

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERRAMENTAL PARA PRENSAGEM HIDRÁULICA DE ESFERÓIDES DE ALUMINA

por

Vilson Menegon Bristot

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, setembro de 2008

FERRAMENTAL PARA PRENSAGEM HIDRÁULICA DE ESFERÓIDES DE ALUMINA

por

Vilson Menegon Bristot
Engenheiro Agrimensor

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos - PUCRS

Prof. Dr. Vilson João Batista – PROMEC - UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro – PROMEC -UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, setembro de 2008

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um ferramental para prensagem hidráulica de esferóides de alumina baseado no processo de fabricação de tijolos de alumina e placas cerâmicas para revestimento, pois até a realização deste, o processo conhecido no mercado para a produção de esferas de alumina, era através da prensagem conhecida como isostática. Estas esferas e esferóides tem o objetivo de servir como corpos moedores para as indústrias cerâmicas e de mineração para o beneficiamento de matérias primas fazendo a redução das partículas do material sólido, sendo que estas esferas e esferóides são introduzidas no interior de um equipamento chamado de moinho de bolas. Então, foi construído um mecanismo adaptativo que faz com que uma prensa hidráulica, que até o momento fazia apenas a compactação de material com formatos quadrados e retangulares com uma determinada espessura, possa produzir compactados com um formato esférico.

O desenvolvimento se deu primeiramente na confecção de um modelo com uma cavidade de compactação obtido através de uma prensa hidráulica manual, sendo possível com esta obter-se esferóides para os testes laboratoriais de densidade aparente e de desgaste, sendo estas duas as principais premissas para o bom desempenho destes corpos moedores nos interiores dos moinhos de desagregação de matéria prima.

Com os resultados de densidade aparente e de desgaste que foram alcançados com os esferóides produzidos a partir do modelo de uma cavidade, foi possível construir um protótipo do ferramental, só que agora com oito cavidades de compactação, e foi instalado este protótipo em uma prensa hidráulica automática para verificar se o seu desempenho em real situação de produção industrial, conseguia-se os mesmos resultados obtidos com o modelo de uma cavidade.

Com isso, constatou-se a viabilidade da utilização do método proposto do ferramental para a prensagem hidráulica de esferóides de alumina, considerando que todos os ensaios experimentais e industriais realizados, se comportaram com igualdade ou superioridade às esferas produzidas no método tradicional que é através da prensagem isostática.

ABSTRACT

“TOOL FOR HYDRAULIC PRESSING OF SPHEROIDS MADE OF ALUMINA”

This paper describes a work where a tool for hydraulic pressing of spheroids made of alumina was developed based on the process of making bricks and making ceramic boards for covering. This work was carried on because so far, the known process in the market for production of spheres made of alumina was through a pressing known as isostatic. These spheres and spheroids have the function to serve as grinder bodies in the ceramic and mining industries for the improvement of raw material resulting in the reduction of particles of the solid material, that is, these spheres and spheroids are put inside an equipment called balls mill. So, an adaptive mechanism was built to make the hydraulic press, which so far performed only the compaction of material of square and rectangle shapes with a determined thickness, producing compacted ones of a spherical shape.

At first, the development started with the construction of a model containing one cavity of compaction obtained through a manual hydraulic press, which provided spheroids for the lab tests of ostensible density and abrasion, which are considered the main premises for the good performance of these grinding bodies inside the mills for dissolution of raw material.

With the effects as of density apparent and as of wear and tear than it is to have been ranging with the spheroids produced from the template from a crevice, and compared with the values of the balls manufacture traditionally, he went feasible assembly um target system from the tool was built containing not one, but eight cavities of compaction and it was installed inside an automatic hydraulic press to verify if its performance in real situation of industrial production, could reach the same results obtained with the model with one cavity.

By doing that, the viability of the use of the tool proposed method for hydraulic pressing of spheroids made by alumina was proved, taking to account that all the experimental and industrial tests performed behaved equally as, or superiorly than the spheres produced in the traditional method, which is through isostatic pressing.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Justificativa do trabalho.....	1
1.3. Objetivos do trabalho.....	2
1.4. Delimitação do tema.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. O processo cerâmico.....	5
2.2. O processo de moagem.....	16
2.2.1. Princípios da redução de tamanho.....	16
2.2.2. Procedimentos de desintegração mecânica de materiais.....	17
2.2.3. Moagem com moinhos de bolas.....	18
2.2.4. Moagem por via úmida.....	19
2.2.5. Moinho de bolas.....	20
2.2.6. Carga de bolas ou seixos utilizadas nos moinhos.....	21
2.2.7. Distribuição do tamanho de bolas.....	22
2.2.8. Quantidade de produto a moer.....	22
2.2.9. Densidade.....	22
2.2.10. Viscosidade.....	22
2.2.11. Velocidade do moinho.....	23
2.2.12. Tempo de moagem.....	23
2.2.13. Moagem por via a seco.....	23
2.3. O processo de prensagem isostática.....	24
2.3.1. Moldes para prensagem isostática.....	28
2.4. O processo de prensagem uniaxial.....	29
2.4.1. Constância na força de prensagem.....	34
2.4.2. Características do pó.....	35
2.5. Metodologia para desenvolvimento de projetos.....	35
2.5.1. Projeto Conceitual.....	36

2.5.2. Projeto Executivo Detalhado.....	39
2.5.3. Otimização do Projeto.....	41
3. O PROJETO DO FERRAMENTAL.....	43
3.1. Conformação do pó.....	43
3.2. Metodologia e projeto.....	43
3.3. Materiais e Métodos.....	44
3.4. Reconhecimento da necessidade.....	44
3.5. Definição do problema.....	45
3.6. Projeto Preliminar.....	46
3.7. Construção de um modelo e ensaios experimentais.....	49
3.7.1. Avaliação de desempenho do modelo.....	53
3.7.2. Otimização dos esferóides do modelo.....	58
3.8. Construção de um protótipo.....	59
3.8.1. Ensaios experimentais do protótipo.....	66
3.8.2. Avaliação do desempenho do protótipo.....	67
3.8.3. Otimização dos esferóides do protótipo.....	72
4. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES DO PROJETO.....	75
5. CONCLUSÕES.....	76
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	77
REFERÊNCIAS.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

APC	Alumina para cerâmica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
D	Densidade dos seixos (g/cm ³)
%D	Percentual em massa de desgaste das bolas (%)
EDAM	Ensaio de densidade aparente do modelo
EDAP	Ensaio de densidade aparente do protótipo
EDM	Ensaio de desgaste do modelo
EDP	Ensaio de desgaste do protótipo
Md	Massa (após moagem) da bola (g)
Mq	Massa da bola queimada (g)
Ms	Massa da bola submersa (g)
PH	Prensa hidráulica
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo cerâmico: (a) fluxograma; (b) desenho representativo dos processos (BRISTOT, 1996).....	6
Figura 2.2 – Moinhos de bolas (BRISTOT,1996).....	7
Figura 2.3 – Atomizador: (a) sistema físico; (b) vista esquemática (BRISTOT, 1996).....	8
Figura 2.4 – Prensa hidráulica cerâmica (SACMI, 2008).....	9
Figura 2.5 – Secador vertical: (a) vista esquemática; (b) sistema físico (SACMI, 1996).....	11
Figura 2.6 – Linha de esmaltação (BRISTOT, 1996).....	12
Figura 2.7 – Aplicação de esmalte (véu campana) (KINGERY, 1998).....	13
Figura 2.8 – Serigráficas: (a) Rotativa; (b) Plana (KINGERY, 1998).....	14
Figura 2.9 – Forno a rolo (BRISTOT, 1996).....	15
Figura 2.10 – Zona de classificação, embalagem, paletização e expedição (KINGERY, 1998).....	16
Figura 2.11 - Desintegração mecânica de materiais (KINGERY, 1976).....	17
Figura 2.12 – Moinho de bolas (RIBEIRO, 2001).....	20
Figura 2.13 – Constituição de um molde isostático.....	25
Figura 2.14 – Prensa isostática.....	26
Figura 2.15 - Líquidos pressurizados no interior do vaso.....	26
Figura 2.16 – Esquema do processo de prensagem isostática <i>dry bag</i> ou <i>fixed bag</i> . Da esquerda para a direita, as etapas de alimentação do molde, prensagem e extração do compactado (REED, 1995).....	27
Figura 2.17 – Esquema do processo de prensagem isostática <i>wet bag</i> ou <i>free bag</i> . Da esquerda para a direita, as etapas de alimentação do molde, prensagem e peça compactada (REED, 1995).....	27
Figura 2.18 - Moldes para prensagem isostática: (a) contração e (b) contração / expansão. (McENTIRE, 1984).....	29
Figura 2.19 – Prensagem uniaxial de ação simples (AMARÓS (A), 2000).....	30
Figura 2.20 – Prensa hidráulica para fabricação de revestimentos cerâmicos: (a) sistema físico; (b) vista esquemática (SACMI, 2008).....	32

Figura 2.21 – Sistema de alimentação e distribuição da massa: (a) carro alimentador; (b) grelha do carro alimentador (SACMI, 2008).....	33
Figura 2.22 – Molde de prensas para fabricação de revestimentos cerâmicos (SACMI,2008).....	34
Figura 2.23 – Etapas de desenvolvimento de um projeto (Pahl e Beitz, 1996).....	36
Figura 2.24 – Etapas do projeto conceitual (Pahl e Beitz, 1996).....	37
Figura 2.25 – Etapas do projeto executivo detalhado (Pahl e Beitz, 1996).....	39
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia proposta (BACK, 1983).....	45
Figura 3.2 – Esboço inicial do projeto.....	46
Figura 3.3 – Esboço do ferramental.....	46
Figura 3.4 – Matriz de correlação.....	47
Figura 3.5 – Método morfológico aplicado para a solução.....	49
Figura 3.6 – Modelo do ferramental: (a) sistema físico; (b) vista esquemática.....	50
Figura 3.7 – Prensa hidráulica manual.....	51
Figura 3.8 – Representação do esferóide compactado no ferramental do modelo.....	52
Figura 3.9 – Esfera produzida com prensagem isostática.....	52
Figura 3.10 – Colarinho formado no esferóide após a prensagem hidráulica.....	53
Figura 3.11 – Equipamento e balança para teste de densidade aparente.....	54
Figura 3.12 – Ranhura no esferóide após 24 horas do teste de desgaste.....	57
Figura 3.13 – Aplicação de esmalte branco e preto para teste de qualidade do esmalte em placa cerâmica.....	58
Figura 3.14 - Prova de compactação com massa cerâmica produzida através dos corpos moedores compactados através da prensagem hidráulica do modelo.....	59
Figura 3.15 – Prensa hidráulica modelo PH 400 INCO.....	60
Figura 3.16 – Caixa matriz de tijolos de alumina para revestimentos.....	61
Figura 3.17 – Ferramental para prensagem hidráulica de esferóide de alumina: (a) vista esquemática; (b) sistema físico.....	62
Figura 3.18 – Detalhe caixa matriz.....	63
Figura 3.19 – Fixação da caixa matriz na travessa central da prensa hidráulica.....	64
Figura 3.20 – Seqüência dos elementos de contato da ferramenta.....	65

Figura 3.21 – Fixação dos punções superiores nas placas.....	66
Figura 3.22 – Esferóide compactado no protótipo.....	69
Figura 3.23 – Esferóides retirados do ferramental.....	70
Figura 3.24 – Curva de queima utilizada no trabalho.....	71
Figura 3.25 – Teste de desgaste após 96 horas de serviço.....	71
Figura 3.26 – Esferóides compactados e sinterizados: (a) prensagem hidráulica; (b) prensagem isostática.....	72
Figura 3.27 - Aplicação de esmalte em placas cerâmicas (esmalte teste produzido com esferóides compactados em prensa hidráulica).....	73
Figura 3.28 - Aplicação de esmalte e corantes em placas cerâmicas (esmalte teste produzido com esferóides compactados em prensa hidráulica).....	73
Figura 3.29 - Prova de compactação com massa cerâmica produzida através dos corpos moedores compactados através da prensagem hidráulica do protótipo.....	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Critérios de avaliação do projeto executivo (Pahl e Beitz, 1996).....	41
Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de densidade e desgaste dos esferóides produzidos com o modelo do ferramental.....	56
Tabela 3.2 – Comparação de densidade aparente e desgaste das esferas / esferóides obtidos pelos diferentes processos (modelo).....	57
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de densidade e desgaste dos esferóides produzidos com o protótipo do ferramental.....	68
Tabela 3.4 – Comparação de densidade aparente e desgaste das esferas / esferóides obtidos pelos diferentes processos (protótipo).....	69

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O processo de moagem de uma indústria cerâmica é de fundamental importância dentro de uma linha de produção de peças cerâmica. Este processo começa com a seleção das matérias-primas que devem formar parte da composição de partida. Nos produtos cerâmicos, as matérias-primas utilizadas são fundamentalmente: argilas, caulins, quartzos, carbonatos e aluminas.

Na indústria cerâmica, as matérias primas podem ser utilizadas tal como são extraídas da jazida, ou depois de submetê-las a um tratamento mínimo. Sua procedência natural exige, na maioria dos casos, uma homogeneização prévia que assegure a continuidade das características da matéria prima.

Uma vez realizada a primeira mistura dos distintos componentes da massa cerâmica, esta será submetida a um processo de moagem, que pode ser “via seca” ou “via úmida”, onde este último é o objeto de estudo.

O material resultante da moagem apresenta algumas características distintas se for efetuado por via seca ou via úmida. No primeiro caso produz-se uma fragmentação, mantendo-se tanto os agregados como os aglomerados de partículas, sendo o tamanho de partículas resultante (existem partículas maiores de 300 micrometros) superior ao obtido por via úmida (todas as partículas são menores de 200 micrometros).

O procedimento que tem melhores resultados técnicos é o da via úmido. Neste processo, as matérias-primas são introduzidas total ou parcialmente em moinho de bolas.

Tendo em vista o uso de moinhos de bolas para moagem a úmido de massa para indústria cerâmica, seria interessante que se verificasse a possibilidade do projeto e desenvolvimento de um novo sistema de produção de elementos de moagem (moedores rolantes) para homogeneização das matérias primas com confiabilidade e custo acessível.

1.2. Justificativa do trabalho

Na prensagem isostática de pós cerâmicos para a fabricação de esferas de alumina, tem-se uma produção muito inferior em relação a produção de placas cerâmicas com a metodologia de prensagem hidráulica, e isto se deve ao fato da complexidade do processo isostático.

Atualmente, a fabricação de esferas de alumina só é executada através do processo isostático, isso porque sua característica física é bem mais complexa que a prensagem hidráulica, pois enquanto na prensagem isostática consegue-se obter o prensado em forma esférica, o processo hidráulico simplesmente tem as características retangulares, quadradas ou redondas (tipo bolacha), com uma determinada espessura.

1.3. Objetivos do trabalho

- Desenvolver um ferramental específico para a prensagem hidráulica de esferóides de alumina, saindo do método tradicional de prensagem de esferas onde sua característica esférica é obtida através de prensagem isostática.
- Aumentar a capacidade de produção de corpos moedores de alumina nas linhas produtoras e solucionar a baixa produção de esferas de pequeno porte ocasionada pela prensagem isostática, aumentando o faturamento com a venda de corpos moedores
- Fazer a utilização de prensas hidráulicas, que já foram descartadas para a produção de placas cerâmicas pois a capacidade das mesmas não mais condiz com a realidade do mercado, e que estão ociosas dentro das empresas cerâmicas;

1.4. Delimitação do tema

Este visa desenvolver e implementar uma nova metodologia de fabricação de esferóides de alumina para indústrias cerâmicas, indústrias de mineração e fábricas de insumos para cerâmica.

Dentro das unidades produtoras de cerâmica, normalmente placas de revestimentos, tem-se uma com características um pouco diferente, pois a mesma produz esferas de alumina, sendo estas esferas cerâmicas responsáveis para a moagem e homogeneização de argilas e esmaltes para indústria cerâmica e ou também utilizada para moagem de minérios.

A palavra alumina, apesar de ser um termo químico específico para definir o óxido de alumínio, possui uma grande diversidade de tipos na prática comercial.

Por meio de um processo controlado de calcinação do hidróxido de alumínio, obtêm-se diversificada linha de aluminas calcinadas que são empregadas em diversas indústrias. Apresenta

grande inércia química, sendo considerada um óxido refratário pela sua capacidade de resistir a elevadas solicitações térmicas sem sofrer alterações significativas na sua natureza química.

Suas principais aplicações são:

- Indústria de refratários e fibras cerâmicas;
- Indústria vidreira, esmaltes, fibras e revestimentos cerâmicos;
- Indústria cerâmica de alta-alumina;
- Matéria-prima para produção de aluminas, mulita e eletrofundidos;
- Indústria de abrasivo e polimento (aluminas de polimento).

Todos os produtos apresentam-se na forma de grãos cujos tamanhos variam desde alguns centímetros até poucos micrômetros. Na classificação ASTM de malhas, a granulométrica corresponde desde 3/8" até malha 1000 (BRISTOT, 1996).

Alumina é um produto que utiliza o óxido de alumínio como matéria prima básica, em percentuais superiores a 85%. É encontrado em várias formas, sendo as principais a alumina-gama e a alumina-alfa. A alumina chamada de beta contém pequena quantidade de óxido alcalino. O óxido de alumínio puro apresenta ponto de fusão de 2020°C.

A alumina calcinada, ou alta-alumina, é produzida industrialmente pela calcinação relativamente intensa do hidróxido de alumínio, que é obtido a partir da purificação da bauxita através do chamado processo Bayer.

O processo Bayer consiste resumidamente:

- No tratamento da bauxita com hidróxido de sódio em tanques pressurizados e aquecidos a 145 °C (digestores), resultando uma solução de aluminato de sódio e uma lama vermelha insolúvel, onde se concentram as impurezas;
- A lama vermelha é decantada e filtrada e a solução de aluminato de sódio é nucleada com cristais de gibsita e resfriada, obtendo dessa forma a gibsita;
- A gibsita é calcinada em fornos rotativos à temperatura de aproximadamente 1000 °C.

A alumina proveniente do processo Bayer é constituída por aglomerados fortes, os quais não são espontaneamente separados em água, mesmo sobre agitação. Assim necessita-se da moagem para liberação das partículas primárias. A moagem dificilmente quebra as partículas primárias, mas fratura os aglomerados. Este fato limita o processo de diminuição quase exclusivamente à ruptura de aglomerados. Esta ruptura implica em benefícios ao compactado e ao processo.

Propriedades do produto final, tais como microestrutura fina e as altas resistências mecânicas estão estreitamente relacionadas com a moagem, pois requerem pequenos tamanhos de partículas.

As partículas de alumina gama ou alfa constituem-se de aglomerados de cristais com baixa área superficial. Este processo produtivo confere a alumina calcinada elevada estabilidade química e térmica constituindo-se, portanto, em uma excelente matéria prima para composição da matriz de refratários e para produção de corpos cerâmicos de alumina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O processo cerâmico

A arte da cerâmica se perde nos tempos. Com a invenção do torno no Antigo Egito, a fabricação da cerâmica tem andado em passos consideráveis. Na atualidade fica-se maravilhados pela beleza e a perfeição das peças tanto artísticas como utilitárias que foram fabricadas pelas distintas civilizações da antigüidade. Desde a Idade Média até nossos dias, a cerâmica tem-se condicionado pelos distintos aspectos da vida cotidiana.

A palavra cerâmica vem do grego *Keramos*, que referia-se especificamente ao vasilhame em terracota. Atualmente este termo é empregado a tudo que se fabrica com matéria-prima argilosa (KINGERY, 1998).

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos é composto de várias etapas, que vão sendo executadas seqüencialmente até obter o produto final. Uma dessas etapas é a moagem de matérias-primas.

O processo de fabricação de produtos cerâmicos “tradicionais”, entre os quais estão incluídos os pavimentos e revestimentos cerâmicos, se desenvolve normalmente em três fases sucessivas:

- a) preparação das matérias primas,
- b) conformação da peça,
- c) tratamentos adicionais para conferir ao produto as propriedades finais desejadas, como submetê-lo à secagem e à queima uma ou mais vezes.

Na Figura 2.1, apresenta-se o fluxograma e um desenho representativo que mostra o processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, onde foram realizados os experimentos práticos desta dissertação.

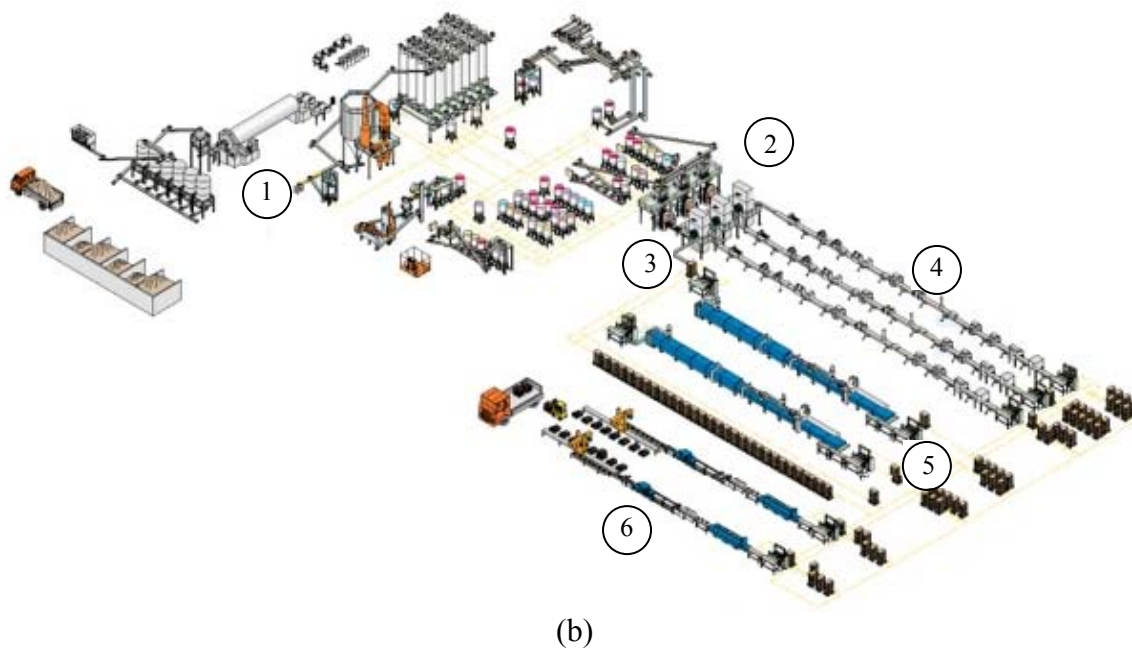
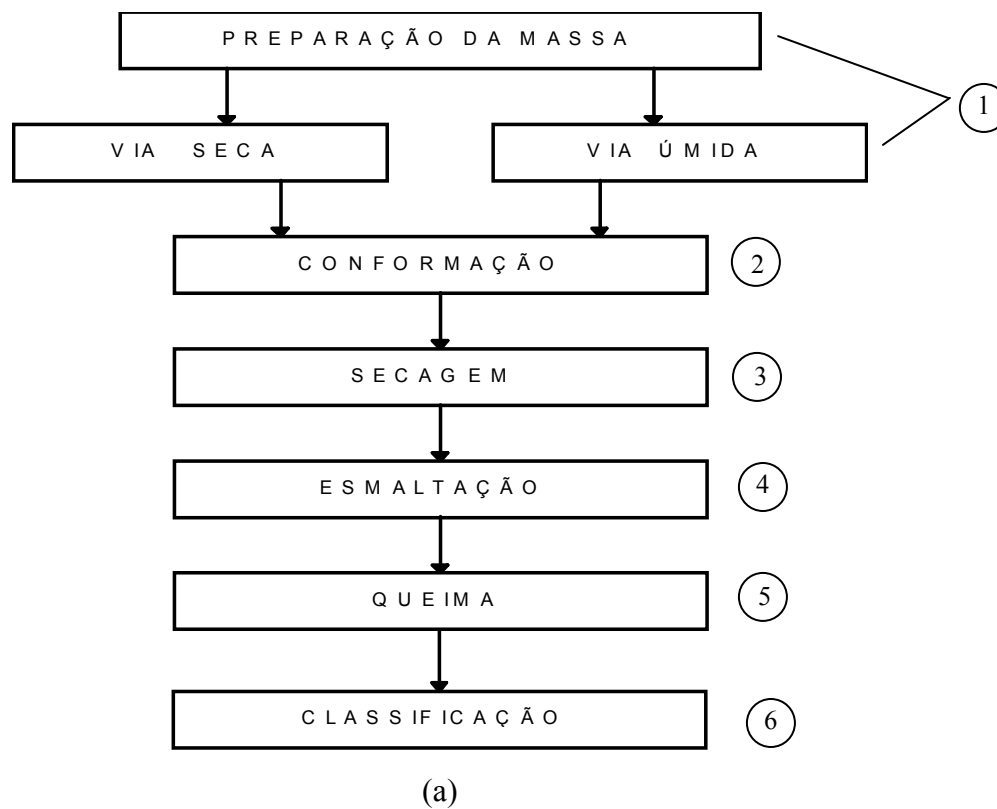


Figura 2.1 – Processo cerâmico: (a) fluxograma; (b) desenho representativo dos processos (BRISTOT, 1996).

Primeiramente na preparação da massa o objetivo do processo de moagem é a diminuição do tamanho das partículas de um material sólido, tendo em vista o aumento da superfície específica para melhorar a velocidade de reação de determinada matéria-prima (por exemplo, durante a queima), misturar de um modo mais uniforme vários materiais (durante o processo de preparação de uma pasta) e permitir a obtenção de um pó com as características ideais de utilização (por exemplo nos corantes). Sabe-se também que o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e comportamento dos materiais ao longo do processo de fabricação, como por exemplo: no comportamento reológico, na conformação, na queima e nas características finais do produto. De um modo geral, o rendimento da moagem é influenciado pelas características da própria matéria-prima, nomeadamente (RIBEIRO, 2001):

- Dimensão e forma inicial das partículas,
- Dureza do material (resistência à compressão, ao choque e à abrasão),
- Estrutura homogênea ou heterogênea,
- Umidade ou higroscopicidade,
- Sensibilidade à variação da temperatura,
- Tendência à aglomeração.

Esta etapa do processo é realizada pelos moinhos de bolas (Figura 2.2)



Figura 2.2 – Moinhos de bolas (BRISTOT, 1996).

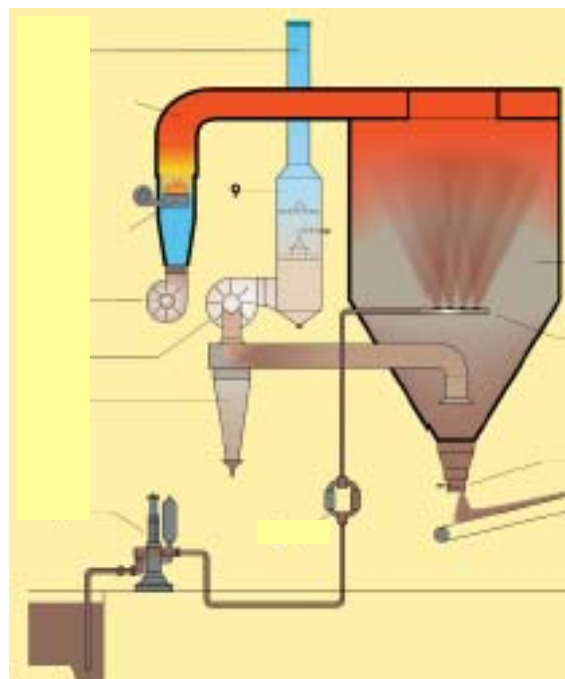
O moinho de bolas é um equipamento de moagem bastante utilizado na indústria cerâmica, nomeadamente para a moagem de pastas, ou dos seus componentes duros (principalmente em

cerâmica de pavimentos, revestimentos, sanitários, louça utilitária e decorativa). A moagem neste tipo de moinhos pode ser a seco ou úmido, e o processo pode ser contínuo ou intermitente, embora o mais comum na indústria cerâmica seja a moagem descontínua e a úmido. Estes moinhos são constituídos por um cilindro oco, de metal, com um eixo na posição horizontal sobre o qual é impresso um movimento de rotação.

Da suspensão resultante será eliminada uma parte da água, até alcançar o conteúdo de umidade necessário para cada processo. O método mais utilizado na fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos é a secagem por atomização (Figura 2.3).



(a)



(b)

Figura 2.3 – Atomizador: (a) sistema físico; (b) vista esquemática (BRISTOT, 1996).

Entre os diferentes métodos de moldar peças empregados pela indústria cerâmica, dos que usa-se pressão, a prensagem hidráulica (Figura 2.4) é o mais estendido, visto que com ele consegue-se dois objetivos primordiais em toda a fabricação, os quais são: grande rendimento da produção, pela facilidade de automatizar e boas características dos produtos acabados.



Figura 2.4 – Prensa hidráulica cerâmica (SACMI, 2008)

Na cerâmica este método divide-se segundo o conteúdo de umidade: prensado à úmido, semi-seco e seco, dentro de alguns limites. O último termo indicado "prensado à seco", é aplicado impropriamente, visto que o material à prensar, raramente está isento de umidade, variando o conteúdo da mesma entre 2 e 7%. Esta expressão é usada com o único fim de diferenciar este método de formação do semi-seco e úmido, visto que os conteúdos em umidade variam geralmente de 7 à 20%.

O prensado à seco, é o método empregado pelas indústrias de pavimento e revestimento cerâmicos, principalmente pelos seguintes motivos: em primeiro lugar facilita a secagem das peças, eliminando-se praticamente a contração de secado, e assim obtem-se peças com uma grande exatidão dimensional; em segundo lugar, porque dos processos de prensado, é o que diferencia-se pela maior produtividade (NEGRE, 19968).

Na prensagem se executa contemporaneamente três condições:

- Formação da massa: no sentido de dar à matéria-prima, inicialmente sem forma própria, uma geometria bem definida e adequada.
- Compactação da massa: no sentido de dar consistência à matéria-prima, resistência à cru e em queimado à todas as solicitações mecânicas, químico-físicas a que o material é sobreposto.
- Adensamento: no sentido de limitar os vazios existentes entre as partículas de massa.

Os principais objetivos da operação de prensagem são:

- Moldar as peças com a geometria e dimensões pré-estabelecidas, para que estas não apresentem à cru ou queimado aqueles defeitos que são diretamente imputáveis a uma incorreta realização desta operação. Entre estes defeitos cabe destacar as laminações, fissuras e deformações que podem aparecer tanto na peça recém moldada como nas distintas etapas do processo de fabricação. A distribuição não homogênea do pó nos alvéolos dos estampos ou uma falta de reprodutibilidade no desenrolar global desta operação, são as causas destes defeitos.
- Contribuir na configuração de uma microestrutura na peça crua, que cumpra os seguintes requisitos:
 - Proporcionar à peça depois de seca, a resistência mecânica suficiente para seu processamento à cru.
 - Conferir à peça durante a etapa de pré-aquecimento da queima, a permeabilidade necessária para que todas as reações vinculadas a uma transferência de matéria (desidratação, oxidação da matéria orgânica, decomposição de carbonatos, etc.) sejam completas no ciclo previsto.
 - Permita alcançar no produto queimado, as propriedades com as características requeridas.

A peça cerâmica uma vez conformada será submetida a uma etapa de secagem, com o fim de eliminar a água contida, procurando que não sejam produzidos defeitos.

Normalmente nos secadores industriais (Figura 2.5), o calor necessário para efetuar a secagem das peças é introduzido predominantemente por convecção, sendo que esses gases quentes podem ser gerados numa fornalha e/ou do ar de recuperação do forno (SACMI, 1996).

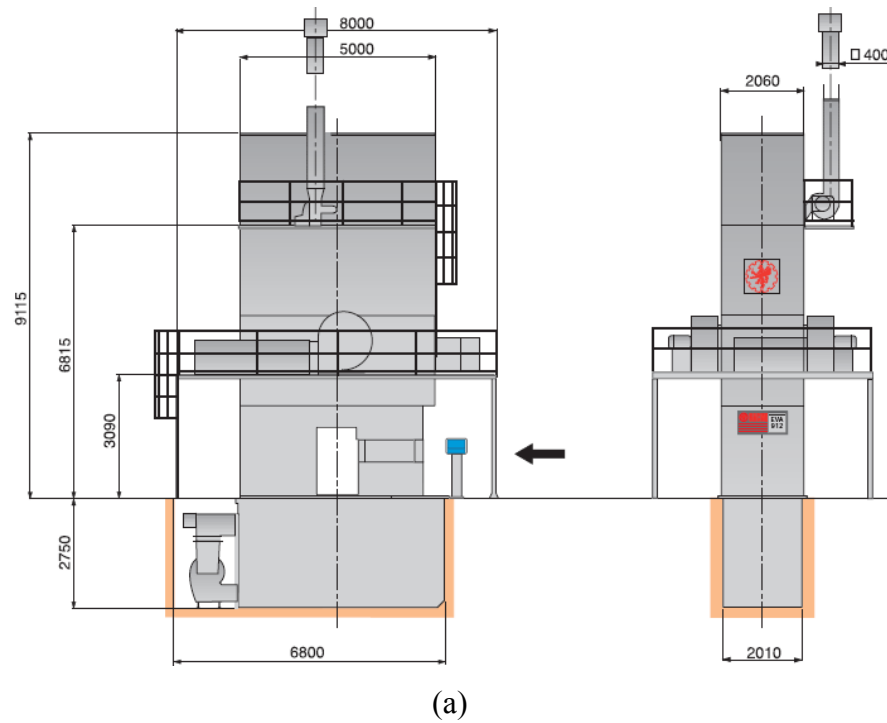


Figura 2.5 – Secador vertical: (a) vista esquemática; (b) sistema físico (SACMI, 1996).

Nos produtos não esmaltados, logo após a etapa de secagem realiza-se a queima. Nos produtos esmaltados, a etapa seguinte a secagem é a de esmaltação.

A esmaltação consiste na aplicação, por distintos métodos, de uma ou várias camadas de vidro com uma espessura compreendida entre 75 a 500 micrometros no total, que cobrirá a superfície da

peça. Este tratamento será realizado para conferir ao produto queimado uma série de propriedades técnicas e estéticas, tais como:

- impermeabilidade;
- facilidade de limpeza;
- brilho;
- cor;
- textura;
- resistência química e mecânica.

A natureza da camada resultante é essencialmente vítrea, mas em muitas ocasiões, inclui-se elementos cristalinos em sua estrutura.

O vidrado é composto por uma série de matérias primas inorgânicas e sílica como componente fundamental (formador de vidro).

Dependendo do tipo de produto, de sua temperatura de queima, dos efeitos e propriedades a conseguir no produto acabado, formula-se uma ampla variedade de esmaltes. Em outros processos cerâmicos (porcelana artística, sanitários), utilizam-se na formulação de vidrados única e exclusivamente matérias primas cristalinas, naturais ou de sínteses, que introduzem os óxidos necessários. Em contrapartida, nos processos de pavimentos e revestimento cerâmicos tem-se usado matérias primas de natureza vítrea (fritas), preparadas a partir dos mesmos materiais cristalinos submetidos previamente a um tratamento térmico de alta temperatura.

A esmaltação das peças cerâmicas realiza-se via um processo contínuo (Figura 2.6).



Figura 2.6 – Linha de esmaltação (BRISTOT, 1996).

Os métodos de aplicação mais usados na fabricação destes produtos cerâmicos (KINGERY, 1998), são:

a) Pulverização: é um dos procedimentos mais generalizados para qualquer tipo de produto. Exige uma grande uniformidade nas características da barbotina (argila ou vidro com consistência pastosa) de esmalte utilizada, para assegurar a uniformidade de produção. Existem equipamentos manuais, automáticos e robotizados. As principais características que devem ser levadas em conta, são: reologia (densidade e viscosidade), pressão do ar e da barbotina, alimentação da barbotina, desenho, número e distribuição das boquilhas, granulometria do esmalte, capacidade de absorção do suporte e temperatura. A aplicação do esmalte mediante um disco que gira a uma velocidade elevada é uma das técnicas mais empregadas na fabricação de pisos. Por este procedimento resultam gotas um pouco maiores do que quando a pulverização se efetua mediante boquilhas a pressão.

b) Em cascata ou cortina: a peça recobre-se de esmalte ao passar por debaixo de uma cortina de barbotina. Os dispositivos mais correntemente utilizados para este tipo de aplicação são os denominados de “campana” e de “fileira”. As características reológicas do material são muito importantes, neste caso, para assegurar a uniformidade na aplicação. As peças devem ser necessariamente planas, aplicando-se o esmalte unicamente na parte superior (Figura 2.7).



Figura 2.7 – Aplicação de esmalte (véu campana) (KINGERY, 1998).

c) A seco: tem-se desenvolvido uma série de aplicações baseadas na utilização do esmalte moído a seco ou bem granulado. Este tipo de esmalte permite conseguir efeitos estéticos denominados “mármore”, “granito”, etc..

d) Decorações: entre as técnicas decorativas aplicáveis às peças cerâmicas, destacam-se a serigrafia, as calcomanias e a estamperia por tampão. A serigrafia é a técnica mais utilizada na fabricação de pavimentos e revestimentos, devido a sua facilidade de aplicação nas linhas de esmaltação. Esta técnica utiliza-se tanto em monoqueima como em biqueima e terceira queima, e consiste na seqüência de um determinado desenho que se reproduz por aplicação de uma ou várias telas sobrepostas (telas tensionadas de uma luz de malha determinada). Estas telas apresentam a tonalidade de sua superfície fechada por um produto endurecedor, deixando livre de passagem unicamente o decalque que se irá reproduzir. Ao passar sobre a tela, um elemento que exerce pressão (espátula), obriga a pasta serigráfica a atravessá-la, caindo a impressão sobre a peça (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Serigráficas: (a) Rotativa; (b) Plana (KINGERY, 1998).

Depois da etapa de esmaltação, realiza-se a queima do vidrado. A queima dos produtos cerâmicos é uma das etapas mais importantes do processo de fabricação, já que dela dependem grande parte das características do produto cerâmico: resistência mecânica, estabilidade dimensional, resistência aos agentes químicos, facilidade de limpeza, resistência ao fogo, etc..

As variáveis fundamentais a considerar na etapa de queima são : o ciclo térmico (temperatura x tempo) e a atmosfera do forno, que devem adaptar-se a cada composição e tecnologia de fabricação, dependendo do produto cerâmico que se deseja obter.

A queima rápida de pavimentos e revestimentos cerâmicos realiza-se, atualmente, em fornos monoestrados de rolos, que têm permitido reduzir de forma significativa a duração dos ciclos de queima até tempos inferiores aos 40 minutos, devido à melhora dos coeficientes de transmissão de calor das peças e à uniformidade e flexibilidade dos mesmos (Figura 2.9) (BRISTOT, 1996).



Figura 2.9 – Forno a rolo (BRISTOT, 1996).

Após a queima acontece a classificação dos defeitos estéticos (borrado, falha de véu, furo de esmalte, etc) e físicos (tamanho, empeno, etc) dos revestimentos cerâmicos. Esta classificação é realizada em máquinas classificadeiras automáticas. Em seguida é realizado o embalamento e a paletização, e as caixas vão para o setor de expedição (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Zona de classificação, embalagem, paletização e expedição (KINGERY, 1998).

2.2. O processo de moagem

2.2.1. Princípios da redução de tamanho

Uma partícula, ou um fragmento, tem dimensões lineares, uma área superficial, uma dureza e uma estrutura. A dimensão linear pode ser o diâmetro de uma esfera, a aresta de um cubo, ou uma média fictícia das dimensões de um fragmento irregular. A área superficial é a do exterior da maior parte das partículas, embora algumas tenham superfícies correspondentes a poros internos. No caso de cubos e esferas, a área é facilmente calculada, mas quando as formas são irregulares há que estimá-la ou medí-la. A dureza é indicada pelo critério convencional do risco numa superfície e pode ser medida por indentações. A estrutura pode ser homogênea ou heterogênea.

Uma mistura de partículas, como a existente num pó, pode ser definida em termos da distribuição dos tamanhos das partículas, da área, da área específica e do tamanho-limite da partícula. A distribuição dos tamanhos da partícula é a função que dá a quantidade proporcional a cada tamanho individual na população inteira do material pulverulento. A área é a soma das áreas das partículas, e a área específica é a área da unidade de peso ou de volume do material. O tamanho-limite das partículas é o da maior ou o da menor, presente no pó. A moabilidade é uma medida da taxa de moagem do material num moinho determinado.

O conhecimento mais fundamental sobre a ação de desagregação que ocorre num moinho depende do desenvolvimento do conhecimento sobre o mecanismo da fratura de uma única partícula. As falhas, que isoladamente não são suficientes para iniciar uma fissura, podem ser adicionadas por fenômenos de fadiga, como os escorregamentos, até que se tornem eficientes. As fissuras, no entanto, podem ser limitadas por inclusões e fronteiras intergranulares, de modo que um material heterogêneo pode ser mais forte que os seus componentes. Os projetos de diferentes moinhos visam a aplicar a força de diversas maneiras. A energia armazenada na partícula antes do rompimento pode ser calculada pela análise das tensões e medida experimentalmente.

Outros fatores que afetam as características de moagem de um material, são a combinação com a água, a higroscopicidade e a sensibilidade às variações de temperatura.

2.2.2. Procedimentos de desintegração mecânica de materiais

A desintegração mecânica de materiais é produzida segundo os princípios detalhados na Figura 2.11:

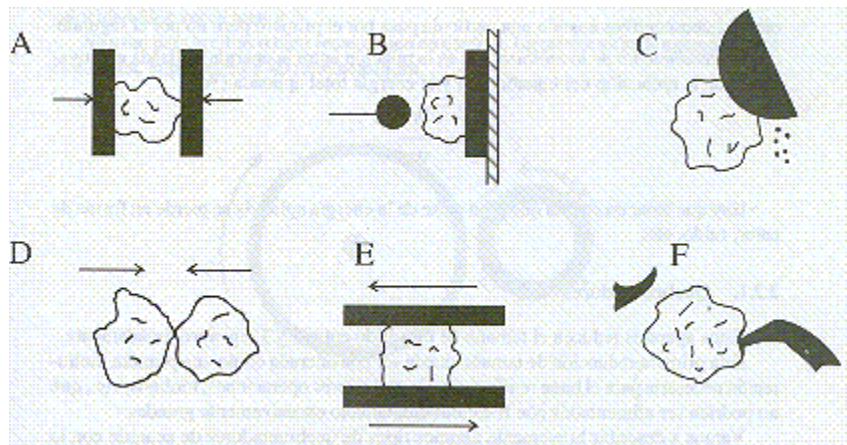


Figura 2.11 - Desintegração mecânica de materiais (KINGERY, 1976).

Sendo:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| A- Compressão | D- Choque recíproco |
| B- Choque com compressão | E- Abrasão |
| C- Desagregação | F- Corte |

A desagregação mecânica de materiais pode realizar-se tanto em ciclo contínuo como intermitente. Ambos sistemas diferenciam-se não só quanto a instalação necessária mas também quanto a granulometria que se obtém (NAVARRO,1994).

Para que exista uma moagem eficaz é necessário que cada partícula rompa-se por meio de choque ou com órgãos móveis do equipamento. A medida que o processo avança será necessário um maior número de choques o que faz com que a capacidade produtiva da máquina, medida em toneladas/dia, seja menor em equipamentos destinados a produção de partículas mais pequenas.

Muitos são equipamentos usados para moer um determinado material, entre eles, podemos destacar como exemplo:

- britadores giratórios;
- moinhos de cilindro;
- moinhos de rolos;
- moinhos de bolas;
- galgas;

A razão de redução dos trituradores exprime-se, freqüentemente, como a razão entre as malhas na entrada e as malhas na saída. Estas malhas determinam os diâmetros máximos da alimentação e do produto. Para ser mais informativo, é necessário especificar a distribuição de tamanhos na alimentação e no produto.

2.2.3. Moagem com moinhos de bolas

O objetivo da moagem é reduzir o tamanho de um sólido com vistas a:

- Aumentar a superfície, já que a velocidade com que se verificam as reações sólido-sólido é proporcional ao número de contatos entre as partículas do sólido.
- Conseguir uma mistura mais uniforme dos materiais.
- Obter um pó muito fino para a aplicação correta do material. Exemplo: fabricação de pigmentos, esmaltes, etc.

Além disso, o tamanho da partícula influi notavelmente sobre:

- A plasticidade e, conseqüentemente sobre a formação da peça cerâmica.
- Reações que têm lugar durante a queima.
- Eliminação de substâncias gasosas durante o aquecimento.
- Características do produto acabado (porosidade, resistência à compressão, etc.)

Atualmente na cerâmica, são utilizadas duas tecnologias de moagem: moagem a úmido e moagem a seco.

2.2.4. Moagem por via úmida

O processo por via úmida se constitui na moagem do material em presença de água e a secagem da barbotina. Este processo permite a homogeneização de um amplo espectro de matérias primas, moendo-as finamente, obtendo-se um pó muito fluido que asseguram o enchimento ideal dos estampos das prensas, a eliminação ou pelo menos a redução a dimensões invisíveis de eventuais impurezas contidas na massa.

Quanto aos equipamentos, são empregados moinhos de bolas, contínuos ou descontínuos (estes mais usados), em que os elementos mascinantes são de material cerâmico ou seixos de sílica. O revestimento interno destes moinhos pode ser de sílica, alta alumina ou borracha, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Ao final do processo de moagem obtém-se uma suspensão aquosa das matérias primas finamente moídas (barbotina), com conteúdo de água que varia de 30 a 40%. A seguir, é retirada a água deste material através do atomizador, ficando o pó com uma umidade residual de 4 a 6%.

O processo a úmido é aplicado com ótimos resultados na produção de monoqueima greisificada, queimada em ciclos rápidos, e do grés porcellanato. O processo via úmida, também tem a vantagem de poder utilizar, como água de moagem, a água de lavagem, proveniente das seções de moagem e esmaltação.

As desvantagens deste processo são o alto custo de equipamento e operação, além de elevados gastos de energia para evaporar considerável quantidade de água de moagem para a obtenção de pós adequados para a prensagem (NAVARRO,1994).

2.2.5. Moinho de bolas

Esses moinhos são usados na indústria cerâmica para moagem de matérias primas, massas cerâmicas, esmaltes, corantes podendo ser utilizado ainda para outros fins industriais. A forma mais simples é um cilindro oco fabricado em chapas de aço revestido internamente com borracha ou tijolos alumina, (Figura 2.12), contendo: esferas (bolas) alumina, de sílica ou ágata; eixo perfeitamente ajustado e centrados nos fundo do tambor, sustentados por mancais situados em bases metálicas ou de concreto, tampas de carga e de descarga revestidas internamente por borracha ou tijolos de alumina. Podem ser usados a seco e a úmido, e seu funcionamento pode ser contínuo ou intermitente, segundo construção e tipo de alimentação (RIBEIRO. 2001).

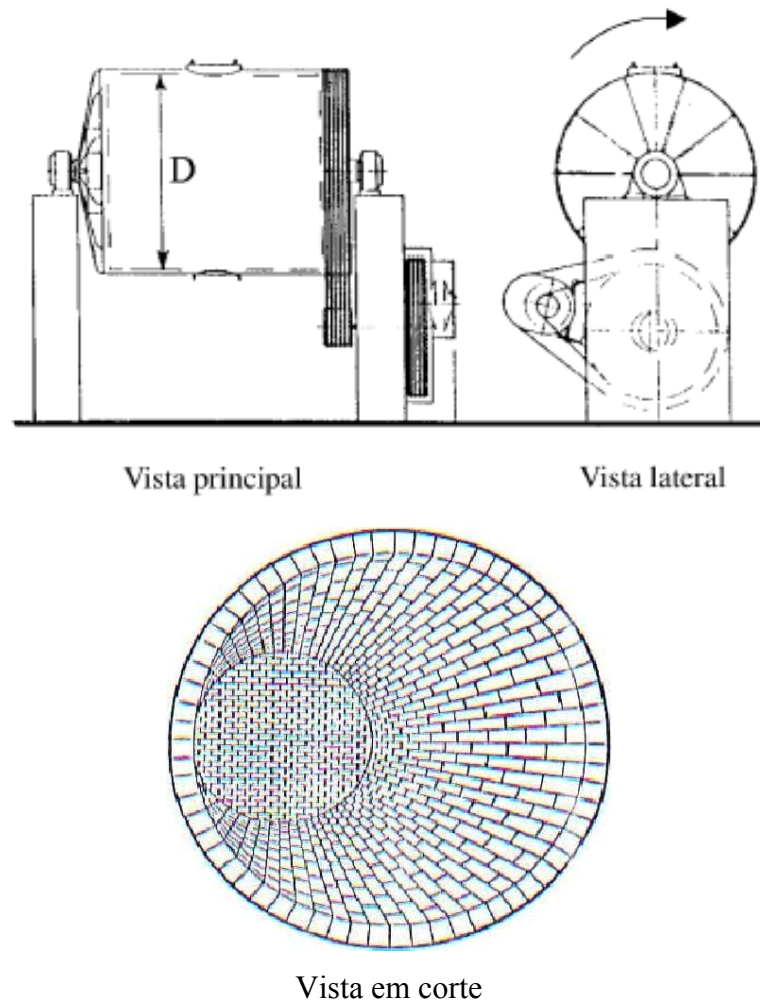


Figura 2.12 – Moinho de bolas (RIBEIRO, 2001).

As variáveis que influem na moagem com moinho de bolas são:

- quantidade de material a moer;
- velocidade de rotação;
- tamanho e carga de bolas;
- tempo de moagem;
- densidade de bolas;
- densidade e viscosidade da massa;
- volume de água;
- tipo de revestimento;
- capacidade do moinho.

2.2.6. Carga de bolas ou seixos utilizadas nos moinhos

Estudos práticos demonstram que o melhor rendimento de um moinho é atingido quando a carga de corpo moedor corresponde, aparentemente, à 30 -55% do volume útil (interno do mesmo). O valor mais usado é 55%. Entre os principais tipos de seixos ou bolas usadas em moinhos, destaca-se bolas de porcelana, bolas de sílica e esferas de alumina. Quando a distribuição de bolas ou seixos, a literatura recomenda teoricamente o seguinte:

- a) Bolas Grandes - 7 + ou - 1 cm de diâmetro, 9 à 10 %;
- b) Bolas Médias - 5 + ou - 1 cm de diâmetro, 30 à 31 %;
- c) Bolas pequenas - 3 + ou - 1 cm de diâmetro, 60 à 61 %;

Esta é feita para a primeira carga e para reclassificação de bolas. Para reposição recomenda-se colocar somente bolas de tamanhos grandes. A prática tem mostrado que trabalhando-se com bolas de porcelana e também de alta densidade, o recomendável é:

- a) Bolas Grandes - 20 -25%
- b) Bolas Médias - 50 -60%
- c) Bolas Pequenas - 20-25%

2.2.7. Distribuição do tamanho de bolas

As bolas moem por choque e por fricção. Por isso deve-se selecionar diferentes tamanhos de bolas, para conseguir um maior rendimento de moagem. Umas serão de tamanho maior e atuarão preferencialmente na ruptura do material, enquanto que as de menor tamanho terão maior eficiência na obtenção de partículas menores. Em geral, é aconselhável compor o carregamento inicial do moinho com três diâmetros diferentes de esferas.

2.2.8. Quantidade de produto a moer

Não existe uma regra geral sobre a quantidade ótima de produto a moer e sim indicações gerais. O material a moer, será tal que a barbotina formada cubra ligeiramente as bolas. Uma quantidade menor deixaria as bolas fora da barbotina, sofrendo um desgaste desnecessário. Um excesso de material retardará demasiadamente o tempo de moagem. Em geral, o conteúdo máximo de barbotina deve ser tal que deixe livre 25% do volume útil do moinho.

2.2.9. Densidade

Indica a quantidade de água existente na barbotina. Uma alta densidade dará melhor qualidade ao pó atomizado, porém se for excessiva provocará entupimentos e um maior desgaste dos bicos do atomizador. Uma densidade baixa provoca um gasto maior de energia (devido a maior quantidade de água a retirar) e o efeito cacho de uva no pó.

2.2.10. Viscosidade

Indica o grau de escoamento da barbotina. Uma viscosidade muito alta provocará uma descarga dificultosa do moinho, além de um maior tempo de moagem, pois as bolas não se chocam com força suficiente, além de entupimentos nos bicos do atomizador. Uma viscosidade muito baixa, provoca um desgaste acentuado das bolas e dos revestimentos dos moinhos. A queda da viscosidade é provocada por um agente chamado defloculante. O defloculante é utilizado para obter-se uma ótima relação água x viscosidade, e normalmente é composto por silicato de sódio.

2.2.11. Velocidade do moinho

A ação moedora das bolas deve-se a seu movimento ascendente no interior do moinho com posterior caída em cascata. Esse movimento pode ser afetado pelo movimento de rotação do moinho. Para velocidades demasiado lentas, a massa de bolas desliza-se para trás havendo pouca moagem e muito desgaste dos elementos mascinantes. Para velocidades demasiado elevadas, produz-se centrifugação das bolas com moagem quase nula e grande desgaste das bolas e revestimento.

2.2.12. Tempo de moagem

É determinado pelo resíduo. Um tempo de moagem excessivamente longo, não implica em uma moagem maior, ou seja, não corresponde a menores tamanhos de grânulos de produto. Ultrapassando o tempo de moagem adequado para cada material, está levando-se o custo do processo e o desgaste do moinho. Por outro lado, uma moagem com resíduo excessivamente alto provocará entupimentos nos bicos do atomizador, maior desgaste dos estampos das prensas e menor fundência da massa.

2.2.13. Moagem por via a seco

O processo a seco consiste na moagem a seco das matérias primas e na sucessiva regulagem da umidade dos pós moídos através de pulverizadores especiais. É adotado quando se empregam argilas extraídas diretamente das jazidas, com umidade baixa e poucas adições. Do ponto de vista dos equipamentos, podem-se empregar diversos tipos de moinhos, chamados “moinhos granuladores” (britador de mandíbulas ou de cone, cilindreiras, etc.). Estes são alimentados por peças de cerca de 150-200 mm de diâmetro e possuem grãos de diâmetro máximo de 20-30 mm. Além desses, há os “moinhos de acabamento” (moinhos de martelo, pendular etc), os quais normalmente são alimentados pelo produto que sai dos moinhos granuladores, e permitem obter partículas com diâmetro máximo de ao redor de 0,5 mm.

Em geral obtém-se um pó de no máximo 2-3% de umidade onde os valores mais altos comprometeriam a eficiência dos moinhos por causa da sujeira que se acumula nas superfícies moedoras devido à condensação da umidade do material a ser moído e que em seguida é umidificado por pulverizadores especiais, de funcionamento contínuo, que levam a umidade a valores apropriados para a prensagem.

As vantagens do processo a seco são seus custos relativamente baixos de implantação e de operação e menor consumo de energia (com relação ao processo a úmido). Do ponto de vista tecnológico, uma vez que não permite a obtenção de grãos tão finos quanto os obtidos pela moagem a úmido, não é possível sequestrar a obtenção de elevadas superfícies específicas e a boa eliminação de eventuais impurezas grosseiras contidas na massa. Portanto, a sua utilização não é adequada para os produtos altamente greisificados, queimados, ciclos rápidos ou onde seja necessário moer uma pasta branca de vários componentes (monoqueima de massa branca); é limitada à produção de biqueima, grés vermelho e monoporosa vermelha (com absorção > 10%).

Na moagem a seco, pode-se distinguir dois tipos de fábricas:

- Fábricas onde ocorre a moagem de argilas
- Fábricas onde ocorre a moagem de chamotes (quebra de pisos e ou azulejos que passam por um processo de trituração)

O Brasil é o maior produtor mundial de pisos cerâmicos confeccionados por via seca, mas com uma tecnologia incipiente no seu sistema de preparação de massa, que compromete bastante a qualidade final do produto acabado. Normalmente estes produtos são fabricados com massa vermelha (rica em ferro), sendo produtos de baixo custo, porém com design e características físicas muito pobres (NAVARRO, 1994).

2.3. O processo de prensagem isostática

O processo de prensagem isostática de pós cerâmicos, tradicionalmente utilizado na produção de velas de ignição de motores automotivos, é caracterizado pela grande uniformidade e alta qualidade dos produtos gerados. Atualmente, este é o método mais utilizado pela indústria de componentes cerâmicos de precisão, tais como: componentes de bombas, bicos de solda, ferramentas de usinagem, partes de motores automotivos e de ferramentas e aplicações biomédicas.

O processo utiliza-se de um molde que pode ser constituído de diversas partes (Figura 2.13), sendo a principal parte, a membrana elastomérica flexível ou a matriz elastomérica. Neste caso, a

matriz elastomérica é preenchida por pó cerâmico e é posteriormente selada. A superfície externa da matriz elastomérica é comprimida por um fluido pressurizado gradativamente pela ação de uma prensa isostática, gerando o compactado a verde (compacto) que posteriormente e quando necessário poderá ser usinado e sinterizado dependendo das características exigidas pelo produto.

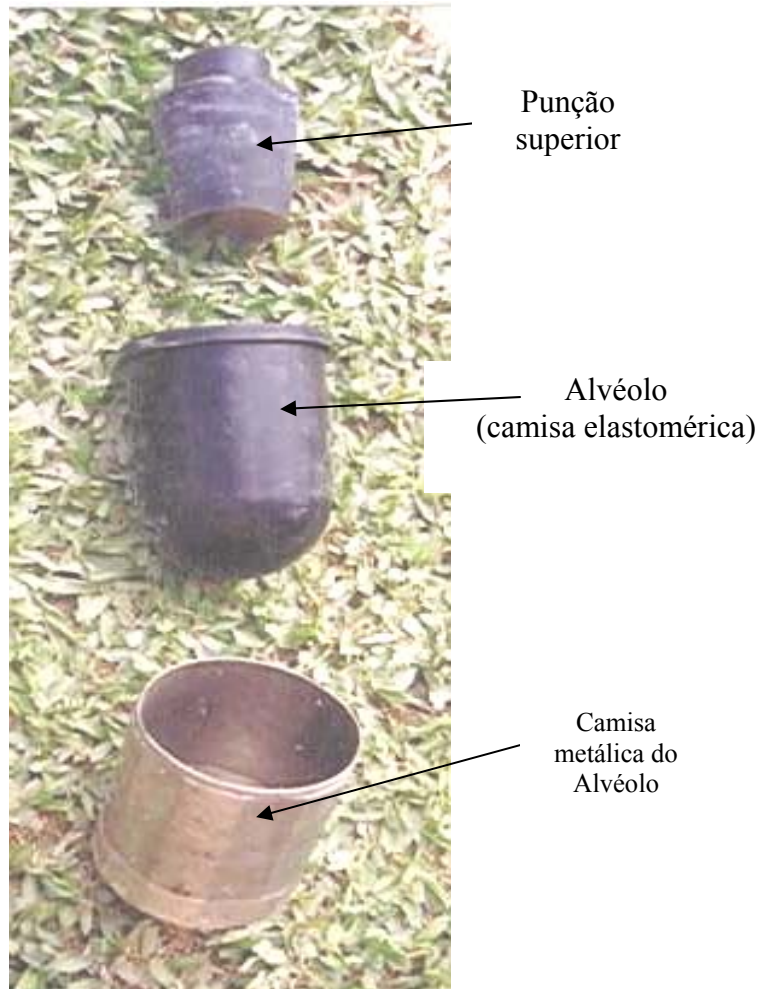


Figura 2.13 – Constituição de um molde isostático.

A prensagem isostática é particularmente aplicada a produtos que apresentam formas cilíndricas ou esféricas. Cavidades internas podem ser obtidas com a adição de machos dentro da matriz elastomérica.

Várias concepções de prensas isostáticas foram desenvolvidas, sendo que as principais são agrupadas em prensas isostáticas a frio (Figura 2.14) e prensa isostáticas à quente. A prensagem isostática a frio é o método mais empregado pela indústria cerâmica, devido a utilização de líquidos pressurizados à temperatura ambiente no interior do vaso (Figura 2.15). Por outro lado, a prensagem

isostática a quente é um processo no qual a pressão e a temperatura variam independentemente e simultaneamente (FORTULAN, 1997).



Figura 2.14 – Prensa isostática (Arquivo pessoal).

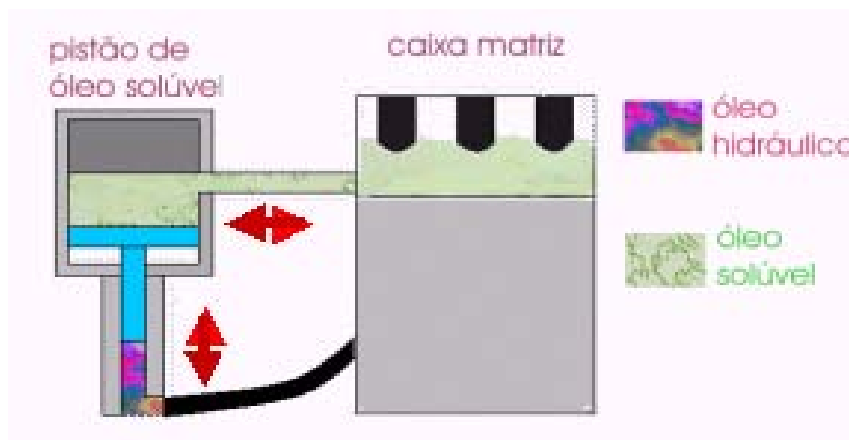


Figura 2.15 - Líquidos pressurizados no interior do vaso (Arquivo pessoal).

Dependendo das dimensões do componente pretendido, do nível de sofisticação ou de requisitos de produção, dois tipos de processos a frio vêm sendo utilizados: o processo *dry bag (fixed bag)* e o processo *wet bag (free bag)*. Na prensagem isostática *dry bag*, esquematizada na Figura 2.16, o operador do equipamento não entra em contato com o fluido, pois o molde é integrado ao vaso de pressão e neste caso a tampa do molde é a própria tampa do vaso. Nesse processo altas taxas de

produção podem ser alcançadas pela possibilidade em se automatizar os estágios de alimentação do molde e extração do compactado (BORTZMEYER, 1992).

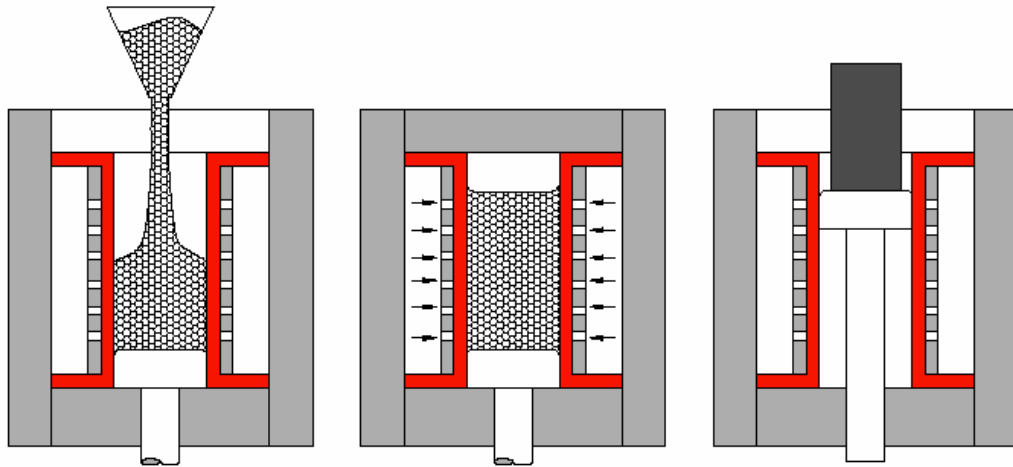


Figura 2.16 – Esquema do processo de prensagem isostática *dry bag* ou *fixed bag*. Da esquerda para a direita, as etapas de alimentação do molde, prensagem e extração do compactado (REED, 1995).

Na prensagem isostática *wet bag*, esquematizada na Figura 2.17, o molde que contém o pó cerâmico é introduzido no interior do vaso de pressão da prensa, e o operador tem contato com o fluido em cada alimentação e descarga dos moldes (McENTIRE, 1984). Esse processo é apropriado para peças grandes, mais não permite altas taxas de produção.

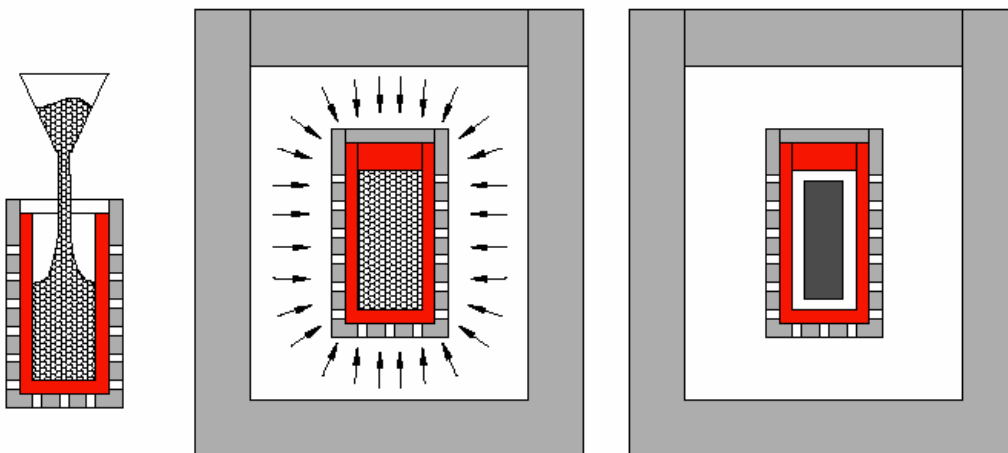


Figura 2.17 – Esquema do processo de prensagem isostática *wet bag* ou *free bag*. Da esquerda para a direita, as etapas de alimentação do molde, prensagem e peça compactada (REED, 1995).

2.3.1. Moldes para prensagem isostática

Os materiais empregados na construção dos moldes devem possuir características mecânicas que possibilitem a construção de estruturas rígidas, como suporte e machos, e estruturas flexíveis, como membranas (matriz elastomérica). Entre os materiais utilizados destacam-se alguns polímeros rígidos e os aços para confecção de estruturas rígidas, e borrachas naturais ou poliuretanas para a fabricação de estruturas flexíveis. Ultimamente, a poliuretana vem se destacando em função das características de autolubrificação, excelente resistência à abrasão, compatibilidade química com muitos materiais e grande possibilidade de durezas (McENTIRE, 1984).

Os machos são normalmente fabricados em aço de alta resistência ou metal duro com acabamento polido. Materiais de baixa resistência não são recomendados. O material do macho deve ser quimicamente compatível com o pó compactado, pois a abrasão do macho pelo pó ocasiona a introdução de impurezas no compacto. A gaiola suporte deve apoiar a matriz elastomérica sem deformá-la e ser de material suficientemente durável para suportar a manipulação (McENTIRE, 1984).

A dureza e a espessura da parede da matriz elastomérica têm importância crucial no projeto do molde. Elastômero de baixa dureza geram peças de baixa qualidade devido à compactação irregular gerando variações na geometria da peça verde. Materiais considerados de alta dureza geram superfícies de textura uniforme, mas podem ocasionar danos no compacto, uma vez que na descompressão, os movimentos axiais e radiais não estão em equilíbrio. Sendo assim, a tensão induzida na peça no descarregamento pode resultar em fissuras (McENTIRE, 1984).

Durante a compactação, o ar comprimido que permanece dentro do material pode causar problemas, gerando vazios que diminuem sua resistência mecânica ou até fissurar o compacto no descarregamento (KINGERY, 1976).

A introdução de aditivos orgânicos na preparação do pó cerâmico diminui a tendência da ocorrência de fissuras no compacto (McENTIRE, 1984).

As formas do molde não afetam apenas as dimensões do compacto. Mudanças agressivas de seção não permitem a movimentação do pó durante o processo de compactação, resultando em estreitamentos, saliências e fissuras nestas áreas. Dependendo do material utilizado na fabricação da tampa do molde, poderá haver movimento de pó nesta região com a ocorrência de rebarbas.

Dois conceitos de projeto podem ser utilizados na concepção dos moldes para a prensagem isostática: os baseados na contração e aqueles baseados na expansão da cavidade da matriz

elastomérica. Pode-se ainda utilizar-se de uma combinação deste dois tipos. Na Figura 2.18 é mostrado o conceito do molde de contração e uma combinação dos dois conceitos: contração e expansão.

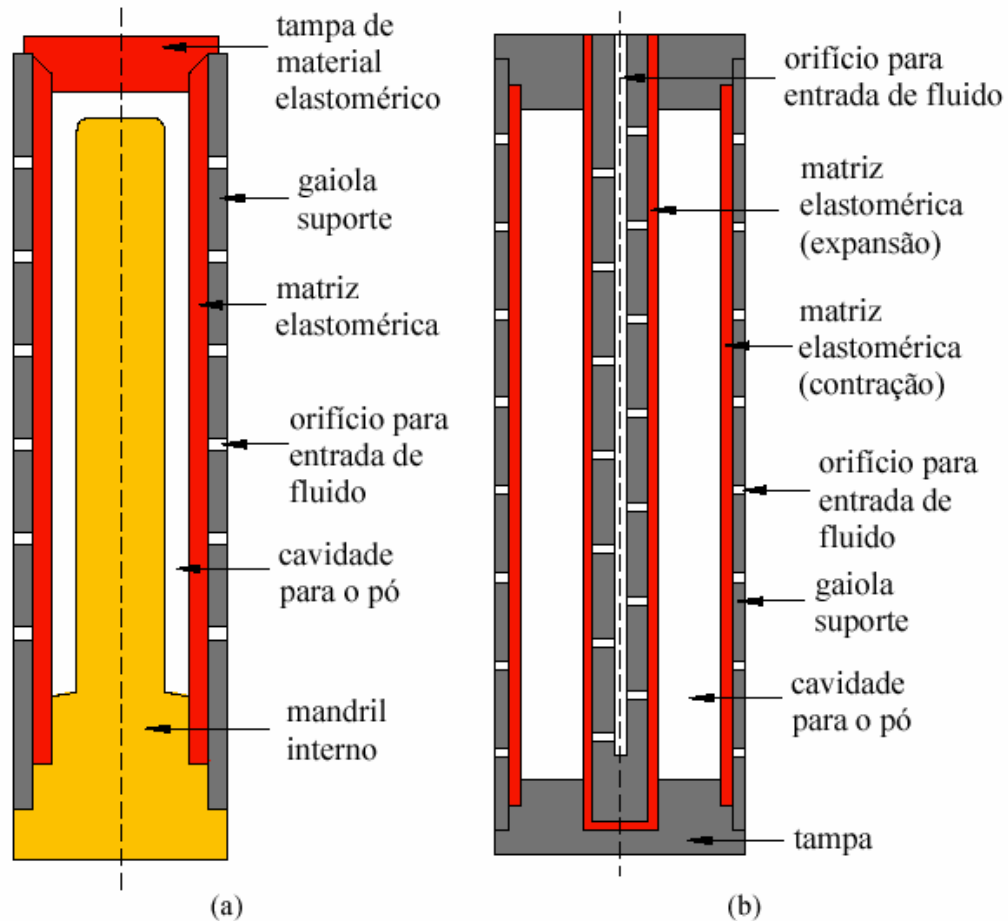


Figura 2.18 - Moldes para prensagem isostática: (a) contração e (b) contração / expansão (McENTIRE, 1984).

Os moldes de contração são utilizados na produção de sólidos esféricos, cilindros ou com formas complexas. A introdução de um macho permite a produção de peças com perfis específicos ou furação interna.

2.4. O processo de prensagem uniaxial

Atualmente, a prensagem uniaxial é a técnica de conformação de peças mais empregada no processamento de materiais cerâmicos. Ela consiste na compactação de uma massa aglomerada

contida em uma cavidade rígida, mediante a aplicação de pressão em apenas uma direção axial através de um ou vários punções rígidos. A cavidade rígida é composta pela base, denominada punção inferior, pelo punção superior e pelas paredes, que podem ser móveis ou fixas, chamadas de matriz do molde.

As técnicas de prensagem se diferenciam pela movimentação destes elementos básicos do molde: o punção superior, o punção inferior e a matriz, bem como pelo número de elementos responsáveis pela aplicação da pressão.

Na prensagem uniaxial de ação simples (Figura 2.19) a pressão é aplicada através do punção superior, que é introduzido na cavidade que contém a massa, formada pela matriz e pelo punção inferior, os quais permanecem imóveis nesta etapa. Uma vez compactada a peça, o punção superior é retirado e o deslizamento do punção inferior permite a extração da peça do molde. Devido à fricção entre os aglomerados e entre estes e a parede do molde, surgem gradientes de densidades na peça (AMARÓS (A), 2000).

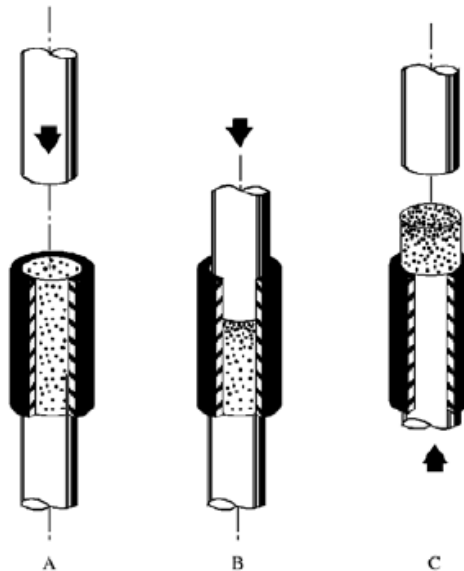


Figura 2.19 – Prensagem uniaxial de ação simples (AMARÓS (A), 2000).

A ação de prensagem realiza-se mediante a transformação da energia hidráulica em força de deformação. O órgão principal de movimento da máquina é um pistão de duplo efeito que se move no interior de um cilindro.

Duas características fundamentais desta prensagem fazem com que tenham uma importante difusão na indústria cerâmica.

- Constância na força de prensagem

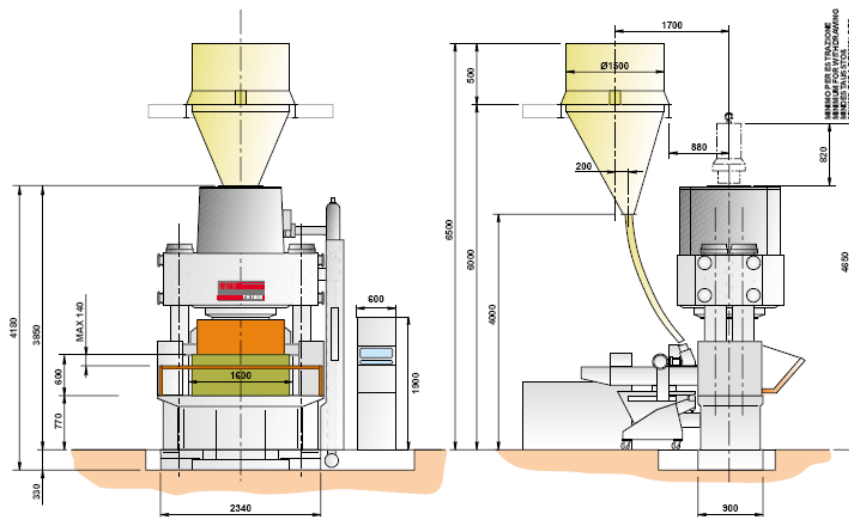
- Constância no tempo de ciclo

Atualmente, são utilizadas prensas do tipo hidráulicas, isto é, a pressão que chega aos punções é transmitida mediante um fluido pressurizado, normalmente um óleo (Figura 2.20). Os principais componentes de uma prensa hidráulica são os seguintes:

1) Sistema de alimentação (Figura 2.21), cuja finalidade é preencher as cavidades do molde com a massa (normalmente obtida mediante secagem por atomização), nivelá-la e extrair a peça compactada no ciclo anterior. Consiste em um recipiente metálico retangular, em cujo interior existem barras (normalmente transversais à direção de preenchimento), que funcionam como separadores, e que são chamados de régua. São dispostas convenientemente com o fim de se obter a distribuição mais homogênea possível da massa nas cavidades do molde. O sistema é alimentado por um distribuidor, que pega a massa granulada, previamente armazenada (peneirada e misturada), de um silo de recepção.



(a)

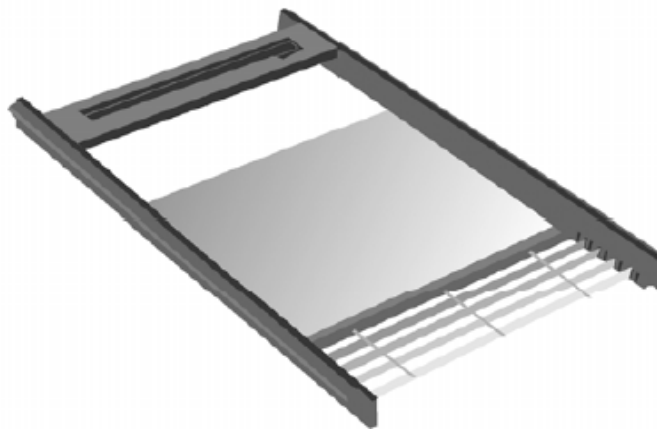


(b)

Figura 2.20 – Prensa hidráulica para fabricação de revestimentos cerâmicos: (a) sistema físico; (b) vista esquemática (SACMI, 2008).



(a)



(b)

Figura 2.21 – Sistema de alimentação e distribuição da massa: (a) Carro alimentador; (b) Grelha do carro alimentador (SACMI, 2008)..

2) Sistema hidráulico, composto por:

- Reservatório de óleo, normalmente localizado no interior da estrutura da prensa.
- Sistema hidráulico, capaz de bombear o óleo necessário para realizar as distintas operações que compõe o ciclo de prensagem. O sistema hidráulico consiste em um motor elétrico, uma bomba de pistão e um trocador de calor que mantém o óleo no intervalo de viscosidade de trabalho.

- Sistema multiplicador da pressão que aumenta a pressão na região do sistema que transmite a pressão ao punção superior.

3) Sistema de prensagem, composto dos elementos mecânicos que realizam a compactação da massa e, posteriormente, a extração da peça. Estes elementos se encontram inseridos na estrutura rígida da prensa. Os principais são:

- A travessa móvel, que se adere magneticamente ao punção, ou punções, dependendo do número e tamanho das peças que se deseje obter.
- A matriz que contém as cavidades, cujo número e tamanho dependem do número e formato das peças que se deseje obter, e os punções inferiores móveis, que se localizam nas cavidades da matriz (Figura 2.22).

4) Sistema automatizado de controle, que regula eletronicamente o ciclo de prensagem.

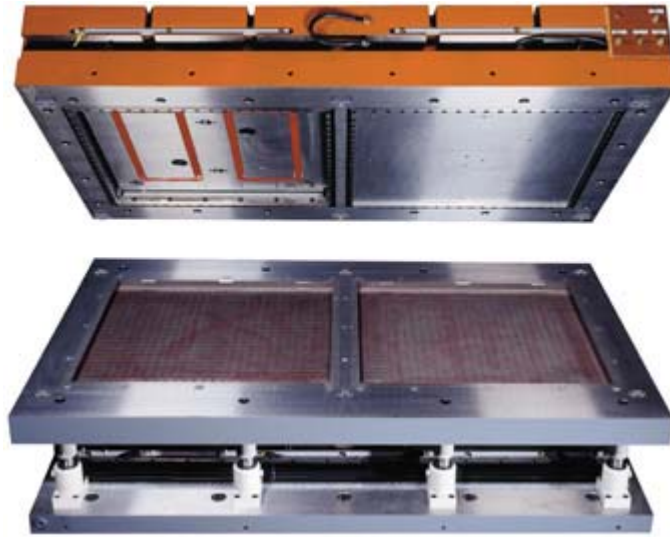


Figura 2.22 – Molde de prensas para fabricação de revestimentos cerâmicos (SACMI, 2008)..

2.4.1. Constância na força de prensagem

Em igual de todas as condições que afetam o pó a prensar (granulometria, umidade, distribuição de pó nos estampos, etc.) e de todas as que afetam a sinterização, é evidente que a contração é influenciada pela pressão de prensagem.

Este tipo de prensagem permite manter constante a pressão de prensagem, portanto, contração do produto.

2.4.2. Características do pó

A operação de prensado assim como a microestrutura da peça prensada, estão marcadamente afetadas pelas propriedades das partículas (natureza, tamanho, distribuição, forma), pelas características dos aglomerados de partículas (forma, tamanho, distribuição dos grânulos ou aglomerados) e pelos aditivos de prensado (umidade, ligante, plastificantes e etc.). As características anteriormente mencionadas, que tem função por uma parte da composição e por outra da preparação da massa (atomização) determinam por sua vez as outras propriedades ou parâmetros tecnológicos do pó, tais como: densidade aparente, fluidez, compactação, etc.

2.5. Metodologia para desenvolvimento de projetos

Segundo Pahl e Beitz, 1996, as principais fases envolvidas no desenvolvimento de projetos são:

- O esclarecimento da tarefa: coleta de informações sobre os requisitos e restrições a serem projetados. Diversas ferramentas podem ser utilizadas com o objetivo informacional, tais como, busca na literatura, banco de patentes e normas, etc.

- Projeto conceitual: as diversas etapas envolvidas neste momento objetivam a geração, avaliação, seleção e detalhamento do conceito. Eventualmente, a solicitação de patente pode ser realizada.

- Projeto executivo: esta etapa do projeto é orientada a fabricação e montagem através da especificação de tolerâncias geométricas e dimensionais e procedimentos de fabricação e montagem.

- Projeto otimizado e detalhado: adaptação do projeto para corrigir os problemas detectados na fabricação, montagem e testes do protótipo.

A Figura 2.23 mostra o processo passo a passo. Em cada passo, uma decisão deve ser tomada, se o próximo passo pode ser dado ou se o passo anterior deve ser repetido. Além disso, a avaliação econômica, não inclusa no diagrama, também pode interromper o desenvolvimento do projeto.

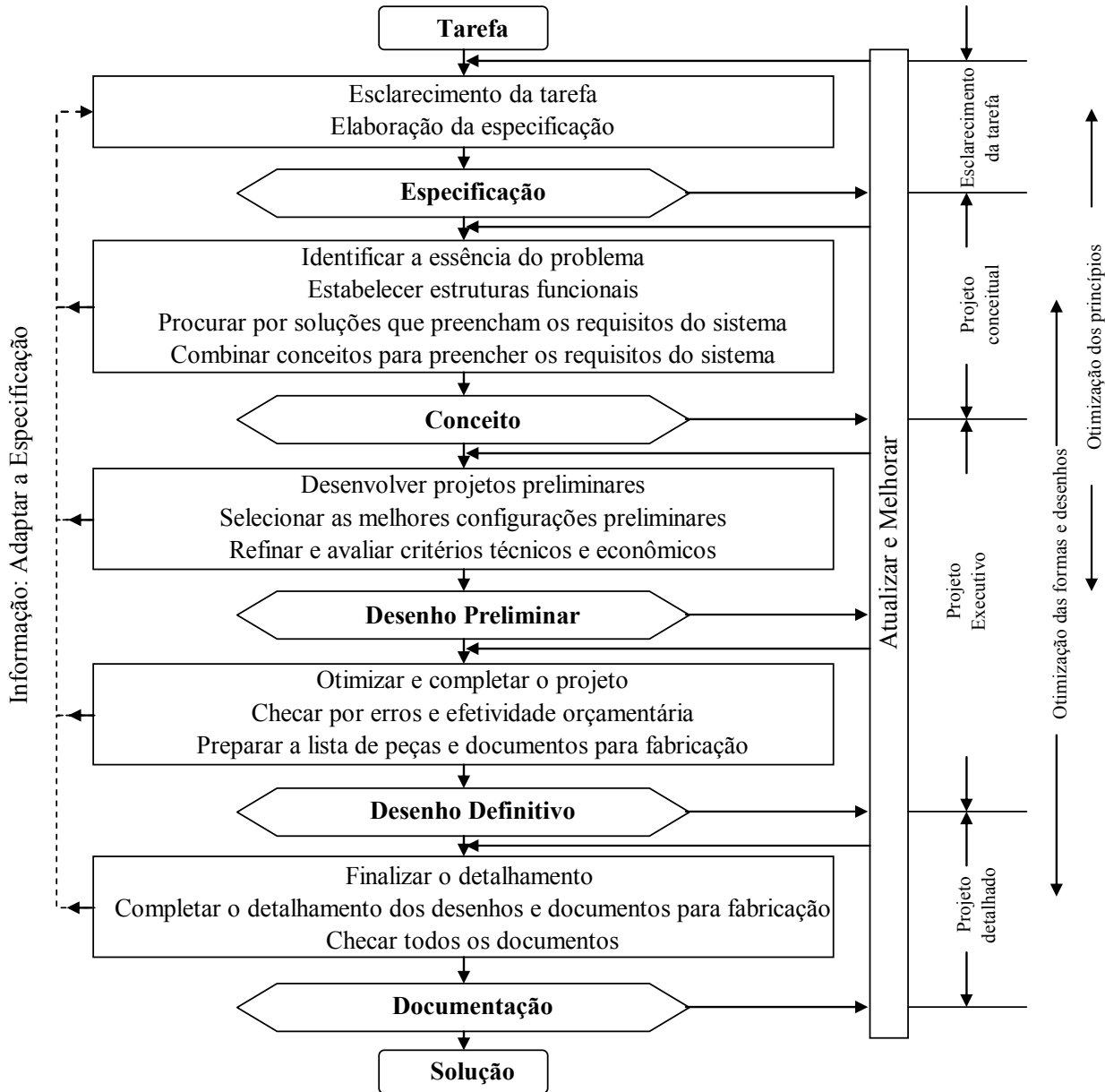


Figura 2.23 – Etapas de desenvolvimento de um projeto (Pahl e Beitz, 1996).

2.5.1. Projeto Conceitual

Esta etapa envolve o estabelecimento das estruturas funcionais, a procura de soluções viáveis e suas combinações num conceito variante. O projeto conceitual consiste nas seguintes etapas (Figura 2.24):

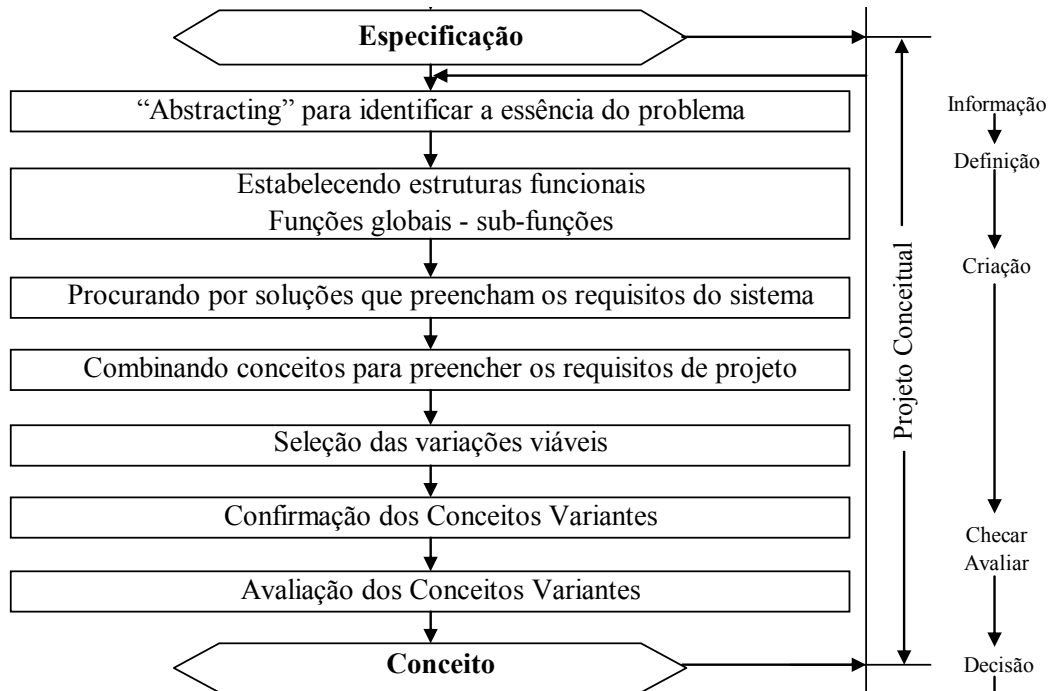


Figura 2.24 – Etapas do projeto conceitual (Pahl e Beitz, 1996).

1 – Especificação ou Esclarecimento da Tarefa: Cada tarefa envolve certas restrições que podem mudar ao longo do tempo, entretanto precisam ser claramente compreendidas se a melhor solução deseja ser encontrada. No princípio, a tarefa deve ser completamente esclarecida, ao passo que amplificações e correções durante as subseqüentes etapas possam ser minimizadas. A especificação deve conter todos os requisitos necessários, desejáveis e as restrições.

2 – Abstração para identificar a essência do problema: Esta análise de generalização, feita passo a passo, revelará as características principais e essências do problema. Esta análise deve seguir os seguintes passos:

Passo 1 e 2: Omitir requisitos (Necessários ou Desejáveis) que não tenham influência direta com a resolução do problema ou não causem obstrução a solução;

Passo 3: Transformar dados qualitativos em dados quantitativos para reduzir as exigências iniciais;

Passo 4: Generalizar os resultados do passo anterior;

Passo 5: Formular o problema em termos neutros.

3 – Estabelecendo estruturas funcionais: Logo após o problema ser generalizado, é possível indicar o mesmo através de uma função geral, baseado no fluxo de energia, material e sinais, com o uso de diagramas de bloco, expressando as relações de entrada e saída independentemente da solução.

4 – Procurando por soluções que preencham os requisitos do sistema: Soluções podem ser encontradas através de várias sub-funções e estas eventualmente podem ser combinadas. A solução deve refletir os efeitos físicos necessários para preencher todas as funções e características do problema. Nesta etapa, a intenção é a condução de diversas soluções variantes. Uma solução pode ser construída por variações de efeitos físicos e características. Além disso, diversos efeitos físicos podem ser envolvidos em uma ou várias funções.

5 – Combinando conceitos para preencher os requisitos de projeto: Neste momento, os conceitos gerados na etapa anterior podem ser combinados. O principal problema é garantir a compatibilidade entre as soluções. Existem alguns métodos para realizar esta combinação. O principal deles se vale da matriz morfológica do sistema, onde os conceitos são dispostos em linhas e colunas e as combinações aceitáveis são escolhidas.

6 – Seleção das variações viáveis: Para uma aproximação sistêmica, o campo de soluções deve ser o mais amplo possível. O projetista deve classificar e avaliar todos os critérios possíveis, o que leva a um número muito grande de possíveis soluções. Esta profusão constitui o ponto forte e ao mesmo tempo a fraqueza deste sistema. A grande variedade de soluções teoricamente aceitáveis deve ser reduzida o mais cedo possível. Entretanto, um cuidado muito grande deve ser tomado para não se eliminar valiosas possíveis soluções. Este processo envolve duas etapas: eliminação e preferência.

Primeiramente todas as soluções inviáveis são eliminadas. As soluções remanescentes são classificadas de acordo com a preferência do projetista, ou do time de projeto. As soluções que restarem serão novamente analisadas no final do projeto conceitual.

7 – Confirmação dos Conceitos Variantes: Os princípios elaborados nos passos 4 e 5 muitas vezes não são suficientemente concretos para a definição de um conceito final. Isto porque, a procura por soluções é baseada em estruturas funcionais e, é direcionada para preencher todos os requisitos técnicos. Um conceito precisa, também, satisfazer outras necessidades e muitas vezes desejos. Antes de o conceito passar pela avaliação final é necessária uma confirmação do mesmo.

Alguns métodos auxiliam na revelação de falhas em importantes propriedades, tais como:

- Desenhos preliminares em escala;
- Cálculos preliminares e suposições;
- Construção de modelos para auxílio visual;
- Pesquisa de mercado sobre modelos similares.

8 – Avaliação dos Conceitos Variantes: Uma avaliação significa determinar o “valor”, “utilidade” e “força” de cada conceito com respeito a um objetivo. Um objetivo é indispensável, pois o valor de

uma solução não é absoluto, mas precisa ser medido por certos requisitos. Uma avaliação envolve a comparação de conceitos variantes.

2.5.2. Projeto Executivo Detalhado

Configuração é a parte do desenvolvimento de projeto, na qual iniciando do conceito de um produto técnico, o projeto é desenvolvido de acordo com os critérios técnicos e econômicos, podendo posteriormente ser detalhado e fabricado. As etapas do projeto executivo estão dispostas na Figura 2.25.

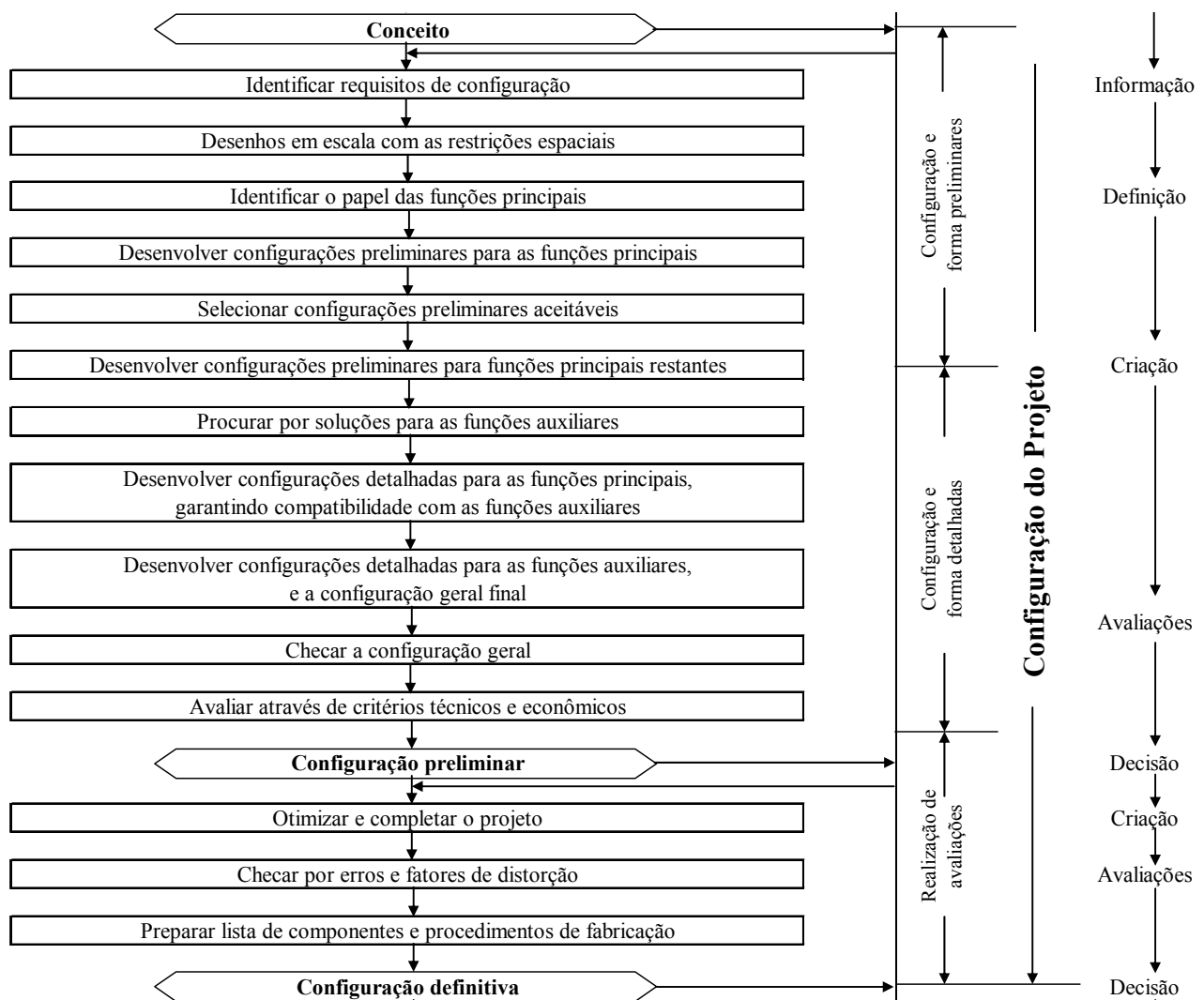


Figura 2.25 – Etapas do projeto executivo detalhado (Pahl e Beitz, 1996).

1 – Identificar Requisitos de Configuração: Usando a especificação, o primeiro passo é identificar os requisitos que são cruciais para a configuração do projeto:

- Requisitos físicos espaciais
- Determinação dos requisitos de fluxo de materiais, movimento e posição;
- Requisitos necessários para a resistência à corrosão, vida útil e materiais específicos.

2 – Desenhos em escala com restrições espaciais: desenhos mostrando requisitos de instalação.

3 – Identificar o papel das funções principais: Após a identificação das funções principais, croquis devem ser elaborados para certificar-se de que todas as funções estão preenchidas.

4 – Desenvolver configurações preliminares para as funções principais: Desenhos preliminares das funções principais devem ser desenvolvidos, a forma e material dos componentes podem ser provisórios. No final o sistema deve ser avaliado, utilizando somente as três primeiras características, de acordo com a Tabela 2.1.

5 – Selecionar configurações preliminares aceitáveis: Uma ou mais configurações devem ser selecionadas. Devem ser avaliados de acordo com todas as características da Tabela 2.1.

6 – Desenvolver configurações preliminares para funções principais restantes: Todas as demais funções principais devem estar inclusas no projeto.

7 – Procurar por soluções para as funções auxiliares: Todas as funções auxiliares devem ser inseridas na configuração nesta etapa.

8 – Desenvolver configurações detalhadas para as funções principais, garantindo compatibilidade com as funções auxiliares: Desenhos detalhados das funções principais devem ser executados neste momento. Levando-se em conta, normas, dimensionamentos, experimentações, etc.

9 – Desenvolver configurações detalhadas para as funções auxiliares, e a configuração geral final: Proceder no desenvolvimento de desenhos detalhados contendo todas as funções, gerando uma configuração final.

10 – Conferir a configuração geral: Avaliar a configuração final, através da Tabela 2.1.

11 – Avaliar através de critérios técnicos e econômicos: Procedimento muito similar ao utilizado na etapa conceitual. Novamente o objetivo é quantificar as funções principais e auxiliares do projeto.

Tabela 2.1 – Critérios de avaliação do projeto executivo (Pahl e Beitz, 1996).

Característica	Exemplo
Função	As funções estipuladas são satisfeitas? Quais funções auxiliares são necessárias?
Princípio de Funcionamento	O princípio de trabalho escolhido produz o efeito desejado e vantagens? Quais os fatores de dispersão podem ser esperados?
Forma e Configuração	A forma, material e dimensões escolhidas provêm: Adequada durabilidade? Deformação permissível (Rigidez)? Adequada estabilidade? Livre de ressonância? Impede expansão? Corrosão e desgaste aceitáveis para a vida útil estipulada?
Segurança	Todos os fatores de segurança dos componentes, das funções de operação e do ambiente foram analisadas?
Ergonomia	Todas as interfaces Homem-Máquina foram analisadas? Todos os fatores de stress e lesões foram evitados?
Produção	Foi realizado uma análise técnica e econômica dos procedimentos de produção
Controle de Qualidade	Todos os controles durante a produção foram especificados?
Montagem	Todos os processos internos e externos de montagem são simples e na seqüência mais apropriada?
Transporte	Todas as condições de transporte interno e externo foram analisados?
Operação	Todas os fatores que influenciam a operação, tais como ruído, vibração e movimentação foram consideradas?
Manutenção	A manutenção corretiva e preventiva pode ser facilmente realizada?
Custos	O limite de custo foi observado? A data de entrega pode ser atingida?
Entrega	Algumas modificações na projeto podem melhorar o prazo de entrega?

2.5.3. Otimização do Projeto

Nesta etapa o projeto deve ser otimizado, eliminando-se os pontos fracos identificados na avaliação técnica e econômica.

1 – Conferir por erros e fatores de distorção: Buscar erros na função, compatibilidade espacial e por fatores de distorção. Novamente a Tabela 2.1 deve ser utilizada.

2 – Preparar lista de componentes e procedimentos de fabricação: Concluir o projeto, preparar a lista de componentes e procedimentos de fabricação.

3. O PROJETO DO FERRAMENTAL

Foi projetado um ferramental para prensagem hidráulica de esferóides de alumina, auxiliados por técnicas de metodologia de projeto. Conformações de cerâmicas baseadas na compactação de pós, seguida de sinterização, requer certos cuidados. Foram considerados os requisitos, a alta eficiência de produção e a praticidade de operação. Dessa forma, foi desenvolvido um procedimento para um projeto adaptativo de prensagem hidráulica de esferóides de alumina. O ferramental projetado é capaz de fazer prensagem hidráulica de esferóides de alumina com capacidade de obtenção de 8 esferóides por compactação, ou seja, uma matriz com 8 cavidades. O projeto foi otimizado por planejamentos experimentais com um modelo, e validado com uma produção industrial com um protótipo. Foram obtidos esferóides com características físicas e mecânicas muito parecidas com as esferas prensadas via sistema habitual para este trabalho, ou seja, via sistema isostático.

3.1. Conformação do pó

Necessita-se de uma prensa e de um molde, denominado matriz. A matriz é composta por uma cavidade e um êmbolo. Ambos possuem formas apropriadas, relacionadas à forma da peça. O pó é colocado dentro do molde e o êmbolo é pressionado, pela prensa, contra o pó. Depois que a pressão é retirada, a peça é sacada da cavidade na forma desejada. Este tipo de conformação possui muitas vantagens. As maiores são a simplicidade e a possibilidade de automação, o que permite produção em larga escala. As principais desvantagens são os altos custos do ferramental, principalmente devido às matrizes e a seu grande desgaste, a limitação das formas que se pode obter e a limitação de tamanho destas peças. Limitação imposta pela capacidade da prensa usada para a prensagem do pó.

3.2. Metodologia e projeto

A atividade de projeto atua como intersecção de atividades cultural e tecnológica abrangendo conhecimentos das ciências, engenharia, tecnologia, fabricação, economia e política. O recente conhecimento da importância da metodologia e sistemática de projeto ou teoria de projeto na concepção de produtos, sejam projetos alternativos, adaptativos ou inovadores se reflete em normas

e diretrizes, para o ensino e pesquisa na área. As literaturas têm apresentado algumas propostas para abordagem sistemáticas das atividades de projeto ou estratégias para a busca de soluções. De uma forma geral, apresentam pequenas variações e diferentes técnicas de solução de problemas, bem como o enfoque, ora mais técnico, ora mais organizacional.

3.3. Materiais e Métodos

A identificação da necessidade é a atividade que antecede qualquer projeto. Uma necessidade pode surgir de uma falha ou melhoria de produtos, ou inovação decorrente de avanços científicos, tecnológico ou econômico. Para a proposta da fabricação de um ferramental para prensagem hidráulica de esferóides de alumina, identificou-se que há falta de equipamentos nacionais ou até mesmo internacionais, capazes de fazer a prensagem hidráulica de objetos esféricos em alumina para a obtenção de corpos moedores para uso em indústrias cerâmicas e de mineração, principalmente em função da crescente demanda no mercado interno devido ao aumento de fábricas produtoras de revestimentos cerâmicos. As etapas de orientação, para o desenvolvimento e projeto do ferramental para prensagem hidráulica de esferóides de alumina são apresentadas na Figura 3.1.

3.4. Reconhecimento da necessidade

Dois são os fatos principais da necessidade de fabricação de ferramental para prensagem hidráulica de esferóides de alumina:

- 1) O grande aumento de instalações de indústrias cerâmicas no país, principalmente na região de São Paulo, aumentando muito a demanda de esferas para ser utilizado como corpo moedor.
- 2) Com a necessidade cada vez maior na otimização nos processos industriais, fez com que houvesse uma substituição nos moinhos de massa e esmalte nas indústrias cerâmicas nacionais e internacionais dos corpos moedores onde anteriormente se trabalhava com seixos rolados (pedra de rio) e agora utiliza-se de esferas de alumina, onde sua principal função é a redução em até 50% do tempo de moagem, aumentando em muito o volume de

produção de barbotina ou esmalte cerâmico, e também pelo baixo desgaste destes corpos moedores em relação ao método antigo.

3.5. Definição do problema

O projeto foi classificado como sendo de cunho adaptativo, uma vez que o princípio de solução encontrado para a prensagem hidráulica foi preservado. O projeto do ferramental para prensagem hidráulica de esferóides de alumina foi adaptado para novas condições de montagem e operação.

Foi realizado um estudo inicial da viabilidade econômica e física, na qual foi levantado um custo inicial para a fabricação do modelo de um ferramental com uma única cavidade, estimado em R\$ 500,00. Posteriormente, se obtidos resultados satisfatórios com o modelo, seria construído um protótipo com um valor estimado em R\$ 10.000,00. Nesse valor incluiu-se a utilização de máquinas-ferramentas, mão-de-obra, materiais e ensaios experimentais.

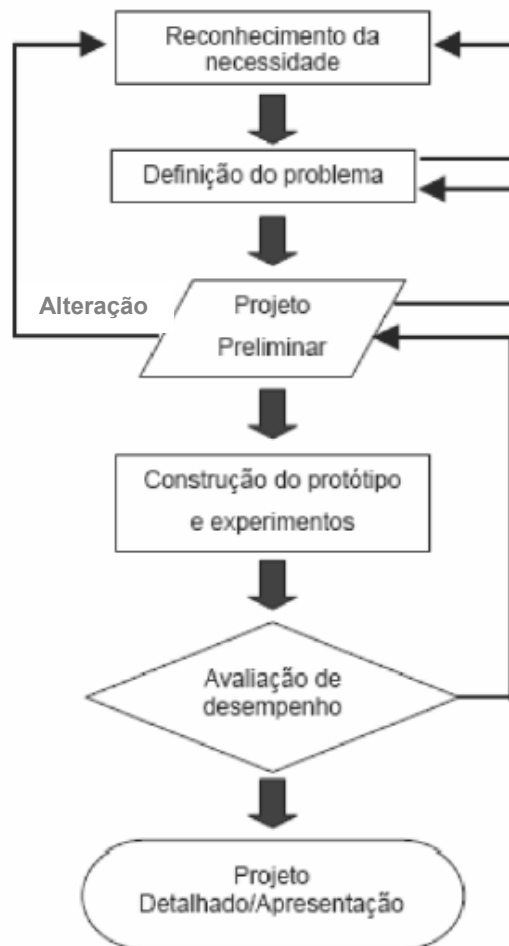
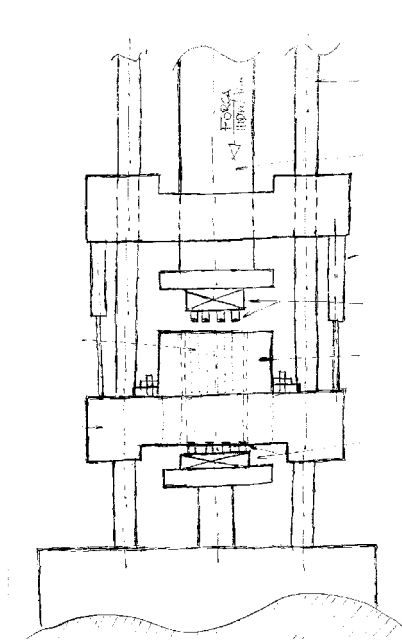


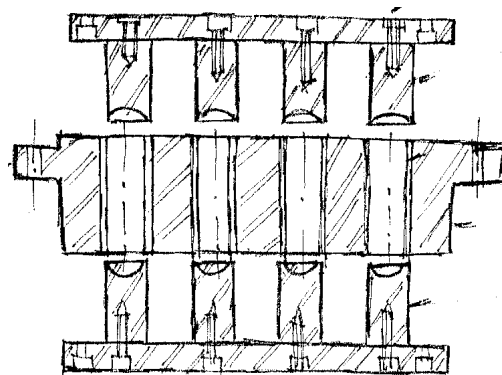
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia proposta (BACK, 1983).

3.6. Projeto Preliminar

O projeto utilizado como referência foi o de prensagem de tijolos de alumina para revestimentos de moinhos. Da estrutura proposta, foram mantidos o corpo da prensa e a movimentação da placa do punção superior, e foram redimensionados os punções inferiores, punções superiores à caixa matriz e a travessa central. Como a principal diferença é o novo formato físico do prensado, o ferramental que fazia a prensagem de tijolos, foi substituído por punções e camisas de novo formato e realizado a movimentação da travessa central da prensa para a expulsão do material das cavidades da caixa. Essa modificação permitiu a prensagem simultânea de até oito esferóides de alumina. O esboço inicial do projeto é apresentado na Figura 3.2. Para o projeto do ferramental (punções e camisas), foram considerados: O tipo de material dos punções e camisas da matriz, a espessura da parede da camisa da caixa matriz, a fixação das camisas na caixa matriz, o sistema de fixação da caixa matriz completa, o comprimento dos punções superiores e inferiores e o raio de curvatura dos punções inferiores e superiores. Um esboço do ferramental é apresentado na Figura 3.3.



3.2 – Esboço inicial do projeto



3.3 – Esboço do ferramental

Nesta fase do projeto, técnicas sistemáticas de auxílio ao planejamento, busca e solução de problemas conceituais e técnicos são altamente indicadas. Cabe ressaltar que, o projeto preliminar responde a 90% das informações técnicas de um projeto referente a 10% do tempo total de todo o processo de projeto, porque se caracteriza pela fase de estudo do problema. Portanto, é uma etapa que demanda cuidado na exploração dos conjuntos de soluções viáveis. Inicialmente foi elaborada uma matriz de correlação para o sistema (Figura 3.4).

Necessidade dos usuários	Características técnicas				
	Material do ferramental	Componentes padronizados	Tamanho da caixa matriz	Velocidade de prensagem	Tolerância de tamanho do esferóide
Utilizar sistema de fixação da caixa matriz igual a de tijolos	●	●	●	○	○
Mesma pressão de trabalho utilizada na prensagem de tijolos	○	●	●	●	○
Boa eficiência de prensagem	●	●	○	●	●
Facilidade de manutenção	●	●	●	○	○
Facilidade na extração dos esferóides	●	●	●	●	●
Utilização da mesma massa atomizada usada na prensagem isostática	○	●	●	○	●

Legenda:

Correlação forte: ● Correlação moderada: ● Correlação fraca: ○

Figura 3.4 – Matriz de correlação.

Dentre os usuários potenciais e a equipe de projeto, foram levantadas as principais necessidades dos usuários, e possíveis soluções técnicas, gerando esta matriz de correlação, apresentada na Figura 3.4. O resultado fornecido pela matriz são os parâmetros de projeto de maior relevância, sob o ponto de vista dos usuários e de projetos. Sessões de *Brainstorming* foram realizadas com grupos de estudos ao longo do desenvolvimento do projeto, focadas principalmente no sistema de compactação dos esferóides. Com os resultados obtidos, foi elaborado um quadro morfológico (Figura 3.5), um método discursivo e portanto, mais organizado, no qual foi possível explorar e esgotar soluções de projeto, para cada parâmetro de projeto importante identificado com o *Brainstorming*. Tabelas considerando vantagens e desvantagens foram elaboradas, com o objetivo de refinar as soluções, considerando diversos aspectos de projeto, como por exemplo, processos de fabricação, custos, limitação física, peso e ergonomia. O quadro morfológico indicou uma solução para a prensagem de esferóides de alumina utilizando uma prensa hidráulica de tijolos para revestimento, porém alterando as características físicas do material a ser compactado.

Parâmetro de projeto	Soluções			
Material dos punções inferiores e superiores	Aço SAE 1045	Aço VC 130	Alumínio	Cerâmica
Material da camisa da caixa matriz	Aço SAE 1045	Aço VC 130	Alumínio	Cerâmica
Material da caixa matriz	Aço SAE 1045	Aço VC 130	Alumínio	Cerâmica
Sistema de fixação dos punções inferiores e superiores	Encaixe	Grampo	Rosca	Pressão
Sistema de fixação da caixa matriz	Encaixe	Grampo	Rosca	Pressão
Processo de fabricação dos punções inferiores e superiores	Molde	Usinagem	Fundição	
Processo de fabricação das camisas da caixa matriz	Molde	Usinagem	Fundição	
Fixação das camisas na caixa matriz	Pressão	Rosca		
Processo de fabricação da caixa matriz	Molde	Usinagem	Fundição	
Geometria dos punções inferiores, superiores e camisas da caixa matriz	Cilíndrica alta	Cilíndrica regular		
Tolerâncias nas dimensões dos punções inferiores e superiores para o sobre material pós prensado	Mínima	Média	Grande	

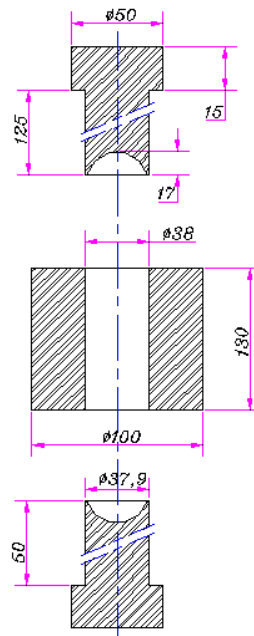
Figura 3.5 – Método morfológico aplicado para a solução.

3.7. Construção de um modelo e ensaios experimentais

Com as informações adquiridas nos itens anteriores, foi construído um modelo do sistema, com o objetivo de testar o funcionamento do ferramental para prensagem de esferóides de alumina através da prensagem hidráulica. O modelo com cavidade única do ferramental está apresentado na Figura 3.6.



(a)



(b)

* *Dimensões em mm*

Figura 3.6 – Modelo do ferramental: (a) sistema físico; (b) vista esquemática.

A grande competitividade que tem a prensagem do pó é a sua capacidade de produzir peças em seu formato final ou próximo a este, dispensando assim dispendiosas etapas de acabamento, ou exigindo um trabalho de acabamento muitíssimo mais reduzido que outras técnicas. Isto é possível porque a peça é tornada rígida já em sua forma final. Isto significa que se deve dar à massa de pó uma forma geométrica. Então o pó é prensado contra um molde que reproduz, de modo invertido, as formas da peça que se deseja produzir. Ao retirar o molde, o pó retém sua forma. Obviamente, a

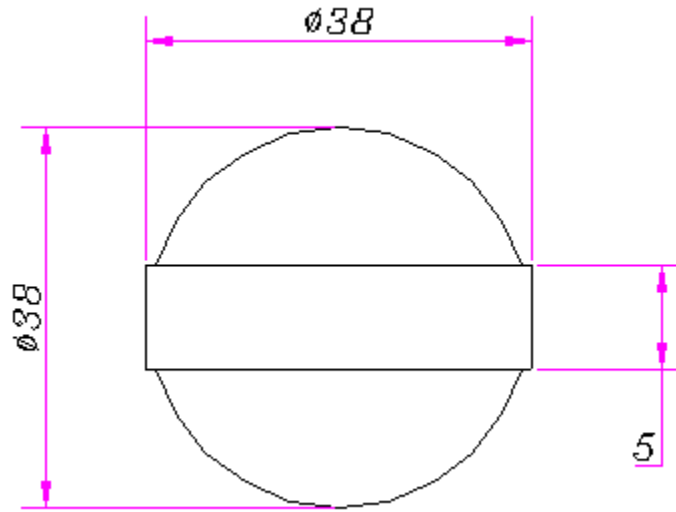
rigidez da peça moldada é limitada, mas deve ser o suficientemente rígida para que se possa manipulá-la nas etapas posteriores, até que ela seja enrijecida por tratamento térmico.

Assim, utilizando-se de uma prensa hidráulica manual (Figura 3.7), com capacidade de 400 kgf/cm² (39.226,4 KPa), colocou-se o modelo do ferramental na sua devida posição na prensa e fez-se o carregamento manual na cavidade cilíndrica da matriz. A quantidade necessária de massa atomizada introduzida na cavidade, foi variando em até chegar numa condição necessária para se obter um esferóide de diâmetro 38mm á cru, isto é, sem a sinterização, e foi concebida por tentativa-erro. Após algumas tentativas, chegamos a uma condição ideal de carregamento na cavidade, que foi de 58 gramas de massa. Também na compactação sempre era mantido a mesma pressão de compactação utilizada na prensagem de tijolos para revestimentos, que é de 120 kgf/cm² (11.767,92 KPa), pois assim garantiríamos os requisitos necessários para o desempenho da função dentro de um moinho, porque tanto os tijolos para revestimentos fabricados por prensagem hidráulica e as esferas produzidas pela prensagem isostática, tem as mesmas características técnicas.

Na Figura 3.8, temos uma representação de como ficará o esferóide prensado uniaxialmente no modelo do ferramental.



Figura 3.7 – Prensa hidráulica manual.



** Dimensões em mm*

Figura 3.8 – Representação do esferóide compactado no ferramental do modelo.

A diferença principal entre as esferas produzidas em uma prensa isostática (Figura 3.9) e nova proposta em prensa hidráulica (Figura 3.10), é que após a prensagem hidráulica é formado uma espécie de “colarinho” no esferóide que se dá pelo fato de haver um espaço entre o punção superior e punção inferior no momento da compactação.



Figura 3.9 – Esfera produzida com prensagem isostática.



Figura 3.10 – Colarinho formado no esferóide após a prensagem hidráulica.

Para o melhor desempenho na compactação, o ferramental foi totalmente lubrificado com grafite em pó para haver um melhor deslizamento entre as partes, não contaminando os esferóides após a sinterização. Isso pode ser identificado pela coloração escura (preta) no esferóide (Figura 3.10), já que a coloração da massa atomizada é basicamente branca.

3.7.1. Avaliação de desempenho do modelo

Após ter conseguido obter, através de prensagem hidráulica, os esferóides de alumina em um modelo do ferramental sugerido, testes laboratoriais foram executados para sabermos se teríamos as mesmas propriedades das esferas fabricadas do chamado “modo tradicional” com a prensagem isostática. Dentre todos os ensaios, o que realmente mais interessa para o regime de trabalho é a densidade dos esferóides e o desgaste dos mesmos após um tempo em serviço de moagem.

O teste de densidade aparente das esferas é realizado pesando-se a esfera queimada e o peso que esta exerce quando submersa em água, após seu mergulho em determinado equipamento.

A densidade aparente é a relação entre massa e volume aparente de uma peça cerâmica, sendo que o volume aparente compreende os poros abertos e fechados presentes na mesma. Deste modo, quanto menor o volume aparente de determinada bola, um menor número de espaços vazios possui o material, o que teoricamente a proporciona uma maior dureza, o que aumenta sua resistência e eficiência como agente moedor.

Deve-se citar que para a densidade aparente de esferas não é utilizado o método comum que se utiliza de mercúrio, porque o equipamento que mede densidade com mercúrio possui uma haste com extremidade plana, que não manteria a esfera sob tal haste, impossibilitando o ensaio, além de necessitar de grande volume de mercúrio devido ao volume das bolas. Para substituir o mercúrio utiliza-se um equipamento, como demonstra a Figura 3.11 a seguir, que possibilita a submersão das esferas e se utiliza de água (que não penetra em poros da bola, devido a sua absorção ser 0%).

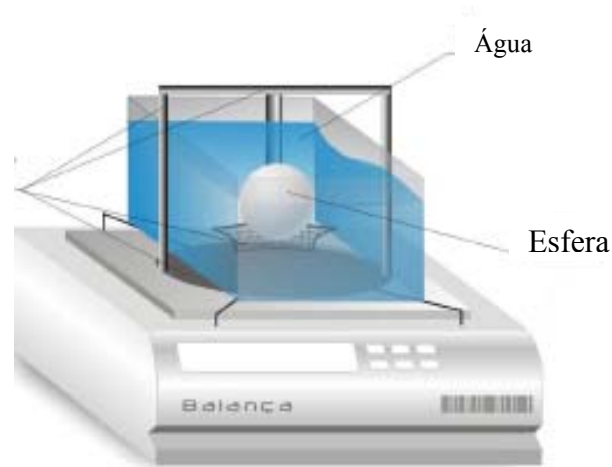


Figura 3.11 – Equipamento e balança para teste de densidade aparente.

Com o peso da esfera antes e depois de submersa, aplica-se a seguinte fórmula, padronizado pela empresa, para se obter os valores de densidade aparente:

$$D = \frac{((Mq \times 0,997) - (Ms \times 0,0011))}{(Mq - Ms)} \quad (1)$$

Onde:

D = Densidade das esferas (g/cm³);

Mq = Massa da bola queimada (g);

Ms = Massa da bola submersa (g).

Para ocorrer a liberação de um lote de esferas, as mesmas devem possuir um valor mínimo de densidade aparente na ordem de 3,58g/cm³. Abaixo deste valor, o lote fica retido e possíveis

alterações no processo deverão ser tomadas para que a densidade fique dentro do estabelecido. O processo atual com esferas padrões possui densidade média de 3,60g/cm³.

Já para o teste de desgaste padronizado pela empresa, o procedimento, consta em coletar 20 esferas de mesma formulação, água, e Alumina Calcinada tipo APC 3017, e colocá-las em um moinho industrial de 50 litros de capacidade, onde este permanece em serviço de rotação por 96 horas. Todas as esferas devem ser pesadas na sua totalidade. Após isto, retiram-se as esferas do moinho, para secagem e nova pesagem. A partir dos pesos obtidos antes e após o desgaste utiliza-se a seguinte fórmula para obtenção do percentual de desgaste:

$$\%D = \frac{(Mq - Md) \times 100}{Mq} \quad (2)$$

Onde:

%D = Percentual de desgaste das bolas;

Mq = Massa da bola queimada (g);

Md = Massa “após moagem” da bola (g).

Na Tabela 3.1 temos os resultados de densidade aparente e desgaste de 40 ensaios realizados com os esferóides produzidos com o modelo do ferramental.

Tabela 3.1 - Resultados dos ensaios de densidade e desgaste dos esferóides produzidos com o modelo do ferramental.

Ensaio de Densidade Aparente	Densidade (g/cm ³)	Ensaio de Desgaste	Desgaste (%)
EDAM 1	3,60	EDM 1	8,5
EDAM 2	3,61	EDM 2	8,0
EDAM 3	3,61	EDM 3	8,6
EDAM 4	3,60	EDM 4	8,7
EDAM 5	3,63	EDM 5	8,4
EDAM 6	3,64	EDM 6	8,7
EDAM 7	3,60	EDM 7	8,1
EDAM 8	3,61	EDM 8	8,4
EDAM 9	3,64	EDM 9	8,3
EDAM 10	3,60	EDM 10	8,4
EDAM 11	3,61	EDM 11	8,4
EDAM 12	3,62	EDM 12	8,5
EDAM 13	3,62	EDM 13	8,6
EDAM 14	3,62	EDM 14	8,4
EDAM 15	3,61	EDM 15	8,3
EDAM 16	3,61	EDM 16	8,6
EDAM 17	3,62	EDM 17	8,4
EDAM 18	3,60	EDM 18	8,5
EDAM 19	3,61	EDM 19	8,4
EDAM 20	3,61	EDM 20	8,6
EDAM 21	3,62	EDM 21	8,5
EDAM 22	3,60	EDM 22	8,4
EDAM 23	3,63	EDM 23	8,1
EDAM 24	3,64	EDM 24	8,0
EDAM 25	3,62	EDM 25	8,2
EDAM 26	3,60	EDM 26	8,3
EDAM 27	3,60	EDM 27	8,5
EDAM 28	3,60	EDM 28	8,4
EDAM 29	3,60	EDM 29	8,7
EDAM 30	3,62	EDM 30	8,3
EDAM 31	3,62	EDM 31	8,8
EDAM 32	3,63	EDM 32	8,4
EDAM 33	3,63	EDM 33	8,5
EDAM 34	3,62	EDM 34	8,6
EDAM 35	3,61	EDM 35	8,5
EDAM 36	3,61	EDM 36	8,6
EDAM 37	3,61	EDM 37	8,8
EDAM 38	3,61	EDM 38	8,7
EDAM 39	3,63	EDM 39	8,6
EDAM 40	3,60	EDM 40	8,7
MÉDIA	3,61	MÉDIA	8,46

A Tabela 3.2 mostra os resultados de densidade aparente e desgaste das esferas obtidas na prensagem isostática comparadas com os esferóides prensados no método hidráulico.

Tabela 3.2 – Comparação de densidade aparente e desgaste das esferas / esferóides obtidos pelos diferentes processos (modelo).

Descrição	Prensagem Isostática	Prensagem Hidráulica (modelo)
Densidade aparente	De 3,58 a 3,64 g/cm ³	De 3,60 a 3,64 g/cm ³
Desgaste (teste moinho 96 horas em serviço)	De 8,0 a 10,0%	De 8,0 a 8,8%

Pelo fato de haver uma formação de “colarinho” nos esferóides produzidos na prensagem hidráulica, notou-se que nas primeiras horas em serviço, houve um desgaste maior em relação às esferas do método isostático, mais isso nada modificou o resultado final. Notou-se também, que após estes esferóides serem retirados dos moinhos depois de 24 horas de serviço, que no mesmo local onde se encontrava o “colarinho”, agora aparecia uma espécie de ranhura (Figura 3.12), mais no final das 96 horas de serviço nada mais se apresentava no esferóide. Vale ressaltar que não houve nenhuma quebra de esferóide no período de moagem devido a esta ranhura.



Figura 3.12 – Ranhura no esferóide após 24 horas do teste de desgaste.

3.7.2. Otimização dos esferóides do modelo

Com o objetivo de se obter uma real situação de trabalho, utilizando estes novos esferóides, foi realizada uma série de moagem. No experimento de otimização 1 do modelo, foi feito a moagem laboratorial de esmalte cerâmico para aplicação em placas cerâmica (Figura 3.13), utilizando esferóides para ver se não tínhamos problemas de contaminação pelo fato de haver um maior desgaste dos esferóides no início da moagem devido ao “colarinho”, mais os resultados das aplicações se mostraram idênticos aos elaborados com esmaltes produzidos com as esferas do método isostático. No experimento de otimização 2 do modelo, foi feita a moagem de argilas para a obtenção de barbotina para produção de massa cerâmica para prensagem (Figura 3.14), e como no primeiro experimento, não foi observado nenhuma diferença no produto final.



Figura 3.13 – Aplicação de esmalte branco e preto para teste de qualidade do esmalte em placa cerâmica.



Figura 3.14 - Prova de compactação com massa cerâmica produzida através dos corpos moedores compactados através da prensagem hidráulica do modelo.

3.8. Construção de um protótipo

Depois alcançados ótimos resultados, obtido pelo modelo do ferramental já apresentado, decidiu-se fabricar um protótipo para uma produção industrial de esferóides de alumina utilizando a prensagem hidráulica, pois esta nos daria a real situação do desenvolvimento.

Para o teste com o protótipo do ferramental, foi utilizado uma prensa hidráulica modelo PH 400 da marca INCO (Figura 3.15).

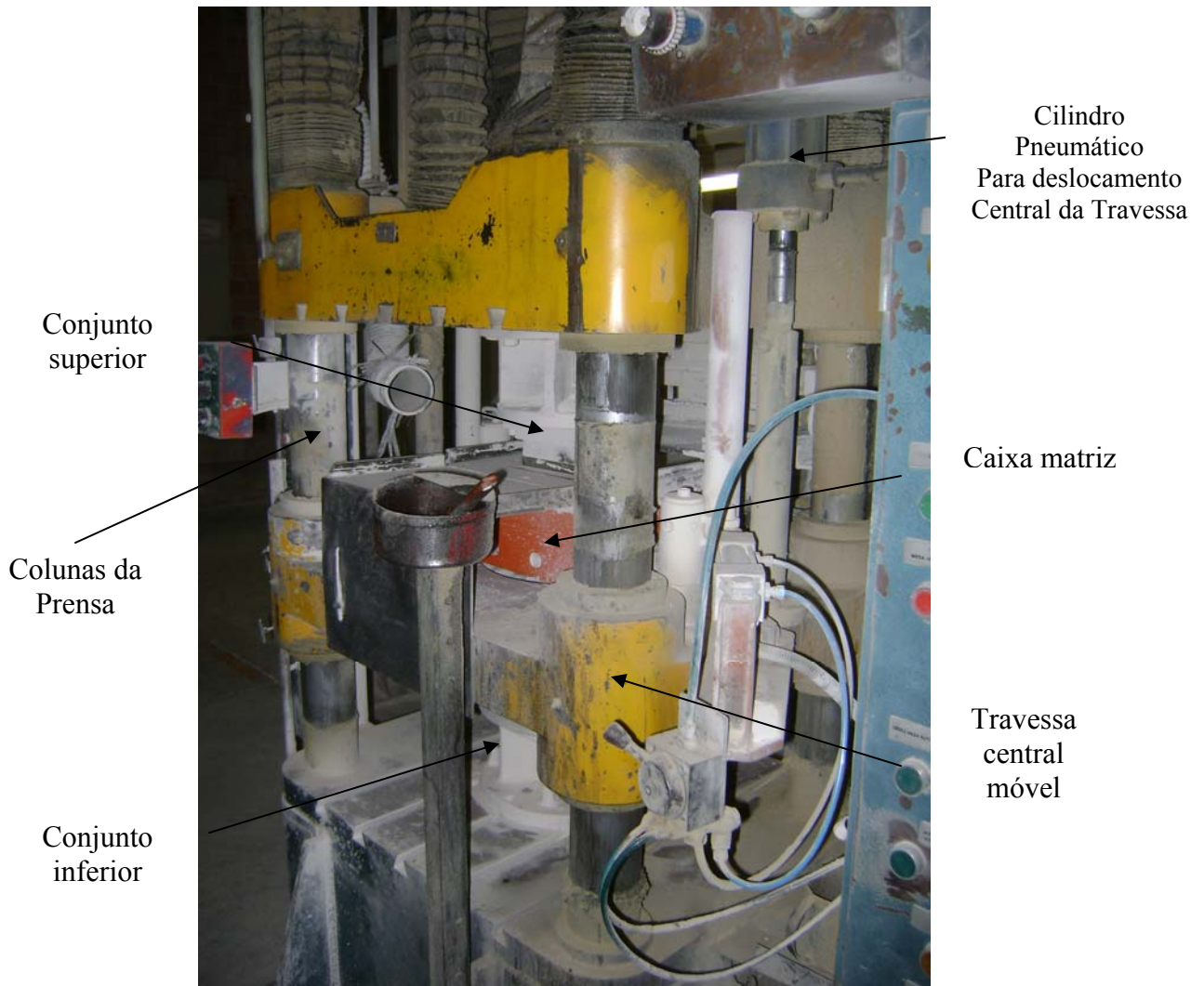


Figura 3.15 – Prensa hidráulica modelo PH 400 INCO.

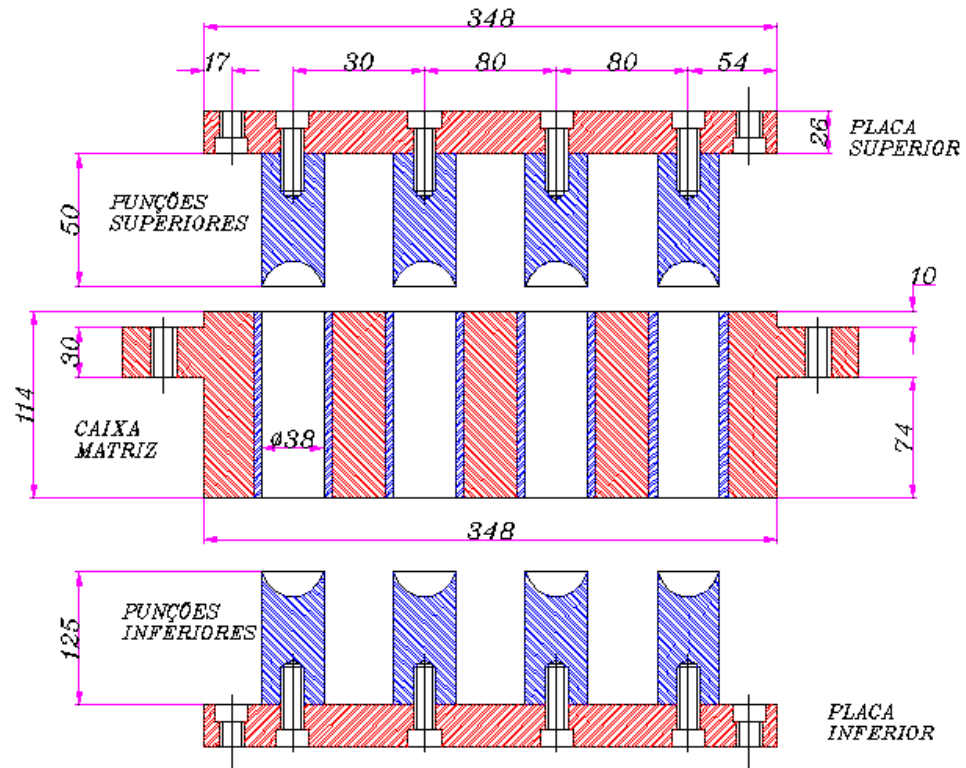
Até o momento do desenvolvimento do protótipo, a prensa que foi utilizada para o teste, se encontrava produzindo tijolos de alumina para revestimento, e foi aí que, utilizando a metodologia para desenvolvimento de projetos, criou-se a matriz de correlação e o quadro do método morfológico aplicado para a solução de problemas (visto neste mesmo capítulo) para dar seqüência em nosso trabalho. Então como já estava sendo utilizada esta prensa, verificou-se como poderíamos fabricar nosso protótipo baseado nas características físicas da caixa matriz dos tijolos, pois teríamos que fazer com que o novo ferramental se adapta-se a aquela prensa, sem que houve-se mudanças significativas na parte estrutural da máquina, pois a idéia era utilizar a mesma metodologia de fixação e expulsão das peças da caixa matriz, tanto para os tijolos quanto para os novos esferóides de alumina.

Na Figura 3.16, temos a caixa matriz para produção de tijolos de alumina para revestimento de moinhos.



Figura 3.16 – Caixa matriz de tijolos de alumina para revestimentos.

Tendo o objetivo das mesmas características físicas da parte externa da caixa matriz de tijolos para a de esferóides, preservando a metodologia de carregamento, fixação da caixa matriz e expulsão do material prensado, e já tendo realizado o teste através do modelo criado, chegou-se a uma caixa matriz para esferóides conforme visto na Figura 3.17.



(a)



(b)

Figura 3.17 – Ferramental para prensagem hidráulica de esferóide de alumina: (a) vista esquemática; (b) sistema físico.

Conforme solucionado no quadro morfológico, a caixa matriz foi produzida em aço SAE 1045 e as camisas das cavidades da caixa, os punções superiores e punções inferiores, foram fabricados em aço VC 130 conforme detalhe na Figura 3.18:

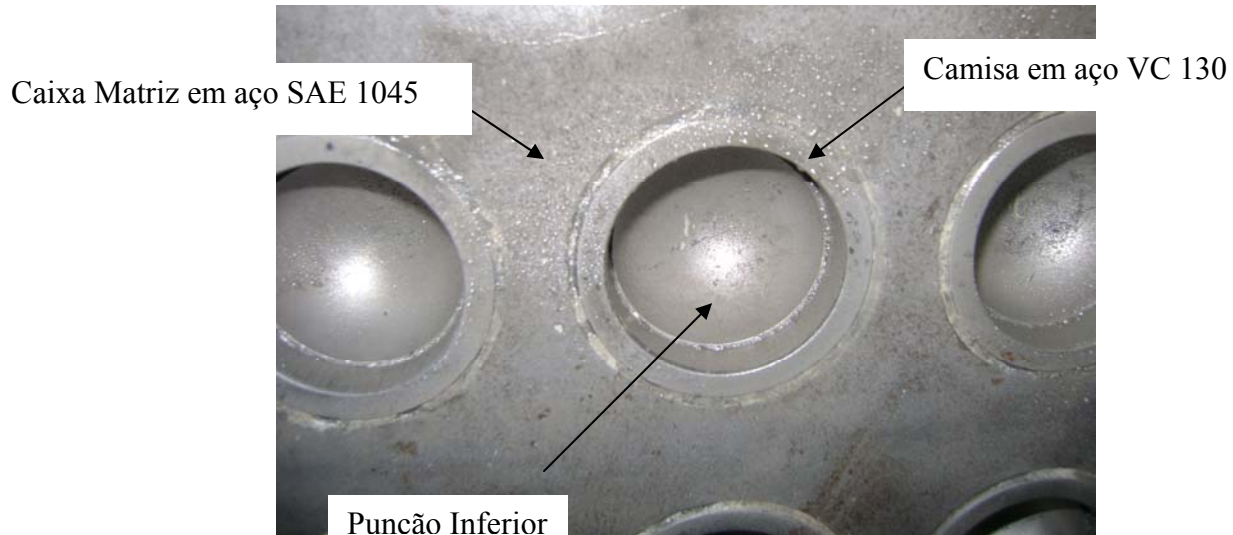


Figura 3.18 – Detalhe caixa matriz.

Das modificações necessárias a serem realizadas, a mais significativa foi a mudança na expulsão do material já compactado. No primeiro momento a caixa matriz se encontrava fixa na travessa central da prensa, onde esta também ficava imóvel, e quem fazia a movimentação eram os punções inferiores e superiores, pois após feita a compactação exercida pela força do cilindro da prensa através do punção superior, vinha a movimentação de subida do punção inferior para expulsar o material já compactado que se encontrava dentro da caixa matriz. Então, para melhorar ainda mais esta retirada do material já compactado que se encontrava dentro da caixa matriz, sem que houve-se defeito de extração pelo fato da aplicação da força dos punções inferiores no compactado, fizemos a automação da travessa central da prensa hidráulica, fazendo a movimentação no sentido vertical e a fixação dos punções inferiores, sendo que agora para ser extraído o material compactado, a caixa matriz teria que fazer a movimentação ao invés dos punções inferiores. Sendo assim, a prensagem se dá na seguinte forma:

1. Carregamento das cavidades com massa;
2. Aplicação de força hidráulica através do cilindro principal da prensa nos punções superiores, no sentido de cima para baixo;

3. Após feita a compactação, os punções superiores voltam ao seu estágio inicial no sentido de baixo para cima;
4. Movimentação da travessa central móvel da prensa, no sentido de cima para baixo, fazendo automaticamente a movimentação da caixa matriz, já que ela se encontra fixa na travessa;
5. Faz-se a extração dos compactados;
6. Nova movimentação da travessa central, no sentido de baixo para cima, para dar início a novos carregamentos de massa.

Observamos que nesta nova seqüência de trabalho não há movimentação dos punções inferiores, já que agora eles se encontram fixos na estrutura da prensa hidráulica.

Para esta automação (movimentação da travessa central), foi instalado cilindros pneumáticos nas laterais da estrutura da prensa. Na Figura 3.15, é apresentado a disposição dos cilindros na prensa hidráulica.

Para a fixação da caixa matriz na travessa central da prensa, foi utilizado a mesma técnica para a fixação da caixa matriz de tijolos, que é através de parafusos conforme mostra a Figura 3.19.



Figura 3.19 – Fixação da caixa matriz na travessa central da prensa hidráulica.

Como utilizaríamos a mesma forma construtiva da caixa matriz de tijolos, fazendo a modificação da forma construtiva do material a ser compactado, criou-se um ferramental que

chamaremos de peças de contato, pois é ali nesta parte da ferramenta onde há o atrito com a massa a ser compactada. Estas peças de contato se dá por três elementos:

1. Punção superior;
2. Camisa;
3. Punção inferior;

Na Figura 3.20 vemos a seqüência correta dos elementos;

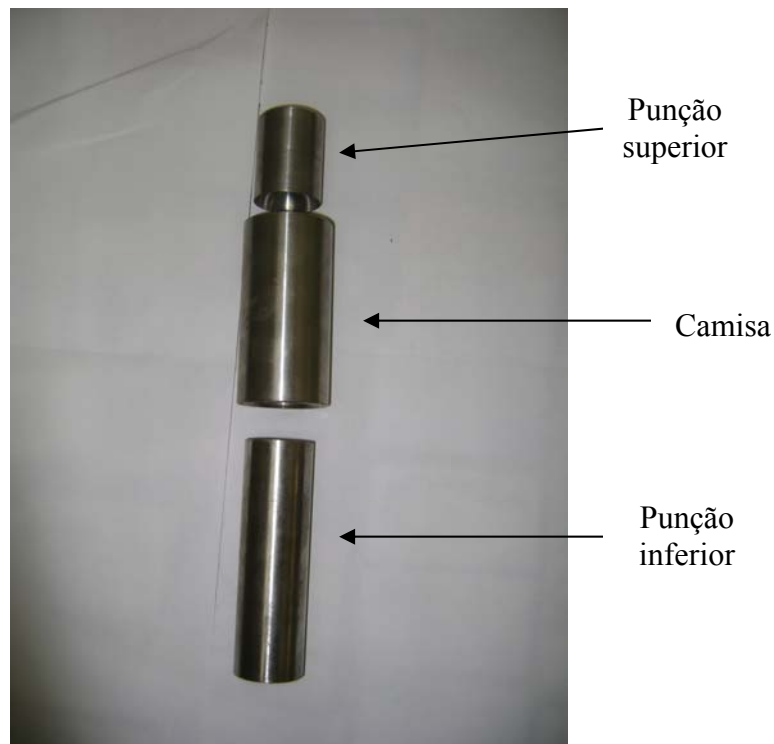


Figura 3.20 – Seqüência dos elementos de contato da ferramenta.

Para a fixação dos punções inferiores e superiores na placa móvel ou fixa, formando o conjunto superior ou inferior, foi dado através de parafusos (Figura 3.21). Já para a fixação da camisa no interior da caixa matriz, a mesma é feita através de pressão com prensagem.



Figura 3.21 – Fixação dos punções superiores nas placas.

Então, para esta determinada dimensão da caixa matriz, foi utilizado o espaço para a fabricação de 8 cavidades de prensagem, sendo que cada cavidade obteríamos esferóides com dimensões de 38mm, também conhecidas no ramo cerâmico de esferas de 30mm. Estas dimensões já está considerado o tratamento térmico (queima) e a retração de aproximadamente de 16 a 18% ocasionados neste mesmo tratamento.

3.8.1. Ensaios experimentais do protótipo

Os mesmos experimentos que foram realizados no modelo, também foram utilizados nos experimentos do protótipo, porém utilizando a prensa hidráulica automática e a nova matriz agora contendo um maior número de cavidades. A pressão que foi aplicada na compactação dos esferóides foi a mesma utilizada nos tijolos para revestimentos, pois a densidade dos tijolos se igualava a densidade das esferas prensadas via sistema isostático. O volume de massa colocado nas cavidades também foi o mesmo utilizado no experimento com o modelo (58 gramas), pois lá obtivemos o resultado ideal para a obtenção dos esferóides chamados de 30mm.

Com isso, obteve-se os mesmos resultados do modelo com o protótipo, porém com muito mais produção devido a sua agilidade, por ser uma prensa automática e o número de esferóides obtidos a cada prensada por ter mais cavidades disponível para a mesma prensagem.

3.8.2. Avaliação do desempenho do protótipo

O ferramental do protótipo comportou-se como o planejado, sendo que a princípio, por ser tratar de protótipo, o carregamento de massa nas cavidades das camisas da caixa matriz, foi feito manualmente utilizando uma caneca, e o acionamento da movimentação mecânica (início da prensagem) foi executada manualmente através de um botão de início de trabalho de prensagem, isso para assegurar as condições necessárias para prensagem automática da prensa após seu *start*. A única regulagem que foi executada após a primeira prensada, foi a regulagem dos sensores da mesa da travessa central para assegurar a altura mínima necessária do “colarinho” dos esferóides compactados, servindo este como garantia de não haver contato do punção superior com o punção inferior no momento da compactação, pois se houve-se contato entre os dois punções, aconteceria a quebra ou alguma anomalia no formato dos punções.

A avaliação de desempenho do material (esferóides) que foi compactado através do protótipo, também ocorreu da mesma forma que foi realizada no modelo, sendo que depois dos esferóides serem tratados termicamente, realizou-se 40 ensaios de densidade aparente e desgaste dos esferóides, e neles foram obtidos resultados conforme demonstrados na Tabela 3.3.

Na Tabela 3.4 tem-se os resultados de densidade aparente e desgaste das esferas obtidas na prensagem isostática comparadas com os esferóides prensados no método hidráulico do protótipo.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de densidade e desgaste dos esferóides produzidos com o protótipo do ferramental.

Ensaio de Densidade Aparente	Densidade (g/cm ³)
EDAP 1	3,61
EDAP 2	3,60
EDAP 3	3,62
EDAP 4	3,60
EDAP 5	3,60
EDAP 6	3,60
EDAP 7	3,60
EDAP 8	3,61
EDAP 9	3,62
EDAP 10	3,62
EDAP 11	3,63
EDAP 12	3,63
EDAP 13	3,61
EDAP 14	3,60
EDAP 15	3,60
EDAP 16	3,60
EDAP 17	3,63
EDAP 18	3,62
EDAP 19	3,61
EDAP 20	3,61
EDAP 21	3,61
EDAP 22	3,63
EDAP 23	3,60
EDAP 24	3,61
EDAP 25	3,61
EDAP 26	3,61
EDAP 27	3,68
EDAP 28	3,60
EDAP 29	3,62
EDAP 30	3,63
EDAP 31	3,60
EDAP 32	3,60
EDAP 33	3,63
EDAP 34	3,61
EDAP 35	3,60
EDAP 36	3,62
EDAP 37	3,60
EDAP 38	3,62
EDAP 39	3,62
EDAP 40	3,63
MÉDIA	3,61

Ensaio de Desgaste	Desgaste (%)
EDP 1	8,0
EDP 2	8,2
EDP 3	8,5
EDP 4	8,4
EDP 5	8,3
EDP 6	8,6
EDP 7	8,5
EDP 8	8,3
EDP 9	8,2
EDP 10	8,7
EDP 11	8,8
EDP 12	8,7
EDP 13	8,6
EDP 14	8,8
EDP 15	8,9
EDP 16	8,6
EDP 17	8,5
EDP 18	8,3
EDP 19	8,4
EDP 20	8,5
EDP 21	8,4
EDP 22	8,7
EDP 23	8,7
EDP 24	8,8
EDP 25	8,0
EDP 26	8,6
EDP 27	8,4
EDP 28	8,3
EDP 29	8,2
EDP 30	8,7
EDP 31	8,6
EDP 32	8,5
EDP 33	8,4
EDP 34	8,6
EDP 35	8,8
EDP 36	8,7
EDP 37	8,4
EDP 38	8,5
EDP 39	8,6
EDP 40	8,6
MÉDIA	8,51

Tabela 3.4 – Comparação de densidade aparente e desgaste das esferas / esferóides obtidos pelos diferentes processos (protótipo).

Descrição	Prensagem Isostática	Prensagem Hidráulica (protótipo)
Densidade aparente	De 3,58 a 3,63 g/cm ³	De 3,60 a 3,63 g/cm ³
Desgaste (teste moinho 96 horas em serviço)	De 8,0 a 9,5%	De 8,0 a 8,9%

Na Figura 3.22 pode-se visualizar o esferóide já compactado no protótipo antes de sua retirada de dentro das camisas da caixa matriz.



Figura 3.22 – Esferóide compactado no protótipo.

Como visto também no modelo, a parte escura que podemos observar nos esferóides compactados, nada mais é que grafite em pó que foi colocado anteriormente à prensagem através de um pincel chato para haver melhor deslizamento entre as partes que a compõem, evitando quebras na prensagem. Este grafite foi colocado a cada prensada que realizamos, mais depois de algumas

compactações, viu-se que não mais havia necessidade da colocação de grafite a cada prensada, pois o mesmo se mantinha nas partes dos elementos após várias prensadas. Este grafite que é colocado e que aparece no material compactado crú, após a realização do tratamento térmico, que chega a uma temperatura de 1700 °C durante um patamar de 8 horas, desaparece quando é retirado do processo de queima. Na Figura 3.23 temos os esferóides retirados do ferramental proposto após a compactação.



Figura 3.23 – Esferóides retirados do ferramental.

Após a operação de prensagem, os esferóides foram organizados nos carrinhos e foram levados ao forno. A queima ocorreu em um forno modelo Sitti, do tipo garagem (intermitente). As 30 horas de queima são necessárias para originar uma curva que leva a temperatura máxima até os 1700°C. Tal curva de queima pode ser mais bem ilustrada no gráfico da Figura 3.24.

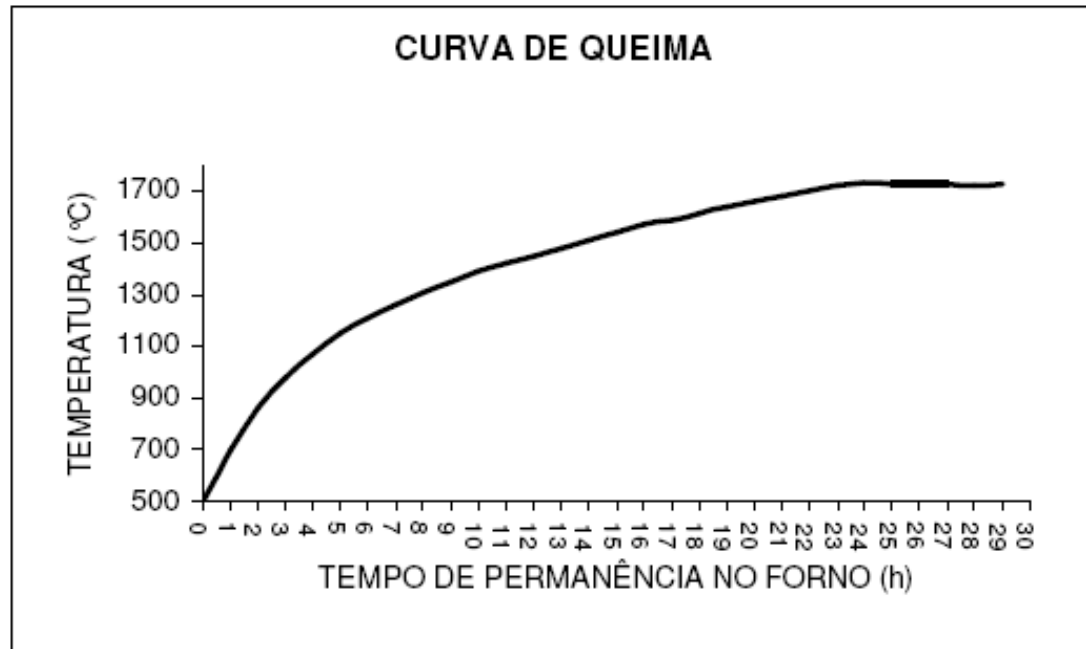


Figura 3.24 – Curva de queima utilizada no trabalho.

Após feita a sinterização dos esferóides, procedeu-se com os ensaios experimentais de desgaste (Figura 3.25) e de densidade aparente do material, sendo que estes ensaios foram realizados igualmente aos esferóides produzidos pelo modelo já descrito.

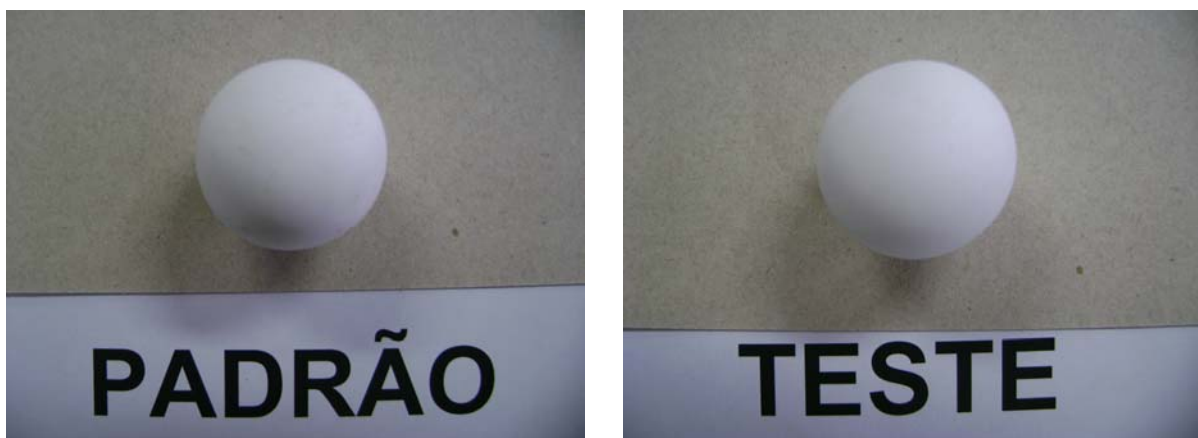


Figura 3.25 – Teste de desgaste após 96 horas de serviço.

Na Figura 3.26 podemos observar a diferença entre um esferóide produzido com a nova metodologia através da prensagem hidráulica e uma esfera padrão produzida pela prensagem isostática. Nos dois casos, ambos já se encontram sinterizados.

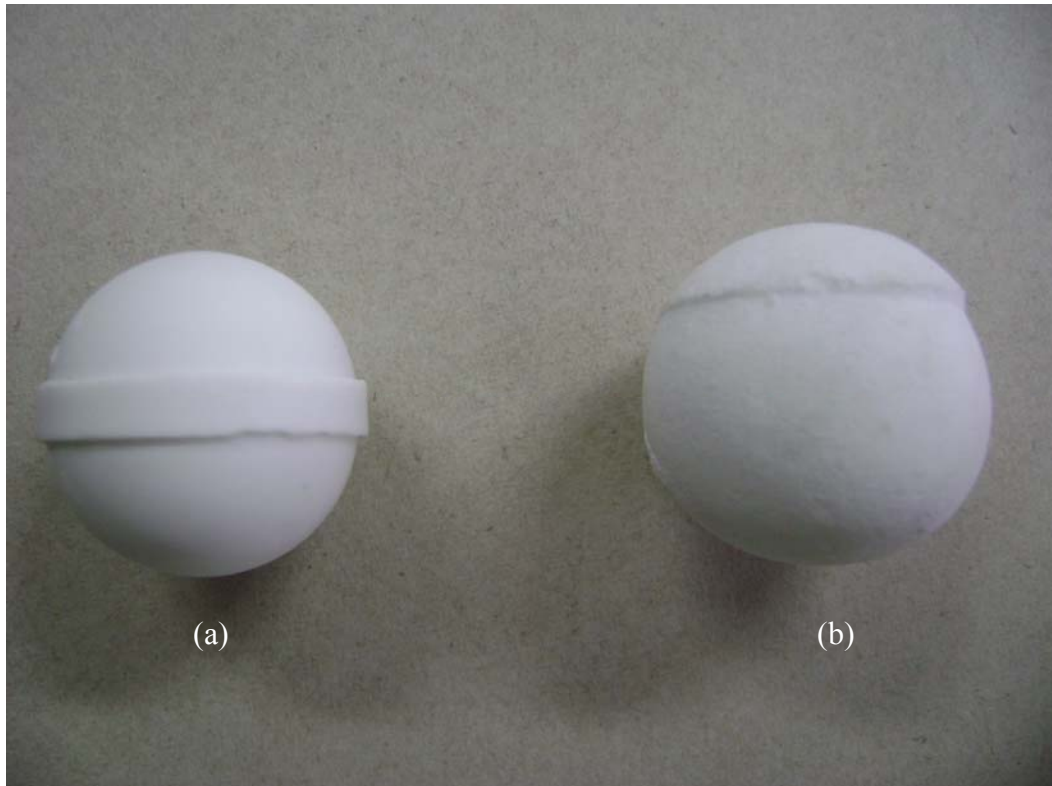


Figura 3.26 – Esferóides compactados e sinterizados: (a) prensagem hidráulica; (b) prensagem isostática.

3.8.3. Otimização dos esferóides do protótipo

Também, da mesma forma que foi executado na otimização dos esferóides do modelo, no protótipo também foi realizado. No experimento de otimização 1 do protótipo, fizemos a moagem laboratorial de esmalte cerâmico para aplicação em placas cerâmicas (Figura 3.27), utilizando esferóides para ver se não tínhamos problemas de contaminação pelo fato de haver um maior desgaste dos esferóides no início da moagem devido ao “colarinho”, mais os resultados das aplicações se mostraram idênticos aos elaborados com esmaltes produzidos com as esferas do método isostático. Para se ter certeza absoluta do funcionamento, aplicou-se, além do esmalte, corante sobre o esmalte (Figura 3.28) para observar a reação, mais nada ocorreu. No experimento de otimização 2 do protótipo, foi feita a moagem de argilas para a obtenção de barbotina para produção de massa cerâmica para prensagem (Figura 3.29), e como no primeiro experimento, não tivemos diferença alguma no produto final moído.

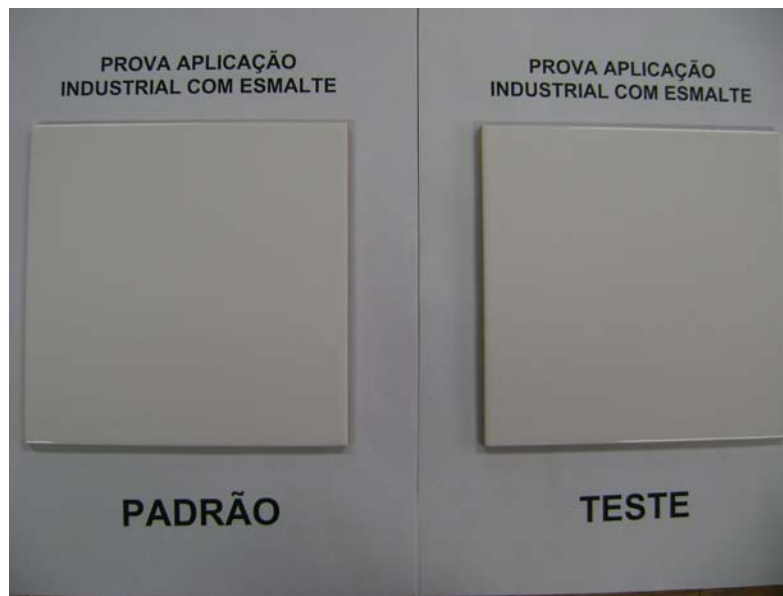


Figura 3.27 - Aplicação de esmalte em placas cerâmicas (esmalte teste produzido com esferóides compactados em prensa hidráulica).



Figura 3.28 - Aplicação de esmalte e corantes em placas cerâmicas (esmalte teste produzido com esferóides compactados em prensa hidráulica).



Figura 3.29 - Prova de compactação com massa cerâmica produzida através dos corpos moedores compactados através da prensagem hidráulica do protótipo.

Também, como acontecido nos esferóides produzidos pelo modelo, os esferóides do protótipo depois de submetidos ao ensaio de desgaste, nas primeiras 24 horas de trabalho apareceram algumas ranhuras onde se encontrava o “colarinho” antes da sinterização, mais no final das 96 horas de trabalho, que é o tempo base para análise de desgaste, nada de anormal ocorreu.

Portanto, todos os ensaios e provas necessárias que se aplicou com o material obtido através do ferramental proposto, nenhum resultado interferiu no processo produtivo.

4. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES DO PROJETO

Uma das dificuldades encontradas na realização deste trabalho foi em como convencer a empresa a investir em uma idéia totalmente nova para a obtenção de corpos moedores através da prensagem hidráulica, já que todos os métodos de produção desses corpos encontrados em literatura eram através da prensagem isostática. Mais com os ótimos resultados obtidos com o modelo do ferramental, foi possível fabricar um protótipo em escala industrial, dando crédito e resultados além do esperado.

Depois de obtidos os esferóides compactados através deste novo método, todos que acompanharam o desenvolvimento se mostraram muito satisfeitos também com o formato mais esférico destes corpos moedores em relação às esferas compactadas através da prensagem isostática, como foi verificado nesta dissertação, onde foram feitas as comparações dos dois corpos, mostrando que além de resultados técnicos iguais ou superiores, esteticamente também ficou superado.

O que ainda precisa melhorar na estética destes esferóides, é o “colarinho” que se apresenta após a prensagem, pois a primeira vista, estes “colarinhos” causam certa desconfiança, dando uma impressão de ser frágil. Mais isso é superado através da comprovação do trabalho que estes corpos realizam em serviço.

Fazendo uma comparação de produção entre a prensagem hidráulica e a prensagem isostática, foi constatado que o volume de produção com o novo método é superior em relação ao tradicional de 20 a 25 %, pois o nível de complexidade de carregamento de massa nas cavidades, do tempo de prensagem e da extração dos compactos do modo isostático é muito elevado, perdendo em quantidade produzida.

5. CONCLUSÕES

Com os objetivos, chegou-se às seguintes conclusões principais:

1. Para a prensagem hidráulica de esferóides de alumina, neste caso, o método proposto, foi possível utilizar o mesmo pó atomizado que é usado na fabricação de esferas de alumina obtidas através da prensagem isostática, e nos tijolos de alumina para revestimento de moinhos, não necessitando de mudanças na formulação e no processo de produção do pó.
2. Facilidade de adaptação do ferramental desenvolvido em prensas hidráulicas industriais.
3. Na sinterização dos esferóides da metodologia proposta, também se manteve a mesma curva de queima dos produtos originados pela forma tradicional.
4. Os esferóides obtidos com o ferramental proposto tiveram desempenho igual, ou superior as esferas compactadas no modo isostático tradicional. Isto foi comprovado através dos testes de desgaste e de densidade dos esferóides, que são considerados os primordiais nesta ocasião, se mostraram estar dentro dos padrões necessários para o desempenho de sua função.
5. Concluiu-se também que apesar dos esferóides compactados pelo ferramental proposto apresentar uma espécie de “colarinho” na sua forma física, isso nada influenciou na obtenção final do produto beneficiado por estes corpos moedores.

É interessante frisar que esta metodologia pode sofrer alterações no que diz respeito à fixação da caixa matriz e dos punções inferiores e superiores devido as diferentes características estruturais de cada equipamento, mais o princípio de obtenção do compactado poderá ser conforme descrito nesta dissertação.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A seguir serão listadas algumas sugestões que poderão ser seguidas como forma de continuação deste trabalho, ou mesmo em estudos similares com o conteúdo que foi abordado na presente dissertação.

1. Desenvolver projeto detalhado de ferramental automatizado para produção de esferóides em larga escala para uso industrial;
2. Avaliar a possibilidade de obtenção de esferóides de melhor qualidade geométrica e de propriedades de desgaste;
3. Estudar a possibilidade de alteração da curva de queima para reduzir o consumo de energia no processo;
4. Minimizar no possível, o tamanho (altura) do “colarinho” que aparece no esferóide após a compactação, sem haver risco de contato entre os punções inferiores e superiores, evitado quebra de matriz, e melhorando ainda mais o estado físico esférico dos corpos compactados.
5. Utilizar o método proposto nesta dissertação para a obtenção de esferóides com diferentes dimensões.

REFERÊNCIAS

- AMARÓS, A. J. L.; 2000. **“A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde”**. Anais do Science of Whiteware I. Instituto de Tecnologia Cerâmicas; Universidad de Valência, Espanha.
- AMARÓS, A. J. L.; 2000. **“A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte II: A Compactação”**. Anais do Science of Whiteware I. Instituto de Tecnologia Cerâmicas; Universidad de Valência, Espanha.
- AMARÓS, A. J. L.; 2001. **“A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte III: Variáveis do Processo de Compactação”**. Anais do Science of Whiteware I. Instituto de Tecnologia Cerâmicas; Universidad Jaume I, Castellón, Espanha.
- AMARÓS, A. J. L.; 2001. **“A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte V: Descrição da Etapa de Prensagem”**. Anais do Science of Whiteware I. Instituto de Tecnologia Cerâmicas; Universidad Jaume I, Castellón, Espanha.
- AYDIN, I.; BRISCOE, B.J.; SANLITURK, K.Y.; 1996. **“The Internal Form of Compacted Ceramic Components”**. Powder Technology, v. 89, p. 239-254.
- BACK, N.; 1983. **“Metodologia de Projetos Industriais”**. Ed. Guanabara Dois, p. 1-60.
- BORTZMEYER, D.; 1992. **“Modelling Ceramic Powder Compaction”**. Powder Technology, v. 70, p. 131-139.
- BRISCOE, B.J.; OZKAN, N.; 1997. **“Compaction Behaviour of Agglomerated Alumina Powders”**. Powder Technology, v.90, p. 195-203.
- BRISTOT, V.M.; 1996. **“Máquinas e Equipamentos para Cerâmica”**. 1.ed. Criciúma, Santa Catarina : Editora Luana.

CHIAVERINI, V.; 2001. “**Metalurgia do Pó**”. 4 ed. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

DIMILA, R.A.; REED, J.S.; 1983. “**Stress Transmission During the Compaction of a Spray-dried Alumina Powder in a Steel Die**”. Journal of the American Ceramic Society, v.66, p. 667-672.

FORTULAN, C.A.; 1997. “**Influência dos Métodos de Injeção e de Prensagem Isostática no Desempenho das Cerâmicas Estruturais**”. São Carlos. 187 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

KIM, H.G.; LEE, J.W.; 1998. “**Effect of Friction Between Powder and a Mandrel on Densification and of Iron Powder During Cold Isostatic Pressing**”. International Journal of Mechanical Sciences, v.40, p. 507-519.

KINGERY, W.D.; 1998. “**La Transición de la Cerámica desde el Oficio Artesanal a la Industria basada em la Ciência**”. V Congresso Mundial de la Calidad de Azulejo y del Pavimento Ceramico, (Mar. 1998 : Castellón, España). Anais Qualicer 98, p.3-17.

KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R.; 1976. “**Introduction to Ceramics**”. 2. ed. New York, John Wiley & Sons.

MCENTIRE, B.J.; 1984. “**Tooling Design for Wet-Bag Isostatic Pressing**”. MANGELS, J.A. “**Advances in Ceramics: 9 Forming of Ceramics**”, USA, p. 16-31.

NAVARRO, E. J. E.; ALBARO, A. J. L.; FUSTER, M. M.; 1994. “**Tecnologia Cerâmica**”. 1. ed. Volume IV. Universidad de Valencia, Espanha.

- NEGRE, F.; SANCHES E.; 1998. “**Avanços no Processamento de Pós Atomizados para a Fabricação de Revestimentos**”. Anais do Science of Whiteware I. Instituto de Tecnologia Cerâmicas; Universidad Jaume I, Castellón, Espanha.
- PAHL G., BEITZ W., J. FELDHOUSEN, H. GROTE; 2005. “**Projeto na Engenharia**”. Editora Edgard Blucher (Tradução da 6 ed. Alemã).
- PAHL G., BEITZ W.; 1996. “**Engineering Design: Systematic Approach**”. Springer-Verlag, 2ª ed., Londres.
- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H.; 1980. “**Manual de Engenharia Química**”. 5. ed. Rio de Janeiro : Editora Guanabara Dois S.A.
- REED J.S.; 1995. “**Principles of Ceramics Processing**”. 2 ed. New York, John Wiley & Sons.
- RIBEIRO, M.J; 2001. “**Moagem em Moinhos de Bolas; Estudo de Algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo**”. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal.
- SACMI; 1996. “**Catálogo : Essicatoio Verticale Automatico EVA 140**”. Ímola - Italy.
- SACMI; 2008. “**Catálogo Geral: Equipamentos**”. Itália. Disponível em:
<http://www.sacmi.com>. Acessado em junho de 2008.