise Dinâmica

A Figura 5.1 ilustra a protótipo instrumentado para a aquisição de dados.

(a)

(b)

Figura 5.1 – Moinho protótipo para instrumentação: em (a) com acelerômetros nas direções x e y; em (b) esquemático.

Foram realizadas aquisições de dados através dos sensores (acelerômetros e *shaker*) em 4 pontos diferentes do sistema: no próprio jarro, na base superior do mini-moinho nas direções x, y, na base superior na direção z e na base inferior nas direções x, y. A primeira e segunda frequência natural encontradas para a faixa de 0 a 20 Hz, foram de 3,125 Hz e 5,87 Hz, respectivamente. A faixa de frequência foi aumentada para 1000 Hz, obteve-se uma terceira frequência natural de 107,5 Hz. Esses dados foram confirmados com a utilização de uma cabeça de impedância acoplada ao *shaker*, capaz de medir simultaneamente a aceleração e a força no sistema.

Um estudo inicial baseado nas amplitudes das frequências medidas em RMS obtidas em cada ensaio indicou que ocorre um aumento da amplitude de vibração com a redução da altura da base, na qual o jarro é fixado. A Figura 5.2 faz uma predição dessa tendência para três alturas do suporte do motor de 4 pólos.

Figura 5.2 – Variação dos picos de amplitudes de vibração em função das diferentes alturas da base.

Os números mostrados de 1 a 6 são referentes aos ensaios, onde foram analisados com diferentes números de molas – ensaios 1 e 2, com 6 molas; ensaios 3 e 4,

com 9 molas; e ensaios 5 e 6, com 12 molas. O teste, em relação ao número de molas, resultou em uma variação pouco expressiva.

5.2. Montagem da matriz experimental e aquisição dos dados

Com base nos dados do item 5.1, foi montado um planejamento experimental 2^4 com repetição no ponto central com três níveis, para efetuar uma análise exploratória da melhor condição dinâmica para moagem do pó cerâmico. Para isso, foram considerados os seguintes parâmetros de estudo do sistema mini-moinho vibratório: Altura do suporte para fixação dos jarros, número de pólos do motor, número de molas e posição do jarro sobre o suporte no plano x,y (extremidade da base e duas posições mais ao centro do eixo do mini-moinho). Foram considerados três níveis para cada parâmetro, dados pela Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros de entrada e os níveis pré-definidos.

Parâmetros	Níveis		
Altura do suporte [mm]	100	200	300
Número de pólos	4	6	8
Número de molas	6	9	12
Posição do jarro	1	2	3

A matriz experimental planejada baseada nos parâmetros da Tabela 5.1, para as respostas de amplitude em RMS nas direções x, y [g] e angular (θ_x) [rad/s²] é dada pela Tabela 5.2. Cada resposta foi tratada individualmente, com base na teoria de planejamento experimental.

Tabela 5.2 – Matriz experimental para avaliação das respostas dinâmicas do mini-moinho vibratório.

Nº do Exp.	Altura do suporte [mm]	Número de molas	Núm. de pólos	Posição do jarro	X: RMS [g]	Y: RMS [g]	θx: RMS [rad/s²]
6	300	12	8	1	0,00307700	0,00313810	0,015993
8	300	12	4	1	0,01065100	0,01050200	0,016930
4	300	6	4	1	0,01024800	0,01007900	0,016913
2	300	6	8	1	0,00262450	0,00262570	0,016064
12	300	6	4	3	0,01012300	0,01047600	0,016595
10	300	6	8	3	0,00266660	0,00270600	0,015844
17	200	9	6	2	0,00396230	2,90080000	0,014824
18	200	9	6	2	0,00396230	2,90080000	0,014824
19	200	9	6	2	0,00396230	2,90080000	0,014824
9	100	6	8	3	0,00099426	0,00076065	0,014832
11	100	6	4	3	0,00110910	0,00073913	0,016697
3	100	6	4	1	0,00142430	0,00063793	0,016498
1	100	6	8	1	0,00123010	0,00056989	0,014645
15	100	12	8	3	0,00186630	0,00059265	0,014636
13	100	12	4	3	0,00172690	0,00069738	0,016424
5	100	12	8	1	0,00247100	0,00292090	0,014376
7	100	12	4	1	0,00252400	0,00305150	0,016085
14	300	12	4	3	0,01047300	0,00258680	0,015366
16	300	12	8	3	0,00377550	0,00320510	0,014433

Com base na matriz experimental projetada, a Análise da Variância indicou que os efeitos principais e interações (adimensionais) mais significativas que afetam a resposta, neste caso, a amplitude de vibração (RMS) na direção x é em ordem decrescente:

Altura do suporte, com variação adimensional da resposta de $5,037 \times 10^{-3}$;

Número de molas: $3,697 \times 10^{-3}$;

Altura do suporte x número de molas: $3,641 \times 10^{-3}$.

Essa condição implica no fato de que, qualquer variação nesses parâmetros e sua interação provocam mudanças mais significativas na resposta do sistema (amplitude de vibração). O coeficiente de correlação obtido para o ajuste dos pontos experimentais em uma superfície de 1ª. Ordem foi de 74,56%, que pode sugerir regiões de não-linearidade no espaço experimental explorado.

Para a resposta na direção y, o parâmetro de maior influência foi o número de pólos do motor ($1,336 \times 10^{-3}$) bastante distante dos valores obtidos para os outros efeitos principais e interações. O coeficiente de correlação obtido foi de 63,14%, que também

sugere para um estudo posterior a utilização de planejamentos com ordem mais elevada (2ª. Ordem), para melhor caracterização do espaço experimental.

Para a resposta na direção θ_x , o parâmetro de maior influência, assim como na direção y foi o número de pólos do motor ($7,14 \times 10^{-6}$), porém com uma sensibilidade muito menor sobre a resposta (amplitude de vibração), com coeficiente de correlação de 78,98%.

Dessa forma, com os dados levantados, como apresenta o gráfico da Figura 5.2 e os resultados obtidos pelo planejamento experimental, conclui-se inicialmente que a altura do suporte e o número de pólos do motor são os parâmetros que alteram a resposta (amplitude de vibração), e que podem afetar significativamente o processo de moagem do pó cerâmico. Sendo que houve tendência de maior amplitude para posições mais baixa, menor número de pólos do motor (maior rotação) e posições mais distantes do centro de giro do motor.

5.3. Ensaios e resultados de moagem

A cada moagem foi levantada uma curva relacionando a porcentagem de massa e o diâmetro médio equivalente [μm], apresentadas na Figura 5.3. Nela observa-se que a moagem realizada no nível mais baixo, 38 mm, é a que apresenta melhor desempenho, corroborando com a análise de vibrações.

Figura 5.3 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para Massa (%) x diâmetro esférico equivalente (μm)

O diâmetro médio obtido com a posição 38 do nível da base fornece um pó com diâmetro médio equivalente de partícula igual a 2,05 μm com tamanho máximo verificado de 4,40 μm e mínimo de 0,20 μm , com 20% da quantidade de pó abaixo de 1 μm .

A posição 100, o diâmetro médio equivalente foi de 2,30 μm , com diâmetro máximo verificado de 5,20 μm e mínimo de 0,26 μm , sendo que 15% de pó abaixo de 1 μm .

A posição 200, o diâmetro médio equivalente foi de 2,50 μm , com diâmetro máximo verificado de 4,80 μm e mínimo de 0,5 μm , sendo que 7% de pó abaixo de 1 μm .

Na busca por pós submicrométricos, a posição 38 indicou melhores condições de eficiência de moagem. Comparando com a moagem sobre rolos, a Figura 5.3 mostra que o diâmetro médio equivalente obtido foi de 3,8 μm , com diâmetro máximo verificado de 6 μm e mínimo de 0,50 μm , sendo que 3% de pó, encontrou-se abaixo de 1 μm .

5.3.1. Otimização

Ensaio de otimização foram realizados com o objetivo de busca pela obtenção de pó submicrométrico.

Experimento de otimização 01

Utilizando-se o mesmo jarro, com a mesma formulação e quantidade de suspensão, substituíram-se os elementos de moagem (130g de esferas 6,7 mm) por 170g de esferas de zircônia de Ø3 mm, e foi aumentado o tempo de moagem para 120 horas. E seguindo a identificação de menor nível dos jarros abaixou-se para a sub-base (12 mm de altura) e procedeu-se a moagem. Foi conseguido diâmetro médio equivalente igual a 1,6 µm, com 100% das partículas menores que 3,5 µm e maiores que 0,22 µm e 22% das partículas menores que 1 µm, como na Figura 5.4. A substituição dos elementos de moagem resultou em uma área superficial de elementos de moagem aumentada em 160% (passando dos iniciais 0,021 m² para 0,055 m²), relativa ao aumento da quantidade de elementos de 150 iniciais para 2000. O tempo de moagem foi aumentado para 120 horas para comparação com os trabalhos realizados por Fortulan (1996) uma vez que nesta etapa de otimização, com menos experimentos, as perdas de tempo serão menos dispendiosas. Na ocasião, Fortulan (1996) conseguiu diâmetro médio equivalente igual a 0,5 µm, mas empregou suspensão com volume de sólidos igual a 10 vol% (neste trabalho emprega-se volume de sólidos a 30 vol% três vezes mais concentrado) e elementos de moagens cilíndricos de alumina.

Figura 5.4 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para 120 horas de moagem com jarros fixados na sub-base

Experimento de otimização 02

Repetiu-se o experimento de otimização 01, removendo a base suporte, ou seja, eliminando 12 kg de peso adicional. A Figura 5.5 mostra o resultado. Obteve-se diâmetro médio equivalente igual a $1,15\mu\text{m}$ com 100% das partículas menores que $2,8\mu\text{m}$ e maiores que $0,2\mu\text{m}$, sendo que 40% das partículas estavam abaixo de $1\mu\text{m}$. Nota-se enorme evolução com a remoção de peso do sistema. Busca-se, entretanto, por diâmetro médio equivalente menor, na tentativa de se obter partículas submicrométricas.

Figura 5.5 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para 120 horas de moagem com jarros fixados na sub-base.

Experimento de otimização 03

Aumentou-se o peso dos contra pesos individualmente em 230g a massa de cada um, o que significou um aumento de 43% na força centrípeta passando de 747N para 1070N em cada extremidade do motor (Figura 5.6 e Equação 5.1), uma verificação no dimensionamento dos rolamentos permitiu este aumento. A Figura 5.7 apresenta o resultado deste incremento. É observado que dimensões para o diâmetro médio equivalente em 0,7 μm satisfazem o objetivo inicial do trabalho na busca por pós submicrométrico. Obteve-se 100% das partículas abaixo de 2,2 μm e notadamente 23% abaixo de 0,2 μm indicando a presença de considerável fração na escala nanométrica. Este resultado surpreendente indica que a continuidade na otimização bem como a introdução do jarro com revestimento cerâmico pôde levar às escalas nanométricas de dimensões.

A equação para força centrípeta é descrita

$$F_C = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

5.1

Onde: F_c é a força centrípeta em N; m é a massa em kg, ω é a velocidade angular em rad/s; r é o raio de giro do centro de massa em metros.

Na condição inicial tem-se: $m=0,645\text{kg}$; $\omega= 179,058 \text{ rad/s}$; $r= 0,03597\text{m}$. Após peso adicional obteve-se: $m= 0,874 \text{ kg}$; $\omega= 179,058 \text{ rad/s}$; $r=0,03821\text{m}$.

Figura 5.6 - Ilustração do aumento da massa dos contrapesos do motor.

Figura 5.7 – Curva de moagem no mini-moinho vibratório para 120 horas de moagem com jarros fixados na sub-base.

5.4. Projeto definitivo detalhado

A estrutura do produto final do Mini-moinho vibratório levou-se em conta a pesquisa dos vários tópicos apresentados e ainda tendo uma análise ergonômica do produto em relação ao operador.

Lida (1995), expõe questões ergonômicas como manuseio, adaptação ergonômica e características desejáveis, para uma melhor relação homem x máquina. O produto é elaborado e construído para satisfazer as necessidades humanas e é composto de três características básicas:

Qualidade técnica, onde o produto realiza a parte funcional e prática;

Qualidade ergonômica, que visa o manuseio, adaptações antropométricas, informações claras e outros itens de maior conforto ao operador;

Qualidade estética, que envolve formas, cores, e materiais agradáveis visualmente.

A Figura 5.8 ilustra o processo de abertura da tampa do jarro em fases, e o sistema de presilhas que fixam a base móvel, o jarro e a tampa durante a moagem. A pressão é dada através das presilhas engatadas na base móvel contra a tampa do jarro, e o jarro, por sua vez, fica compreendido entre os dois elementos tornando-se totalmente fixos.

As presilhas são compostas por duas partes, unidas por um eixo (Figura 5.8). Esse sistema tem a vantagem de ser unido à base móvel evitando que as presilhas se percam por descuido e até mesmo sejam danificadas. Porém para uma moagem mais otimizada deve-se utilizar todos os jarros fechados e fixados para evitar desbalanceamento do mini-moinho e vibrações das presilhas.

Figura 5.8 – Detalhamento da abertura da tampa do jarro.

Figura 5.9 – Detalhamento da abertura das presilhas.

A vantagem desse sistema está em eliminar um conjunto de fixação, onde aqui se fixam três elementos ao invés de dois. A base móvel fixa o jarro, deixando-o livre somente na direção z, conforme a Figura 5.9. Assim, o torna livre para retirada para carregamentos ou alguma necessidade semelhante, visto que a quantidade de pó a ser moído é pequena, essa função se torna fundamental.

Figura 5.10 – Detalhamento da abertura da tampa do jarro.

Figura 5.11 – Detalhamento da fixação da campana protetora.

Figura 5.12 – Corte frontal, exibindo todo interior.

Figura 5.13 – Corte no jarro.

Figura 5.14 – Vista tridimensional – Corte visualizando contrapeso inferior.

Figura 5.15 – Vistas superior e frontal.

Figura 5.16 – Componentes do Mini-moinho Vibratório em vista explodida.

6. CONCLUSÕES

A expectativa de projeto e fabricação do mini-moinho vibratório voltado para uso em laboratórios e pequenos ambientes de produção foi obtida. Resultados obtidos pelo banco de ensaio apresentaram excelente desempenho, fácil manutenção, fácil operação e custo acessível.

Para moagens de pequenas quantidades o moinho de bolas se mostrou pouco eficiente, pois a energia de impacto provém da queda de suas esferas no interior do jarro e em mini jarros a altura da queda é muito reduzida não gerando energia eficiente para a quebra das partículas. Na experimentação comparativa em 96h de moagem obteve-se diâmetro médio equivalente igual a $3,8\mu\text{m}$ comparado com $2,05\mu\text{m}$ do moinho vibratório não otimizado. Ao contrário no moinho vibratório a força de impacto que é fornecida por um motor vibratório manteve sua eficiência de moagem em pequenos volumes.

O processo de otimização do moinho, com aumento da área superficial das esferas, adicionado ao aumento da força centrípeta dos contrapesos, motor e diminuição da massa, e da parte suspensa do moinho, levou a obtenção de pós submicrométricos com tamanho médio equivalente igual a $0,7\mu\text{m}$ e 23% das partículas menores que $0,2\mu\text{m}$ evidenciando a presença de tamanhos nanométricos.

A introdução de jarro em aço inoxidável e revestimento cerâmico como projetado, certamente levará a uma melhoria na eficiência de moagem.

A análise dinâmica corroborada pela análise da partícula em moagem experimental mostrou que a eficiência de moagem foi superior para menor altura entre base e contra

peso, e maior distância radial do centro para extremidade (limitada pelo protótipo a 140 mm de distância entre o centro de giro do motor para o centro do jarro).

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para continuidade são sugeridos trabalhos futuros, a saber:

Modelagem em CAE do moinho vibratório, uma vez que existem dados experimentais para calibração de um modelo teórico, pode-se realizar um número muito maior de experimentações de otimização e com muito mais rapidez, melhorando o desempenho da otimização;

Verificação da possibilidade de se empregar motores de 2 pólos (3600rpm), uma vez que a força centrípeta proporcional ao quadrado da velocidade angular (equação 5.1);

Experimentação de moagem com o uso do jarro como projetado: em aço inoxidável revestido em cerâmica, acredita-se na diminuição do tamanho médio das partículas, devido a agregação da superfície interna do jarro com agente de desgaste e diminuição do amortecimento da vibração devido ao jarro em aço;

Realizar experimentação para verificar a influência de diferentes morfologias de elementos de moagens (cilíndricos x esféricos) e em diferentes materiais (zircônia x alumina). Espera-se uma modificação na largura da distribuição granulométrica pelo uso do elemento cilíndrico.

Verificar com construção de nova base suporte de jarros a distância de máximo desempenho entre o centro de giro do motor e linha de simetria do jarro;

Verificar a influência do nível do contrapeso superior em relação ao nível suporte dos jarros;

Verificar a influência da desigualdade entre valor da massa dos contrapesos do motor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHBY, M.F. *Materials Selection In Mechanical Design*, Editora Pergamon Press, 311p 1992.

ASIMOW, M. *Introduction To Design*. Irentice Hall, 1962.

BACK, N. *Metodologia de Projetos Industriais*. Ed.Guanabara Dois, 1983.

BARTHEL, K.; ERNST, H.; WEIß, H.; ZOZ, H. Test milling with the prototype of ceramic attritor C01/2Lox. *Interceram*, v.43, n.2, 1994 p99.

BAXTER, M. *Projeto de Produto*. Ed.Edgard Blücher, 2000.

BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. Editora da Unicamp. 2001. 399p.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J.S. *Statistics for experimenters: an introduction to design, analysis and model building*. John Wiley & Sons. p. 1-14; 291-344; 510-552. 1978.

CRISTIANO, J.J.; LIKER, J.K.; WHITE, C.C. Key Factors In The Successful Application Of Quality Function Deployment (QFD). *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol.48, No. 1, February 2001.

CROSS, N. *Engineering design methods: Strategies For Product Design*. John Wiley, 1994.

DIELER, G.E. *Engineering design* Mc Grawtill.

DHILLON, B.S. *Engineering Design: A Modern Approach*. Irwin, 1996.

ERTAS, A.; JONES, J. C. *The engineering design process*. Wiley, 1993.

FORTULAN, C.A.; PURQUERIO, B. M. *Projeto e desempenho de um moinho vibratório para cerâmica avançada*. In: IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, 1996, Recife.

FORTULAN, C.A.; PURQUERIO, B. M. *Seleção, Propriedades E Processamento De Materiais Não-Metálicos Para Projetos Mecânicos*, Ed. EESC-USP, São Carlos 1995.

GRECOVICH, C. *Milling In Ceramic Fabrication Process*. Ed. By Wang, F.F.Y. Ed. Academic Press p.15-33 – 1976.

GREMYR, I.; ARVIDSSON, M.; JOHANSSON, P. *Robust Design Methodology Status In The Swedish Manufacturing Industry. Quality and Reliability Engineering International*, 2003.

ISHITO, C.K. *Powder Classification – Technologies in Ceramics*, *American Ceramic Society Bulletin*. Vol.72, pp.60-63, 1993.

JUNIOR, J.M.; PLONSKI, G.A.; LOURENÇÃO, P.T.M. “O Papel Da Engenharia Simultânea No Aprimoramento Contínuo e Competitivo Da Embraer”. Trabalho apresentado no XVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção.

KISSION, P.; DING H.; JERRAYA A.A. *Structured Design Methodology For High-Level Design*. System-Level Synthesis Group/TIMA/INPG 46 avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cédex, France.

LIDA, I. *Ergonomia – Projeto e Produção*. Edgard Blücher, 1995.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenharia*. Editora LTC. 2003. p.295-346; p. 268-293.

NGK – Alta Tecnologia para indústria cerâmica, tintas e outros segmentos. *Catálogo comercial*: 1988, 10p

PAHL, G.; BEITZ, W. *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer, 1996.
 PARÉ, E.G. *Introduction to Engineering Design*. Halt, Rinehart and Winston, 1967.

PASCUCCI, M.R. E KATS, R. N. "Modern Day Applications Of Advanced Ceramics",
Interceram, vol.42, n2, pp.71-78, 1993.

PRAZAD, B. *Current engineering fundamentals – Integrated product and process organization*. Upper Saddle River, NJ, 1996.

PUGH, S. *Total design: Integrated method for successful product engineering*.
 Addison-Wesley, 1995.

RIBEIRO, M.J.P.M.; ABRANTES J.C.C. *Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de Algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo*. ESTG – IPVC – Portugal. 2001.

RICHERSON, D.W. *Modern Ceramic Engineering, Properties, Processing And Use In Design*, Ed. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 1992.

ROZENFELD, H. *Modelo de Referência para o Desenvolvimento Integrado de Produtos*. Anais do XVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP 1997 / 3RD INTERNATIONAL CONGRESS OF INDUSTRIAL ENGINEERING – Gramado-RS, 1997.

SHEPPARD, L.M.. "Resing Technology – Meets Manufacturing Challenges"
American Ceramic Society Bulletin. Vol73, nº01, p46-53, 1994.

SHAHIN, M.M.A. "Application Of A Systematic Design Methodology: An Engineering Case Study". College Of Engineering, Qatar University, P.O.Box 120104, Doha, Qatar, Arabian Gulf. 1998.

SILVA, E.C.N. "CAD/CAE/CAM", *Mecatrônica Atual*, nº1 – out/nov 2001.

SILVEIRA, Z. C.; CAVALCA, K.L. A methodology based on robust design and optimization statistics for fitting parameters in mechanical systems. *Proceedings 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*. Tianjin, China, April 2004.

SMITH, V. AT AL, Advanced Ceramics: Where do You Go From Here?, American Ceramic Society Bulletin. Vol73, nº 12, pp.49-52. 1994.

SZEGVARI, A. The fine grinding of ceramics with attritors. Interceram. V43. n2. 1994. p97-98.

TAGUCHI, G. Introduction to quality engineering: design quality into products and process. (1986) Trad. por Sekkeisha.6.ed.Tokyo: The Organization.

WANG, F.F.Y. *Ceramic Fabrication Process*. Academic. Press, New York, 1976.

WELLENKAMP, FRANZ-JOSEF. *Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT - (Série Tecnologia Mineral, 75) 1999. 56p. ISBN 85-7227-122-8

WHITFIELD, R. I.; COATES, G.; HILLS, B. *Multi-objective robust concept exploration within the made to order sector*. International conference on engineering design, Munich, 1999.

WOODSON, T. T. *Engineering design*. Berkley, New York, MacGrow-Hill, Book Company, 1966.

[1] <http://www.numa.org.br/conhecimentos> – acesso em 09/2006

[2] <http://www.pauloabbe.com> - acesso em 10/2006

[3] <http://www.abceram.org.br> - acesso em 10/2006

[4] <http://www.acertubos.com.br> - acesso em 10/2006

[5] <http://www.sweco.com/grinding.html> - acesso em 10/2006

[6] <http://www.quimica.com.br/revista> - acesso em 11/2006

ANEXO I

Grupo constituinte das reuniões de *Brainstorm* realizado em 4 seções de 40 minutos cada no primeiro semestre de 2006, na ocasião da disciplina do curso de Pós Graduação intitulada: *Projeto e Manufatura de Componentes Cerâmicos* - SEM 5852.

Carlos Alberto Fortulan – Prof. Dr. Engenheiro de Materiais;

Daniela Gavassa – Professora;

Edelto dos Santos Antunes - Prof. MSc. Médico e Odontologia;

Edgar dos Santos Gomes – Professor.

Fernando Augusto de Lucca – Médico Oftalmológico;

Fernando Luis Schiavon - Engenheiro Mecânico;

Hitoshi Taniguchi – Engenheiro Mecânico;

Roni Cesar de Carvalho – Tecnólogo Mecânico e Designer;

Zilda de Castro Silveira - Dra. Engenheira Mecânica.

Os participantes autorizaram a divulgação dos seus nomes neste trabalho.