Campus de São Carlos

CONFORMAÇÃO DE PÓ DE AÇO INOXIDÁVEL
ATRAVÉS DO PROCESSO DE INJEÇÃO À BAIXA
PRESSÃO

ROGÉRIO AKIHIDE IKEGAMI

Orientador: Prof. Tit. Benedito de Moraes Purquério

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONFORMAÇÃO DE PÓ DE AÇO INOXIDÁVEL
ATRAVÉS DO PROCESSO DE INJEÇÃO À BAIXA
PRESSÃO

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 13./11./00

Ass.: Danilo

Eng. Rogério Akihide Ikegami

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para o Título de Mestre em engenharia mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Benedito de Moraes Purquerio

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016773

SÃO CARLOS
SETEMBRO - 2000

Class.	TESE-EESC
Cutt.	2760
Tombo	T0252/00

at 1121595

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

I26c Ikegami, Rogério Akihide.
Conformação do pó de aço inoxidável através do
processo de injeção à baixa pressão / Rogério Akihide
Ikegami. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tit. Benedito de Moraes
Purquerio.

1. Conformação. 2. Pós metálicos. 3. Injeção.
4. Sinterização. 5. Pó de aço inoxidável 316L.
6. Moldes. 7. Extração de VO. I. Título.

Aos
meus pais, Hiroshige e Yoshie
pela dedicação, incentivo e apoio
por estes longos anos que me
propiciaram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Em particular agradeço:

Ao Professor Dr. Benedito de Moraes Purquerio, orientador, incentivador, conselheiro e administrador, pelo profissionalismo e dedicação.

Ao Professores Dr. Waldek Wladimir Bose Filho pelos aconselhamentos técnicos e filosóficos.

Aos amigos e técnicos do LAMAFE Adão Santo Bolzan, José Carlos Botelho, José Carlos Risardi, Luis Carlos Bruno, pelo apoio, participação, dedicação, compartilhamento e infra-estrutura dedicada.

Aos estagiários do SENAI e João Pedro Teixeira, pelo auxílio técnico.

Aos amigos e companheiros de trabalho, Paulo Alberto Silveira Wrege, Leonardo Guimarães Garcia e Osvaldo Luis Asato, pela amizade, apoio, incentivo e pelas discussões ocorridas no período.

Aos técnicos do Departamento de Materiais-EESC-USP, José Silvano C. Lima e João Gerônimo Bernardi pelo apoio técnico prestado.

Ao CEFET-PR Unidade de Cornélio Procopio pelo apoio prestado.

Ao CNPq, pela ajuda financeira e pelo profissionalismo desempenhado pelos seus assessores.

Ao PADCT/CNPq pelos auxílios recebidos.

A todos os Professores, Funcionários e Alunos do Departamento de Engenharia Mecânica que sempre estiveram presentes e participativos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – ESTADO DA ARTE	7
2.1 – Metalurgia do Pó (MP)	7
2.2 - Importância da Metalurgia do Pó	12
2.3 - Fabricação de Pós Metálicos	17
2.3.1 - Fabricação mecânica de pós metálicos	19
2.3.2 - Fabricação química	20
2.3.3 - Atomização.....	22
2.4 - Periculosidade dos Pós Metálicos	23

2.4.1 - Explosão e perigo de combustão dos pós	23
2.4.2 - Riscos à saúde.....	25
2.5 – Metalurgia do Pó de Aço Inoxidável	25
2.5.1 - Aços inoxidáveis.....	25
2.5.2 - Classificação	27
2.5.3 - Influência do teor de carbono	29
2.6 - Processamento de Aço Inoxidável pela MP	31
3 – INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS (IPM)	34
3.1 – O Processo de Injeção de Pós Metálicos (IPM)	34
3.1.1 – Reologia	36
3.1.2 - Composição da massa metálica	40
3.1.2.1 - Pós metálicos.....	41
3.1.2.2 - Veículo orgânico (VO)	41
3.1.3 - Projeto da peça	46
3.1.4 – Projeto do molde.....	49
4 – PRINCÍPIO DA INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS (IPM)	52
4.1 – Defeitos Associados à Fase de Injeção dos Produtos.....	56
5 – METODOLOGIA APLICADA	59
5.1 – Formulações	59
5.1.1 – Formulação da massa metálica	59
5.1.2. – Formulação do VO.....	60

5.1.3 – Formulação da parte metálica.....	60
5.2 – Construção de Moldes	60
5.3 – Injeção	62
5.4 - Extração do VO	63
5.5 - Sinterização.....	64
5.6 – Equipamentos Utilizados.....	65
6 – RESULTADOS OBTIDOS	66
7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	73
8 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das peças obtidas através da MP ao longo dos anos. ...	2
Figura 2.1 - Exemplos de peças fabricadas através da MP [www.epma.com].	8
Figura 2.2 – Etapas da Metalurgia do Pó [www.epma.com].	9
Figura 2.3 – Misturador convencional de pós metálicos [www.alleghenypm.com/process.htm].	10
Figura 2.4 – Prensa típica utilizada em MP [www.alleghenypm.com/process.htm].	11
Figura 2.5 – Sinterização seriada de peças processadas na MP [www.alleghenypm.com/process.htm]	11
Figura 2.6 – Tamboreamento de peças sinterizadas [www.epma.com].	12
Figura 2.7 - Esquema para obtenção de um produto por prensagem isostática [FORTULAN (1997)].....	15
Figura 2.8 – Esquema de injeção a alta pressão [MANGELS (1984)].	16
Figura 2.9 – Exemplos de formas de partículas de pó [THUMMLER e OBERACKER (1993)]	18
Figura 2.10 – Exemplos de moagem mecânica de pós metálicos [THUMMLER e OBERACKER (1993)]	19

Figura 2.11 – Exemplos do processo de fabricação de pó metálico [MANGELS (1984), THUMMLER & OBERACKER (1993)].....	22
Figura 2.12 - Fabricação de pó metálico por atomização a gás [MANGELS (1984)].	32
Figura 3.1 – Classificação do comportamento reológico dos materiais [FORTULAN (1993)]	37
Figura 3.2 – Exemplo de peças com parede uniforme [www.epma.com (1998)]	49
Figura 4.1 – Defeitos nos produtos injetados [GERMAN (1990)].....	58
Figura 5.1 – Molde de corpo de prova.....	61
Figura 5.2 –Molde de um cadinho	61
Figura 5.3 – Máquina de injeção à baixa pressão	62
Figura 5.4 – Taxa de aquecimento da sinterização	64
Figura 6.1 – Defeito causado pelo posicionamento do canal de alimentação.	67
Figura 6.2 – Nova posição do canal de alimentação.	67
Figura 6.3 – Defeitos encontrados nas peças injetadas a baixa pressão. ...	68
Figura 6.4 – Peças obtidas através da injeção à baixa pressão de pó de aço inoxidável.....	69
Figura 6.5 – Peça sinterizada em forno de ambiente controlado.	70
Figura 6.6 – Curva Tensão X Deformação, para pó de aço inoxidável 316L injetado à baixa pressão, $V = 5\text{mm/min.}$, onde é observado o limite de escoamento, σ_e (0,2%) e a tensão de fratura.	71

Figura 6.7 – Micrografia da peça sinterizada em forno de ambiente controlado. 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Possíveis formulações de veículos orgânicos (em % de peso) [German et al. (1991)].	45
Tabela 3.2 – Análise térmica dos Veículos Orgânicos [Yang et all (1996)].	46
Tabela 3.3 – Diretrizes para o projeto da peça para a IPM [www.epma.com(1998)].	48
Tabela 4.1 – Relação dos defeitos com a etapa da injeção de pós metálicos [EDIRISINGHE et al. (1989)]	57
Tabela 5.1 – Tempo e temperatura de extração do VO	63
Tabela 6.1 – Propriedades mecânicas dos corpos ensaiados	72
Tabela 6.2 – Resultado do ensaio de tração de amostras sinterizadas a 1350 °C por 1h em 100% H ₂ [CAI & GERMAN (1994)].	72

RESUMO

IKEGAMI, R. A. (2000) Conformação de Pó de Aço Inoxidável Através do Processo de Injeção à Baixa Pressão. São Carlos. 88p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Metalurgia do pó é o uso de metais na forma de pó para a manufatura de produtos. Pós metálicos são combinados (misturados) e compactados em um molde. O material compactado recebe um tratamento térmico ou é sinterizado em um ambiente controlado para a união das partículas para formar um produto denso e resistente. Injeção de pós metálicos tem se destacado mundialmente na produção de componentes de pequenas dimensões e formas complexas em substituição a fundição sob pressão e a sinterização convencional. Atualmente a injeção de pós metálicos está se tornando uma opção competitiva relativamente à peças fundidas, forjadas, usinadas e estampadas. O presente trabalho revisa as técnicas de injeção de pós metálicos e aplica o processo de injeção à baixa pressão utilizando pó de aço inoxidável 316L com granulometria fina ($15\ \mu\text{m}$). Os produtos injetados, uma vez extraídos o VO e sinterizados, foram submetidos à ensaios de tração, dureza e micrográficos. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos. O trabalho, para a sua viabilização, incluiu a reforma de uma injetora de bancada à baixa pressão e a construção de moldes de injeção.

Palavras - Chave: Conformação, pós metálicos, injeção, sinterização, pó de aço inoxidável 316L, moldes, extração de VO.

ABSTRACT

IKEGAMI, R. A. (2000) The Low Pressure Injection Molding of Stainless Steel Metallic Powder. São Carlos. 88p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Powder metallurgy is the use of metals in the powder form for the manufacture of products. Metallic powders are combined (mixed) and compacted in a die. The compacted material receives a thermal treatment or it is sintered in an controlled atmosphere for the particle binding to form a dense and resistant product. Injection of metallic powders has if globally highlighted in the production of components of small dimensions and complex forms in substitution the pressure casting and the conventional sintering. Nowadays the injection of metallic powders is becoming relatively a competitive option than casting, forging, machining and stamping. The present work revises the techniques of injection of metallic powders and it applies the injection process to the low pressure using powder of stainless steel 316L with fine granulation (15 μm). The injected products, once debinded and sintered, were submitted to tensile test, hardness and micrography. The results are presented and discussed. In this work, included the reform of a low pressure injection machine and construction of injection dies.

Key Words: Manufacture, metallic powders, injection, sintering, powder of 316L stainless steel, die, debinding.

1 – INTRODUÇÃO

Todo processo de produção de peças busca o aperfeiçoamento, pois nenhum deles satisfaz todas as necessidades. A Metalurgia do Pó (MP) têm resolvido literalmente milhares de problemas de projeto. Algumas soluções constituem simplificações de outros processos envolvendo um menor custo ou uma menor perda de material [*The Metal Powder Industries Federation* (2000)]. Peças produzidas através da MP são utilizadas em vários produtos tais como automóveis, eletrodomésticos, ferramentas de acionamento elétrico, mecânico ou hidráulico, ceifadeiras e equipamentos agrícolas, máquinas de escritório, aparelhos esportivos, etc. [JENKINS, WOOD (1991)]

O processamento de pó é uma técnica usada para consolidar materiais particulados, sejam eles metais e/ou não-metais, em formas discretas. Materiais compósitos complexos de fases metálicas e não metálicas também podem ser projetados e fabricados por esta técnica em quantidades cada vez maiores [WHITE (1995)]. A partir de 1934 as técnicas de fabricação de peças sinterizadas têm avançado continuamente e acompanhado o desenvolvimento tecnológico da humanidade. Peças estruturais sinterizadas de ferro e aço, mancais porosos, discos de fricção, ímãs permanentes, núcleos para a indústria eletrônica, etc, estão sendo fabricadas em larga escala atualmente [METALPÓ (1990)].

Pressão e calor são utilizados desde a Idade da Pedra na conformação dos materiais, para dar formato aos objetos. Se for considerada a confecção de peças sólidas sem a fusão total do material, a

MP tem sido praticada há muito tempo antes dos artesãos antigos aprenderem a fundir o ferro. Os Egípcios faziam ferramentas de ferro utilizando técnicas de MP à pelo menos 3000 AC; os antigos Incas faziam jóias e artefatos preciosos com pós de metal, conforme ilustra a figura 1a [HIRSCHHORN (1976)]. O primeiro produto moderno obtido pela MP foi certamente o filamento de tungstênio para lâmpadas elétricas desenvolvida em 1900. Em 1930 essa iniciativa foi seguida na fabricação de insertos de corte de carbetto de tungstênio, figura 1b, nos anos 60 e 70 nas peças automobilísticas, figura 1c, nas peças de turbinas de avião nos anos 80 e nas peças de pó forjado nos anos 90.

Figura 1 – Evolução das peças obtidas através da MP ao longo dos anos.

Tudo indica que a MP manterá esta prática no século vinte e um para criar componentes de formas mais complexas à partir de metais granulados.

Embora a técnica fundamental seja simples de ser entendida, a tecnologia propriamente é bastante sofisticada. Dentre as vantagens da MP, ela permite um grande controle sobre várias propriedades do produto final, o uso de tungstênio de alta dureza e outros metais com alto ponto de fusão bem como a produção de objetos metálicos porosos [Sinter Metals Inc. (1997)].

Existe uma grande variedade de métodos de produção de determinadas peças. Entre as alternativas viáveis, incluem-se a usinagem, a estampagem, o forjamento, a fundição de areia e a fundição de precisão. Cada método possui as suas vantagens e desvantagens. Onde a MP se destaca como um método aplicável, ela é efetiva para se produzir peças e componentes complexos. Comparando-se os métodos citados com a MP, é possível destacar várias das suas vantagens e desvantagens, como se seguem.

a) Usinagem

A usinagem é um processo de manufatura de alto custo e baixo volume. Através dela pode-se produzir peças de formatos difíceis de serem obtidos pela MP, como rebaixos, furos atravessados, raios e roscas, mas a sua competitividade fica limitada ao baixo volume de produção. Os cavacos, nesse processo de transformação, podem ser um fator significativo do custo.

b) Estampagem

A estampagem é satisfatória para a conformação simples em grande volume, mas peças complexas requerem extensiva usinagem ou agrupamentos de estampagens. A estampagem é limitada às peças de espessura uniforme. Quebras do molde e rebarbas podem criar condições adversas de bordas e os retalhos constituem um fator de custo às vezes alto.

c) Forjamento

O forjamento produz peças resistentes e de alta densidade mas devido a falta de tolerâncias e limitações do escoamento de material, pode

necessitar de uma substancial usinagem para se chegar à configuração final do produto. As propriedades físicas e químicas são determinados pela matéria prima e os subprodutos (cavacos) podem constituir um fator de elevação de custo.

d) Fundição de areia

A fundição convencional em areia é econômica para taxas de produção de baixa a moderada. Não possibilita um controle dimensional efetivo e usualmente requer usinagem de finalização. Ligas ferrosas e não ferrosas são possíveis de serem fundidas, mas os subprodutos podem ser também um fator de custo considerável.

e) Fundição de Precisão

A fundição de precisão combina a flexibilidade de projeto e a produção de peças próximas do formato final mas não é um processo de alto desempenho e o custo unitário tende a ser elevado. O acabamento final e o controle dimensional são inferiores aos dos da MP.

Verifica-se portanto que a MP constitui-se em uma relevante solução para a conformação de componentes metálicos complexos ou não, quando comparada aos processos de conformação convencionais existentes. Por exemplo, a MP nos Estados Unidos, segundo a WPI [*Worcester Polytechnic Institute (1999)*] apresenta a seguinte situação:

- Em torno de 200 companhias produzem pós metálicos, componentes de MP e equipamentos para a MP.

- As vendas de produtos e componentes atingem valores acima de \$2 bilhões e cerca de \$1 bilhão em exportação de pós metálicos por ano.
- As aplicações automotivas utilizam cerca de 70% de todas as peças produzidas pela MP. Aproximadamente 15kg de peças processadas pela MP são utilizadas por veículo, sendo este valor crescente. Cerca de 1/3 desses componentes são usados em motores, transmissões e sistemas de freios.
- Dos equipamentos utilizados na indústria de MP nos Estados Unidos, existem aproximadamente 2300 prensas de compactação, sendo 85% delas mecânicas e 15% hidráulicas e, em torno de 1000 fornos de sinterização.

A utilização do aço inoxidável para a MP é atrativa por causa da sua resistência à corrosão e resistência mecânica que podem ser melhoradas com o controle da densidade final dos produtos, que é conseguido na fase de sinterização das peças. A Injeção de Pós Metálicos (IPM), que utiliza os princípios da injeção de polímeros, possibilita a fabricação de peças com formas complexas, altas propriedades mecânicas, tolerâncias apertadas e bom acabamento superficial. Aparelhos cirúrgicos e odontológicos podem ser fabricados a baixo custo pela IPM.

Este trabalho visa a possibilidade de utilização da técnica de Injeção à Baixa Pressão de pós metálicos para a conformação de peças. As principais vantagens deste processo estão diretamente relacionadas às vantagens da injetora de baixa pressão em relação às de alta pressão. Segundo GONÇALVES apud PELTSMAN & PELTSMAN (1984), estas vantagens são:

- a) baixo gradiente de pressão da peça moldada;
- b) baixo consumo de energia;

- c) não necessidade de sistemas hidráulicos complexos;
- d) baixa dimensão do equipamento;
- e) baixo custo do equipamento;
- f) baixo desgaste do molde;
- g) não adesão da mistura no molde;
- h) não contaminação da mistura com o desgaste do fuso e/ou pistão;
- i) não separação do polímero do pó metálico.

Para a realização deste trabalho, foi necessário o desenvolvimento de capítulos subsequentes, cujas principais descrições são comentadas.

A **Revisão do estado da arte** atualiza as informações sobre a conformação de peças através da MP.

Através da **Revisão da injeção de pós metálicos (IPM) e do princípio da IPM**, são apresentados os fundamentos do processo de injeção de pós metálicos, construção de moldes, composição da massa metálica, formulação e retirada do veículo orgânico e sinterização.

Com a **Metodologia aplicada** obtém-se e avaliam-se os corpos de prova, comenta-se o processamento da matéria prima, os equipamentos e moldes utilizados, e os ensaios mecânicos envolvidos.

Os **Resultados obtidos** apresentam as dificuldades encontradas nas etapas do processo assim como a interpretação destes resultados.

As **Referências bibliográficas** trazem as bibliografias citadas que foram utilizadas na elaboração e orientação do trabalho.

2 – ESTADO DA ARTE

2.1 – Metalurgia do Pó (MP)

A metalurgia do pó é uma técnica de processamento utilizada para consolidar materiais particulados, sejam eles metais e/ou não metais, em formas discretas. Materiais compósitos complexos de fases metálicas e não metálicas também estão sendo projetados e fabricados por esta técnica em quantidades cada vez maiores [HIRSCHHORN (1991)].

Uma das características principais da MP é a ausência de fusão total do material. Para se promover a ligação metálica entre as partículas, os pós metálicos são configurados em ferramental apropriado com o posterior aquecimento sob condições controladas à temperatura abaixo do ponto de fusão do metal base, onde a ligação das partículas é feita através da difusão metálica [JENKINS, WOOD (1991); WHITE (1995); GONÇALVES (1997)].

Inúmeros são os componentes que podem ser produzidos através da MP. A figura 2.1. ilustra alguns deles. Em a) é mostrada a MP aplicada à indústria relojoeira onde se destacam as carcaças de relógios de pulso, em b) na fabricação de máquinas fotográficas e em c) peças para a indústria automobilística.

a) Corpo do relógio de pulso

b) Componente de máquina fotográfica.

c) Componentes automotivos

Figura 2.1 - Exemplos de peças fabricadas através da MP [www.epma.com].

As três etapas básicas da produção convencional de peças pela metalurgia do pó são: mistura, compactação e sinterização. A figura 2.2 mostra o esquema básico da metalurgia do pó.

Figura 2.2 – Etapas da Metalurgia do Pó [www.epma.com].

Na etapa da mistura, os pós de metais básicos ou metais ligas são misturados com lubrificantes ou outros elementos de liga (Veículo Orgânico), para se obter uma mistura homogênea dos componentes. Essa mistura pode ser feita pelo fabricante dos pós ou pelo fabricantes das peças. Para

isso são utilizados misturadores convencionais como o ilustrado na figura 2.3. Esses misturadores são constituídos basicamente de tubos, onde são colocados os pós e elementos ligantes, que são misturados dentro desses tubos através da rotação do conjunto.

Figura 2.3 – Misturador convencional de pós metálicos
[www.alleghenypm.com/process.htm].

Na segunda etapa, a compactação, uma quantidade controlada da mistura é colocada dentro de um molde e compactada, usualmente à temperatura ambiente. Normalmente, é utilizada uma pressão de compactação da ordem de 460,0 a 760,0 MPa.

A compactação do pó nos moldes produz um "compactado à verde" que, pelas técnicas convencionais de prensagem, possui o formato da peça após ser ejetado do molde e com resistência suficiente para manipulação e transporte para um forno de sinterização. Técnicas de compactação típicas utilizam moldes rígidos fixos em prensas especiais, mecânicas ou hidráulicas, conforme ilustra a figura 2.4.

Figura 2.4 – Prensa típica utilizada em MP [www.alleghenypm.com/process.htm].

Na terceira etapa, ou seja, a sinterização, o compactado à verde é colocado dentro de um forno com atmosfera controlada. No forno, as peças são aquecidas abaixo do ponto de fusão do metal base, para depois serem mantidas na temperatura de sinterização e posteriormente resfriadas. A figura 2.5 ilustra a sinterização seriada de peças colocadas em uma esteira que move lentamente dentro do forno.

Figura 2.5 – Sinterização seriada de peças processadas na MP
[www.alleghenypm.com/process.htm]

Basicamente, na etapa de consolidação, a sinterização transforma a união mecânica do pó compactado em união metalúrgica das partículas, produzindo as primeiras propriedades funcionais das peças.

Geralmente as peças obtidos por MP estão prontas para uso após a sinterização. Entretanto, para adquirir propriedades especiais, as peças podem ser reprensadas, impregnadas, usinadas, tamboreadas, galvanizadas ou sofrerem tratamento térmico. A figura 2.6 ilustra uma dessas operações secundárias.

Figura 2.6 – Tamboreamento de peças sinterizadas [www.epma.com].

2.2 - Importância da Metalurgia do Pó

Para a *Metal Powder Industry Federation* (2000), a MP possui características relevantes que a destaca como um processo de conformação metalúrgica adequado para inúmeras aplicações. Dentre essas características destacam-se as seguintes.

- A MP constitui-se de um método efetivo de conformação de componentes metálicos de precisão que pode produzir componentes e produtos industriais de um modo geral mais eficientes.
- A MP pode utilizar materiais de alto desempenho, superligas, aços ferramentas, ligas de pó de alumínio forjado, metal endurecido por dispersão, materiais endurecidos pela taxa de solidificação rápida (RSR) e compósitos de metais matrizes.
- Mantém uma posição de destaque como um atual processo de manufatura para o melhoramento da qualidade do produto e da produtividade.
- Através da MP é possível recuperar a matéria prima através da reciclagem e eliminação de custosas usinagens secundárias.
- Caracteriza-se também como um agente do aumento da produtividade industrial pela eliminação de etapas de usinagem e pela possibilidade de automação.
- Constitui-se na exclusiva alternativa para a conformação de metais especiais tais como o carbeto de tungstênio, materiais endurecidos por dispersão, materiais porosos e mancais auto lubrificantes.
- A MP possibilita a recuperação de recursos naturais através da reciclagem e conservação de matérias primas críticas.
- Consolida a possibilidade de um projeto mais eficiente de peças complexas para componentes de alto desempenho destinados a motores e transmissões de automóveis, motores de turbina de avião, máquinas copiadoras, máquinas elétricas e equipamentos de furadeira hidráulica ou pneumática.

Dentre os processos de conformação relacionados com a MP destacam-se a prensagem e a injeção. O processo de prensagem pode ser feita em prensas uniaxiais ou isostáticas e a injeção, em injetoras de alta ou baixa pressão.

A prensagem uniaxial é considerada como sendo a técnica convencional da MP. A pressão aplicada pode variar de baixa a alta de acordo com a regulagem da máquina e a prensagem ocorre somente na direção axial (vertical). O pó é alimentado para dentro de um molde rígido e a compactação é feita através de um par de punções. Normalmente é o punção superior que penetra no molde, obtendo-se assim a peça à verde [HIRSCHHORN (1976)].

O processo de prensagem isostática, esquematizada na figura 2.7, tradicionalmente conhecido pela fabricação de velas de ignição automotiva, quando em cerâmica, destaca-se pela uniformidade e elevada qualidade dos produtos obtidos. Em princípio, trata-se de um molde flexível (elastomérico) cuja cavidade é preenchida com pós e posteriormente selada (estanque). Colocado dentro de um vaso, o molde é prensado isostaticamente através de um fluido pressurizado. O fluido, quando pressurizado, comprime o molde em todas as direções gerando o compactado a verde [FORTULAN (1997)].

Figura 2.7 - Esquema para obtenção de um produto por prensagem isostática [FORTULAN (1997)]

O processo de injeção, por sua vez, apresenta como característica principal a capacidade de se obter o produto muito próximo da forma final, aliada à capacidade de moldagem de formas extremamente complexas com grande acuracidade dimensional [MANGELS (1984), INOUE et al. (1989)].

Esse processo foi desenvolvido no final do século passado para aplicações envolvendo celulóide e posteriormente passou a ter grande expressão na indústria de plásticos [MUTSUDDY (1987)], a figura 2.8 mostra um esquema desse processo.

Figura 2.8 – Esquema de injeção a alta pressão [MANGELS (1984)].

Dentro do contexto do processo de injeção destaca-se a injeção de pós metálicos (IPM) que se constitui da junção de duas técnicas de manufatura, ou sejam, a moldagem de injeção de termoplásticos e metalurgia do pó convencional. A IPM é hoje uma atraente técnica de conformação de componentes ou peças pequenas com parede fina e geometria complexa. As etapas básicas dessa técnica são: mistura de um pó com um veículo orgânico (VO) para formar uma massa com viscosidade satisfatória, injeção dessa massa através de máquinas de injeção como as utilizadas nas indústrias de plástico; extração do veículo orgânico, normalmente através da degradação térmica; e, finalmente, a sinterização do pó compactado para lhe conferir uma densidade alta. Nesse processo, a extração do veículo orgânico constitui o passo mais crítico; porque é um processo muito lento e necessita de um controle cuidadoso para se manter a integridade da peça.

2.3 - Fabricação de Pós Metálicos

O conhecimento das propriedades dos materiais é fundamental para a engenharia, essencial para o projeto, operação dos equipamentos e processos de fabricação. Para a avaliação dessas propriedades podemos observar o módulo de Young, tensão de tração e compressão dos materiais de construção, a densidade e viscosidade dos fluídos Newtonianos e suas variações com a temperatura e pressão, condutividade, difusibilidade, etc. Os pós metálicos são materiais de difícil definição pois,

Eles não são sólidos, entretanto podem resistir a alguma deformação.

Eles não são líquidos, entretanto podem ser fluidificados.

Eles não são gases, entretanto podem ser comprimidos.

Estas características dos pós metálico é devido a ocupação dos espaços entre as partículas por um fluído e então podemos relacionar a interação sólido/fluído, área de contato interpartículas e adesão (coesão) entre as partículas. Eles são extremamente influenciados pelo tamanho e forma das partículas, que não são facilmente definidos, e pela adsorção do fluído na superfície, o qual é influenciado pela propriedade da superfície da partícula e do fluído que o envolve [RHODES et al. (1995)].

Segundo GERMAN (1990), uma partícula é definida como a menor unidade de um pó que não pode ser subdividida por simples métodos mecânicos. Os pós utilizados na IPM possuem densidade de empacotamento fracional entre 30,0% a 80,0% da teórica, com um nível típico perto dos 60,0%. Uma ampla distribuição de tamanho de partículas auxilia o empacotamento porque uma mistura de tamanhos diferentes de partículas permite um melhor ajuste entre elas.

O formato da partícula é importante, influencia na densidade de empacotamento, fluidez, atrito interpartícula e viscosidade da massa metálica. De acordo com padrões internacionais, termos como *nodular*, *dendritico*, *acicular*, *fibrosa*, *floco*, *esferoidal*, *angular*, *irregular* e *granular* são utilizados para uma simples caracterização da forma das partículas [THUMMLER e OBERACKER (1993)]. A figura 2.9 mostra alguns exemplos típicos de forma de partícula.

O processo de fabricação do pó metálico influencia a forma, tamanho, microestrutura, química e custo do pó [GONÇALVES e PURQUERIO (1996)]. As principais técnicas de fabricação de pós para IPM são a fabricação mecânica, química e a atomização.

Figura 2.9 – Exemplos de formas de partículas de pó [THUMMLER e OBERACKER (1993)]

2.3.1 - Fabricação mecânica de pós metálicos

A geração de um pó à partir de um minério é obtida através da moagem, que pode ser uma combinação de mecanismos tais como impacto, cisalhamento e compressão. Os pós gerados através deste processo possuem formas irregulares ou angulares, de difícil controle de tamanho e com grandes chances de contaminação do pó [GONÇALVES (1997)]. A figura 2.10 ilustra alguns desse processos.

Figura 2.10 – Exemplos de moagem mecânica de pós metálicos [THUMMLER e OBERACKER (1993)]

A redução do tamanho do estado sólido dos materiais é baseado na fratura mecânica da seguinte forma: primeiro ocorre a nucleação da trinca, para em seguida ocorrer a propagação da trinca e a fratura, onde as novas superfícies são formadas. Uma diminuição do tamanho da partícula acontece quando ocorre este processo. A energia cinética dentro do agregado, na moagem, é parcialmente transformada em tensões mecânicas no material a ser desintegrado. As forças de ação neste processo causam

principalmente a compressão e a tensão de cisalhamento, aplicadas pelo impacto e/ou pequenas tensões proporcionados pelos elementos (esferas) de moagem durante a rotação ou vibração do moinho [THUMMLER e OBERACKER (1993)].

Apesar de possibilitar a obtenção de pós finos, a moagem não se adequa às necessidades da IPM, principalmente pelo fato de que os pós moídos são geralmente irregulares e possuem alto nível de contaminações superficiais.

2.3.2 - Fabricação química

Quase todos os materiais podem ser fabricados na forma de pós através do mecanismo de precipitação ou de uma reação química. O tamanho e a forma da partícula assim obtida, pode ser ajustada numa extensa faixa. Para a IPM, é desejável a utilização de um tamanho de partícula pequeno. Há muitas variações no processo de síntese química, incluindo reações com fases sólida, líquida e vapor [HIRSCHHORN (1991)].

O principal processo químico na metalurgia do pó envolve a redução dos metais na forma de compostos como os óxidos, carbonetos ou nitretos e geralmente se encontram no estado sólido. Quando a reação é feita no estado sólido ou por reação gás-sólido, nenhuma purificação posterior é possível. Através da reação cinética, o composto a ser reduzido, precisa ter um tamanho de partícula razoavelmente pequena, caso contrário, o tempo de reação para a redução das partículas pode ser excessivamente grande, o que na prática se torna inviável [THUMMLER and OBERACKER (1993)].

Uma forma clássica de fabricação de pó metálico é através da redução. Esta redução é alcançada através de reações termomecânicas envolvendo gases redutores tais como o monóxido de carbono ou o hidrogênio.

A propriedade e a reprodutibilidade do pó obtido pelo processo químico, depende inteiramente das condições do processo de redução do material. Algumas regras gerais são sugeridas por JENKINS e WOOD (1993), como seguem.

- Uma temperatura alta e um longo tempo de redução promove um tamanho grande de partícula, pequena superfície específica, baixa concentração de oxigênio residual e (possivelmente) a formação de um "aglomerado sinterizado".
- Uma temperatura baixa e curto tempo de redução promove partículas pequenas, grande superfície específica, alta concentração de oxigênio residual e possivelmente a formação de pó pirofórico.
- Alta taxa de escoamento de hidrogênio com um baixo ponto de orvalho resulta numa alta taxa de redução, baixa concentração de oxigênio residual e, nenhuma ou muito pouca, re-oxidação durante o período de resfriamento.
- Baixa taxa de escoamento de hidrogênio com um alto ponto de orvalho pode produzir resultados opostos e então são geralmente impraticáveis.

Pós produzidos pelos métodos químicos, precipitação e decomposição, vem sendo extensivamente utilizados na produção de pós para IPM. Um exemplo disto são os pós extremamente finos, puros e arredondados obtidos pelo processo carbonila [JAPKA (1991); JAPKA & GERMAN (1992)].

2.3.3 - Atomização

A atomização envolve a formação de pós a partir do material no estado líquido, através da pulverização. Embora seja tipicamente aplicada para pós metálicos, a atomização também está sendo desenvolvida para os pós cerâmicos, através da utilização de técnicas de fundição por plasma. Neste processo, o material fundido é injetado num bocal de expansão de gases para formar as gotas que se solidificam antes do impacto com a parede da câmara. Os fluídos que podem ser usados para quebrar o fluxo fundido incluem o ar, a água e o óleo [GONÇALVES (1997)]. A figura 2.11 mostra alguns exemplos de fabricação por atomização.

Figura 2.11 – Exemplos do processo de fabricação de pó metálico [MANGELS (1984), THUMMLER & OBERACKER (1993)]

A atomização é o principal processo de produção de pós metálicos. O processo geralmente consiste de três etapas:

- Fusão;
- Atomização (desintegração do líquido em gotículas);
- Solidificação e resfriamento.

Em muitos casos, processos adicionais tornam-se necessários após o pó obter as propriedades desejadas, como por exemplo, redução das superfícies oxidadas, degaseificação, classificação do tamanho de partículas, etc [THUMMLER & OBERACKER (1993)].

2.4 - Periculosidade dos Pós Metálicos

A manipulação de pós metálicos requer cuidados especiais, pois ela apresenta riscos que podem ser evitados através do manuseio, transporte e armazenamento adequado. Os dois principais riscos que devem ser considerados são a possibilidade de explosão e combustão, e os riscos à saúde.

2.4.1 - Explosão e perigo de combustão dos pós

Muitos materiais sólidos são combustíveis, isto é, eles podem entrar em combustão se algum tipo de ignição é aplicada. A facilidade com que a ignição ocorre, ou o tamanho da fonte requerida para iniciar a queima, depende da natureza e dimensão dos sólidos. Geralmente, os sólidos são

acesos e queimados prontamente com a diminuição do tamanho, e quando reduzidos a pó, as condições são bem mais favoráveis. Duas razões para isso são que o ar ganha acesso para a abertura da massa se o material está na forma de pó e o calor não é conduzido da superfície de queima para o interior da massa quando esta consiste de pequenas partículas. Deste modo, pós são capazes de queimar prontamente se eles forem combustíveis.

Um arranjo favorável para a rápida queima do pó é quando as partículas estão separadas uma das outras a uma relativa distância, para que o ar possa ter um acesso rápido entre elas, como acontece quando as partículas estão dispersas no ar como uma nuvem. Sobre tais condições de ignição, pode ocorrer o fenômeno conhecido como explosão do pó que, se estiver fora de controle, pode ser acompanhado de uma geração de pressão e formação de chamas, podendo causar danos materiais e pessoais [PALMER(1990)].

Na explosão dos pós, as chamas atingem uma grande velocidade, que podem atingir de alguns m/s a centenas de m/s e este tipo de explosão é chamada de deflagração. Existe um outro tipo de combustão, chamada de detonação, onde a velocidade da chama é supersônica e a chama é acompanhada por ondas de choque.

Deve-se evitar a manipulação dos pós em locais fechados ou se necessário fazê-lo em locais onde haja sistema de exaustão, não acender fósforos, isqueiros ou similares durante a manipulação. O transporte deve ser feito com cuidado para se evitar quedas acidentais que podem quebrar as embalagens e com isso criar uma nuvem de pó explosiva. A armazenagem dos pós deve ser feita em locais arejados e iluminados, para que em caso de haver uma nuvem de pó, o interruptor de luz não aja como ignição para uma eventual combustão ou explosão da nuvem de pó.

2.4.2 - Riscos à saúde

A propriedade do pó fino que representa o maior risco à saúde é a sua capacidade de poder ser transportado pelo vento e ser inalado, embora alguns tipos de pós possam ser nocivo pelo simples contato com a pele. Isto ocorre com menos frequência e é de fácil diagnóstico e por isso esse problema é mais controlável.

Quando partículas de pó são inalados, o risco relativo à saúde, depende muito de onde exatamente as partículas se alojam no nosso aparelho respiratório. Por muitas décadas, se não centenas, isto vem se tornando de conhecimento geral que nuvens de pó “fino” são mais favoráveis à riscos à saúde do que o pó “grosso”. Estas nuvens de pó podem causar a pneumoniose, a doença dos mineradores [KING (1995)].

A manipulação dos pós deve ser feito com o uso de máscaras e luvas que podem evitar os riscos à saúde do manipulador.

2.5 – Metalurgia do Pó de Aço Inoxidável

2.5.1 - Aços inoxidáveis

O descobrimento dos aços inoxidáveis é atribuído ao inglês Harry Brearly, em 1912. Ao experimentar uma liga ferro-cromo com aproximadamente 13% de cromo, fez algumas observações metalográficas e constatou que a liga não sofria reação à maior parte dos reagentes frequentemente usados em metalografia; a essa liga ele denominou

Stainless Steel, ou seja, “aço sem manchas”. Brealy, na verdade, quis dizer que esse aço não era atacado ou “manchado” quando submetido aos ataques metalográficos da época.

No mesmo ano, na Alemanha, Eduard Maurer (1912) afirmava que uma liga de ferro-cromo elaborada por Brenno Strauss resistiu por vários meses aos vapores agressivos do laboratório em que trabalhavam.

Os aços inoxidáveis descobertos por Brealy e Strauss são, basicamente, os tipos conhecidos hoje como ABNT 420 e ABNT 302. Na mesma época, foram feitos tratamentos térmicos a altas temperaturas para conseguir boa ductilidade (no tipo ABNT 302) e alta dureza (no tipo ABNT 420); no primeiro caso o tratamento foi dado por Maurer.

Na Alemanha, já em 1914, uma liga à base de ferro e contendo 20,0% de cromo, 7,0% de níquel e 0,25% de carbono foi utilizada numa fábrica de anilina e soda; imediatamente os aços inoxidáveis irromperam nas fábricas de amônia sintética do país.

As ligas ferro-cromo (17,0% cromo) e ferro-cromo-níquel (18,0% cromo e 8,0% níquel) foram amplamente usadas nos anos de 1920/1930 nos Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha, em fábricas de amônia e ácido nítrico.

Os aços inoxidáveis caracterizam-se por uma resistência à corrosão superior a outros aços. Sua denominação não é totalmente correta, porque na realidade os próprios aços ditos inoxidáveis são passíveis de oxidação em determinadas circunstâncias. A expressão, contudo, é mantida por tradição. Quanto à composição química, os aços inoxidáveis caracterizam-se por um teor mínimo de cromo da ordem de 11,0%.

A resistência à corrosão destes aços é explicada por várias teorias. Uma das mais bem aceitas é a teoria da camada protetora, aderente e impermeável, constituída de óxidos, que envolve toda a superfície metálica e impede o acesso de agentes agressivos no material. Outra teoria, surgida

posteriormente, julga que a camada seja formada por oxigênio adsorvido. O assunto é controverso e continua sendo objeto de estudos e pesquisas. Entretanto, o que parece estar fora de dúvida é que, para apresentarem suas características de resistência à corrosão, os aços inoxidáveis devem manter-se permanentemente em presença de oxigênio ou de uma substância oxidante.

Como é sabido, os aços inoxidáveis são ligas de ferro-cromo com um mínimo de 11% de cromo e a adição de outros elementos de liga permite formar um amplo conjunto de materiais, conhecidos como a família dos aços inoxidáveis. Entre os elementos de liga, dois se destacam: o cromo, elemento presente em todos os aços inoxidáveis por seu papel na resistência à corrosão e o níquel, pela melhoria das propriedades mecânicas.

2.5.2 - Classificação

As principais composições de aços inoxidáveis foram desenvolvidas, acidentalmente, há cerca de 70 anos. A partir destas composições, foram estudados os efeitos de diversos elementos de liga e residuais, como C, N, Mo, etc. Novas composições vêm sendo desenvolvidas desde então, aproveitando os resultados obtidos nestas pesquisas. Os efeitos dos diversos elementos de liga na estrutura dos aços inoxidáveis podem ser apreciados a partir dos diagramas de equilíbrio de fases. Para fins de classificação e discussão de propriedades, os aços inoxidáveis são agrupados em três classes:

1. **MARTENSÍTICOS** – São ligas de Fe+Cr com composições que interceptam o campo austenítico no diagrama de fases sendo portanto endurecíveis por tratamento térmico de têmpera. Incluem-se nesta família os aços : (AISI) 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501.
2. **FERRÍTICOS** – São ligas de Fe+Cr essencialmente ferríticas, e que não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Os principais tipos são: (AISI) 405, 430, 430F, 446, 502.
3. **AUSTENÍTICOS** – São ligas Fe+Cr+Ni que não endurecem por tratamento térmico de têmpera, e sendo predominantemente austenítica após tratamento térmico comercial. Incluem-se nesta família: (AISI) 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347. Outros aços inoxidáveis austeníticos incluem aqueles em que, por questão de custo, parte do níquel é substituído por manganês ou nitrogênio (elementos estabilizadores de austenita). Exemplos: (AISI) 201 e 202 [SILVA & MEI (1988)].
4. **ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO** – Nestes tipos de aço, a grande resistência mecânica é obtida pela precipitação dos carbonetos, nitretos e compostos intermetálicos. Esses materiais, que são empregados para peças pequenas e altamente tensionadas, podem ter várias estruturas metalúrgicas; os martensíticos são temperáveis, aumentando-se ainda mais a sua resistência. Em geral, a resistência à corrosão desses aços é inferior à dos austeníticos convencionais; o aço tipo “17-4-PH” é equivalente ao tipo 304 quanto a esse aspecto. Os aços endurecidos por precipitação estão sujeitos à fragilização pelo hidrogênio em temperaturas elevadas. Exemplos:

(designação comercial) 17-4-PM, PH-13-8-Mo, 17-4-PH, Custom 450 e Custom 455 [TELLES (1994)].

A estrutura metalográfica dos aços inoxidáveis é determinada basicamente por sua composição química, sobretudo pelos teores de carbono, cromo, níquel, manganês, molibdênio, etc., bem como pelos tratamentos térmicos e mecânicos realizados.

2.5.3 - Influência do teor de carbono

O teor de carbono, na composição, influencia as características dos aços inoxidáveis em diferentes sentidos. A partir de um certo teor, o carbono torna temperável determinados aços, que por esse motivo são classificados como martensíticos; com teores mais baixos de carbono, o mesmo aço não é temperável, enquadrando-se portanto entre os aços ferríticos. Esse é o caso típico dos aço-cromo com 13,0% a 18,0% Cr.

Quanto às características de resistência à corrosão, o carbono apresenta uma influência desfavorável nos aços austeníticos. Os de teor de carbono mais elevado são normalmente mais propensos a sofrer corrosão intercristalina do que os de teor mais baixo.

A ampla utilização de aço inoxidável deve-se principalmente à sua alta resistência à corrosão. Neste contexto, aplicam-se técnicas de metalurgia do pó ao aço inoxidável em dois casos: filtros, onde a única técnica possível é a metalurgia do pó; e componentes estruturais onde esta técnica é competitiva economicamente. Neste último caso, a metalurgia do pó permite a fabricação de formas complexas com dimensões relativamente pequenas, com pequena ou nenhuma perda de material e consequente diminuição do custo e aumento da produtividade, quando comparada às técnicas convencionais de fabricação. As aplicações dos aços inoxidáveis

sinterizados são semelhantes à dos aços inoxidáveis produzidos convencionalmente, com menores custos do que estes, a não ser no caso de filtros.

A técnica de metalurgia do pó deixa sempre uma porosidade residual no material, o que lhe traz algumas características específicas. Uma delas é sua resistência a corrosão, que normalmente é considerada menor do que componentes trabalhados. A sua resistência a corrosão pode ser melhorada por trabalho mecânico posterior para diminuição da porosidade ou pela alteração de sua composição química. Da mesma forma que para materiais trabalhados, estudos a respeito de corrosão de aços inoxidáveis sinterizados tem sido realizados [REINSHAGEN & MASON (1992); SHARON et al. (1992); KLAR et al. (1992)]. Dentre as características importantes em materiais estruturais de aço inoxidável influenciadas pela porosidade, encontram-se as suas propriedades mecânicas, o que também tem sido objeto de intensos estudos [CHIAVERINI & JESZENSKY (1992), Metals Handbook (1984), SHARON & ITZHAK (1992)].

Além da porosidade residual, o processamento por metalurgia do pó pode trazer outros efeitos sobre as propriedades do aço inoxidável, que devem ser ainda investigados [AMBS & STOSUY (1977)]. Procura-se por esta técnica produzir aços inoxidáveis com características semelhantes aquelas de técnicas de processamento convencionais.

As composições dos aços inoxidáveis sinterizados são as mesmas dos aços trabalhados, ou sejam austeníticos da série 300 (303L, 304L, 304LSC, 316L, 316LSC, 316B) e ferríticos ou martensíticos da série 400 (410L-martensítico, 430L e 434L-ferríticos). Aços inoxidáveis bifásicos também podem ser obtidos por mudanças na composição química.

A utilização do aço inoxidável na IPM é atrativo devido a possibilidade de obtenção de peças com formas complexas, precisas e com baixo defeito estrutural. Consequentemente, componentes de aços

inoxidáveis, tais como ferramentas cirúrgicas, podem ser fabricado com um baixo custo, mantendo altas propriedades mecânicas, tolerâncias fechadas e melhor acabamento superficial através da IPM.

Dois tipos de aços inoxidáveis destacam-se como candidatos para o uso na IPM, a saber: o 316L e o 17-4 PH. A estrutura básica do 316L é de uma liga austenítica (estrutura cristalina cúbica de face centrada) e representa um compromisso entre dureza e resistência a corrosão. A do 17-4HL é de uma liga martensítica (estrutura cristalina cúbica de corpo centrado), onde a sua aplicação é difundida quando a dureza é requisitada [GERMAN (1997)].

2.6 - Processamento de Aço Inoxidável pela MP

A fabricação de pós metálicos por atomização é a técnica mais utilizada na preparação de pós metálicos. Neste processo o metal fundido é vazado através de um orifício cerâmico, formando um filete contínuo, que é dividido em pequenas gotas pela incidência de um segundo fluido (gás ou água), em alta velocidade. O fluido retira o calor do metal fundido rapidamente, provocando alta velocidade de resfriamento na solidificação destas gotas.

A alta velocidade de resfriamento provoca alterações microestruturais, que podem ser exploradas para obtenção de materiais com propriedades melhoradas. Desta forma, o pó preparado por atomização pode ser utilizado na fabricação de peças produzidas tradicionalmente por metalurgia do pó, ou então, para o desenvolvimento de novos materiais.

Na atomização, podem ser utilizados como fluido a água ou o gás, sendo que o gás inerte reduz significativamente os níveis de oxidação. Além

do fluido de atomização utilizado, outros parâmetros influenciam as características do pó metálico: propriedades do metal líquido (composição química, tensão superficial, viscosidade e superaquecimento), condições do fluxo do metal líquido (velocidade, diâmetro e comprimento do filete), parâmetros do fluido de atomização (pressão, velocidade, viscosidade e densidade) e geometria do bocal de atomização (ângulo de incidência, posição e número de jatos). A figura 2.12 ilustra o processo de atomização a gás.

Figura 2.12 - Fabricação de pó metálico por atomização a gás [MANGELS (1984)].

O fluído utilizado na atomização, a composição química do metal, a velocidade de escoamento do metal fundido, influenciam as características do pó obtido, a velocidade de resfriamento e a microestrutura do pó [METALS HANDBOOK (1984), KLAR (1985)].

A atomização à gás inerte é preferida quando o pó deve ser utilizado para moldagem por injeção, pois são mais arredondados e normalmente mais finos do que os atomizados à água. No entanto, estuda-

se atualmente a utilização de pós atomizados à água, por ter o custo de produção mais baixo em relação aos pós obtidos pela atomização à gás. [CAI & GERMAN (1994)].

Dois tipos de pós de aço inoxidável estão disponíveis no mercado, ambos obtidos através da atomização do metal fundido. Pós atomizados a gás, usam gases a alta pressão que produzem partículas esféricas que possuem densidade de empacotamento perto de 66,0% e aproximadamente 34,0% de porosidade entre as partículas. O outro tipo de pó disponível no mercado é formado através de água a alta pressão, que desintegra o aço inoxidável fundido e tendem a possuir uma menor densidade de empacotamento. O pó atomizado a água possui uma significativa vantagem econômica sobre o atomizado a gás, mas por possuir uma densidade de empacotamento menor, torna a sua aplicação em injeção mais difícil também. Por causa da diferença de preço, é mais interessante o desenvolvimento do processo de IPM para a utilização do pó atomizado a água. GERMAN (1997) demonstrou que esse tipo de pó pode ser adaptada a IPM via pequena modificação da forma da partícula, através do aumento da propriedade de carregamento dos sólidos do Veículo Orgânico (VO) e da diminuição da viscosidade da mistura.

3 – INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS (IPM)

3.1 – O Processo de Injeção de Pós Metálicos (IPM)

De uma maneira geral, a Injeção de Pós Metálicos (IPM) pode ser definida como uma técnica de conformação de pós que objetiva proporcionar aos materiais metálicos, cerâmicos ou compósitos, a mesma versatilidade, no que se refere a conformação, observada nos materiais termoplásticos produzidos por injeção. O principal aspecto é possibilitar a conformação de peças com formatos complexos valendo-se da alta produtividade inerente aos processos de injeção.

A IPM é relativamente uma nova tecnologia de manufatura que vem atingindo uma considerável maturação e crescimento nos últimos 5 anos.

As fases do processamento por IPM envolve: primeiramente a mistura do pó com o VO polimérico, seguida da injeção da mistura, utilizando-se os mesmos equipamentos utilizados pela indústria de transformação de plásticos e da retirada do VO, que pode ser térmica e/ou química, sendo finalizada pela sinterização [GERMAN (1990)].

O aspecto chave do processo de IPM está na escolha adequada do pó metálico para a sinterização. Veículos Orgânicos poliméricos são utilizados para dar formato a esses pós metálicos, mantendo-os no lugar até a união destes no forno de sinterização. A IPM possui cinco características chaves – baixo custo de produção, formas complexas dos produtos,

tolerância apertada, aplicabilidade para vários materiais e alta propriedade final. Muitas aplicações se referem a combinação desses atributos, tais como peças do aparelho ortodôntico, filtros porosos para tratamento de água quente e suja, imã para controle de *disk drives* de computadores, pequenas engrenagens para aparelhos elétricos manuais, escovas dentais elétricas, cravos de calçados esportivos, aparelhos cirúrgicos, conectores eletrônicos, componentes de armas de fogo, componentes de óculos, relógio de pulso, equipamentos de golf e filtros de microondas para alta frequência microeletrônica [GERMAN (1997)].

Um aspecto importante da IPM está relacionado à precisão dimensional, já que na sinterização das peças injetadas observa-se uma contração linear da ordem de 15,0%. Apesar desta elevada contração é possível, no entanto, manter-se o controle dimensional dentro de padrões aceitáveis [METALS HANDBOOK; GERMAN (1990)], girando em torno de 0,3% para peças de pequeno porte.

Um dos grandes problemas da IPM é a necessidade de utilizar-se pós com características muito específicas, relacionados aos pós metálicos, que devem ser finos ($<20,0\mu\text{m}$) e arredondados, diferenciando-se bastante dos pós utilizados na MP convencional.

O pó de aço inoxidável, obtido através da atomização à gás, é adequado para a IPM devido ao seu formato esférico, alta densidade de empacotamento, alta taxa de escoamento e fluidez, quando na mistura. O alto custo de produção e o seu baixo atrito interpartículas (que afeta na retenção do formato da peça) são duas das suas desvantagens, em compensação, o baixo atrito interpartícula facilita a injeção dos pós. Em contraste, os pós fabricado através da atomização à água, apresentam custo de produção mais baixo e o formato não esférico das suas partículas, possibilita um atrito maior entre elas, resultando numa retenção maior nos componentes. Porém, a densidade de empacotamento é baixa e a moldagem é difícil devido a alta viscosidade da massa metálica [GERMAN (1994)].

Existe uma grande variedade de Veículos Orgânicos utilizados na IPM. A escolha do VO adequado deve levar em consideração as características do pó, as propriedades reológicas da mistura, e principalmente o método que será empregado na sua extração do componente injetado. A retirada do VO é a etapa mais crítica do processo de injeção. Geralmente utiliza-se dissolução química associada à degradação térmica. É, também, a etapa que consome mais tempo.

O ciclo de sinterização, taxa de aquecimento e temperatura final, são semelhantes aos empregados na MP convencional, porém é nesta etapa que são eliminados os resíduos da fase de extração do VO. A temperatura utilizada na sinterização, dos componentes injetados, deve ser um pouco mais alta visando uma maior densificação. Valores de densidade da ordem de 98,0% da densidade teórica são obtidos frequentemente.

A utilização da IPM de aço inoxidável, é atrativa devido a possibilidade da fabricação de peças com formas complexas, devido a própria característica do material e pela combinação da densidade final do material. Uma alta densidade final é importante porque algumas propriedades se elevam com a densidade, incluindo a resistência à corrosão e dureza [GERMAN^a (1997)].

3.1.1 – Reologia

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos materiais. Na IPM, é de fundamental importância que se conheçam as características reológicas da massa metálica a ser injetada para que a conformação possa ocorrer de forma satisfatória sem a ocorrência de

defeitos [WREGE (1994)]. O comportamento reológico dos materiais pode ser classificado de acordo com a figura 3.1.

Figura 3.1 – Classificação do comportamento reológico dos materiais [FORTULAN (1993)]

O processo de injeção de massas metálicas se assemelha em muito ao processo de injeção de termoplásticos, uma vez que utiliza normalmente, como um dos principais componentes do VO, polímeros termoplásticos [GONÇALVES (1997)].

De maneira geral, o comportamento reológico dos polímeros pode ser definido da maneira que se segue [FORTULAN (1993)].

a) Sólido elástico Hookeano

Este material obedece a lei de Hooke, sendo que a tensão é linearmente proporcional a deformação. Matematicamente este comportamento pode ser expresso conforme as equações 01 e 02,

$$\text{para tração} \quad s = E \cdot \varepsilon \quad (01)$$

$$\text{para cisalhamento} \quad \tau = G \cdot \gamma \quad (02)$$

onde, s é a tensão aplicada, E = módulo de elasticidade, ε = deformação sofrida em tração, τ = tensão de cisalhamento, γ = deformação em cisalhamento e G = módulo de cisalhamento.

b) Fluido ideal newtoniano.

Neste caso os fluidos obedecem a lei de Newton (equação 03), sendo τ linearmente proporcional à γ , e conseqüentemente η igual a uma constante. Por esse motivo estes fluidos são usualmente chamados de newtonianos.

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (03)$$

Na equação 03, η = coeficiente de viscosidade ou simplesmente viscosidade.

c) Flúidos não Newtonianos.

c1 – flúidos independentes do tempo.

Os flúidos independentes do tempo apresentam a taxa de cisalhamento num dado ponto como uma função exclusiva da tensão de cisalhamento naquele ponto somente. Estes flúidos são matematicamente definidos pela equação 04,

$$\dot{\gamma} = F(\tau) \quad (04)$$

onde, $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento e τ = tensão de cisalhamento.

Um dos modelos reológicos mais comuns para a representação quantitativa do escoamento não newtoniano puramente viscoso é dado pela equação da lei das potências. Esta lei é representada pela equação 05.

$$\tau = \eta_a \cdot \dot{\gamma}^n \quad (05)$$

onde, η_a = viscosidade aparente.

c2 - Flúidos dependentes do tempo

Para esta classe de flúidos a viscosidade não é função apenas da relação entre τ e $\dot{\gamma}$, mas também do tempo em que o mesmo é submetido ao cisalhamento. Dois tipos essenciais desta categoria são considerados.

- i) Fluídos tixotrópicos – neste caso, quando um fluído é submetido a uma taxa de cisalhamento constante, a viscosidade aparente diminui com o tempo.
- ii) Fluídos reopéxicos – já neste caso, quando o fluído é submetido a uma taxa de cisalhamento constante, a viscosidade aparente aumenta com o tempo de deformação.

c3 - Fluídos elasto-viscosos

Tratam-se de sistemas que exibem propriedades intermediárias de sólidos elásticos e fluídos viscosos. O termo elastoviscoso é empregado para sistemas fluídicos que são essencialmente viscosos, e o termo viscoelástico é empregado para exibir a elasticidade.

3.1.2 - Composição da massa metálica

A massa metálica é composta de pós metálicos e VO. O VO não participa do produto final, porém desempenha papel importante em várias etapas do processo. Sua função é homogeneizar o empacotamento do pó na forma desejada e envolver as partículas homogeneamente na geometria desejada até a sinterização [WREGE (1994)]. As características dos pós e do VO tem fundamental importância nas etapas que se seguem.

3.1.2.1 - Pós metálicos

Segundo German^b (1997), a caracterização do pó metálico é a primeira etapa para o sucesso do processo de IPM. Os parâmetros críticos a serem identificados incluem: tamanho e distribuição das partículas, formato das partículas e sua variação com o tamanho, área superficial, atrito interparticular, microestrutura da partícula e gradiente químico, camada superficial e adesão entre as partículas.

Os pós metálicos ideais para a IPM devem ter as seguintes características, segundo ADIKINS et al. (1992),

- diâmetro médio de partícula abaixo de 20,0µm;
- morfologia esférica predominante;
- não tenha tendência à aglomeração;
- distribuição granulométrica que promova bom empacotamento;
- superfície isenta de contaminações;
- partículas livres de vazios internos;
- baixa toxicidade.

3.1.2.2 - Veículo orgânico (VO)

Para o sucesso da IPM a composição do VO é de fundamental importância, onde influencia no empacotamento das partículas, mistura, reologia, moldagem, extração, acuracidade dimensional, defeitos e a química final do compactado. As composições de VO mais utilizados podem

ser a base de ceras e solúveis em água. As ceras e alguns polímeros de baixo peso molecular possuem a vantagem de serem de fácil mistura e extração assim como baixa viscosidade e possuírem baixa resistência à mistura. Para o meio ambiente, a composição de VO solúveis em água, terá um papel importante no futuro, pois atualmente são utilizados solventes químicos para a primeira etapa de extração do VO dos componentes injetados. Uma composição ideal de VO possui características favoráveis como o curto tempo de moldagem, alto carregamento de sólidos e a não contaminação química durante o processo de IPM [German (1997)].

A seleção dos componentes do VO depende do ponto de fusão e ponto de ebulição, faixa de pirólise térmica, solubilidade, moldabilidade, e a possibilidade de extração completa desses Veículos Orgânicos [Yang et al. (1996)].

Para que a conformação ocorra de forma satisfatória, o VO deve possuir algumas características indispensáveis.[EDIRISINGHE & EVANS (1986), EDIRISINGHE & EVANS (1987)].

i) Custo

Os componentes devem ser de fácil obtenção e apresentar baixo custo.

ii) Resistência mecânica

O VO deve apresentar grande resistência mecânica após o resfriamento, que pode ser obtida através de componentes contendo cadeias poliméricas de pequeno comprimento, sem orientação definida para que não sejam gerados defeitos na etapa de refrigeração e também para permitir que sejam atingidas características mecânicas isotrópicas, permitindo a manipulação após a extração do molde.

iii) Interação com os pós metálicos

Deve possuir pequeno ângulo de contato, aumentando a molhabilidade da superfície do pó, apresentar boa atração capilar entre as partículas, ter boa passividade química com o metal, inibir a separação ou a aglomeração dos sólidos e, por último possuir baixo coeficiente de expansão térmica, para que a retração do produto seja a menor possível na fase de injeção.

iv) Características de extração

O VO não deve dar origem a resíduos tóxicos ou corrosivos como resultado de sua decomposição, deve apresentar temperatura de decomposição acima da temperatura de conformação e deve apresentar composição na forma fracionada, ou seja, uma gama de componentes intersolúveis com características distintas, para permitir que a decomposição se processe de forma progressiva. O primeiro componente a ser removido deve provocar a formação de poros no produto, para que os demais componentes possam ser extraídos sem a inclusão de defeitos. Os componentes remanescentes, por sua vez, devem reter a forma do produto através de forças de atração capilar entre si.

v) Características reológicas

O VO deve apresentar características que permitam que, com um alto carregamento metálico, realize-se a injeção sem dificuldades e sem a introdução de defeitos. As composições dos VO subdividem-se em sistemas. Esses sistemas são o termoplástico, termocera, termofixo e outros.

a) Sistema termoplástico

Neste sistema uma mistura polimérica contendo termoplástico é adicionada ao pó metálico e submetida a um aquecimento para adquirir uma

consistência plástica. Essa mistura polimérica é injetada dentro da cavidade de um molde mais frio onde ocorre o seu resfriamento e solidificação conferindo resistência mecânica ao injetado.

Bons exemplos de sistemas termoplásticos são os constituídos polietileno e o polipropileno, polímeros estes que são baratos e fáceis de serem encontrados. O polipropileno tem apresentado bons resultados com altos carregamentos de pós. Usa-se geralmente o ácido esteárico como componente de baixo peso molecular.

Muitos experimentos têm sido feitos com outros componentes de VO, tais como o poliestireno, poliéster, polipropileno atático e copolímero etilenovinil acetato, porém estes estão apenas nas fases de testes [NOGUEIRA (1993)].

b) Sistema termocera

Neste sistema, usa-se um VO a base de cera e geralmente este exibem uma viscosidade mais baixa que os outros dois sistemas além de apresentar boas características de molhamento [NOGUEIRA (1993)].

c) Sistema termorrígido

O sistema termorrígido geralmente apresenta um ciclo de tempo maior, porém oferece um injetado com elevada resistência mecânica à verde. As formulações deste sistema, geralmente são à base de resinas epoxi em torno de 10,0% do volume e de ceras ou auxiliares de moldagem em torno de 25,0 a 30,0% em volume. Na primeira etapa, é feito um aquecimento brando da mistura polímero termorrígido-metal conferindo a esta um estado viscoso que permite a injeção para dentro da cavidade do molde. Na segunda, a mistura é definitivamente aquecida dentro do molde para que haja a reação do polímero, conferindo resistência mecânica

irreversível ao injetado [GERMAN(1990)]. A tab.3.1 apresenta algumas formulações típicas de VO.

Tabela 3.1- Possíveis formulações de veículos orgânicos (em % de peso) [German et al. (1991)].

Material/Formulação	a	b	c	d	e	f
Cera de parafina	70		33	69		25
Cera microcristalina	20	22				
Polipropileno		67		20	5	
Polietileno			33			
Ácido esteárico		11	1	1	5	
Cera de carnaúba				10		
Poliestireno					45	
Óleo vegetal					45	
Metil etil cetona	10					
Cera de abelha			33			
Estearato butílico						10
Resina epóxi						65

YANG et al. (1996) realizaram análises térmicas de alguns VO's para pesquisarem o ponto de fusão, faixa da temperatura de decomposição e os resíduos desses elementos. A tab. 3.2 mostra o resultado dessa análise.

Tabela 3.2 – Análise térmica dos Veículos Orgânicos [Yang et all (1996)].

Material	Ponto de fusão (°C)	Temperatura de decomposição (°C)	Resíduos % em peso
Cera de parafina	65	205-348	0
PEG-3350	65	336-421	0
PE	115	358-462	0
EVA	65	296-497	0
GMS	79	216-440	0
Ácido esteárico	81	205-328	0
Estearato de Zn	129	340-454	13.9

3.1.3 - Projeto da peça

As considerações iniciais do projeto definitivo de uma peça fundida sobre pressão deve conter:

- indicação especial daquelas medidas que devem ser mantidas com precisão e daquelas para as quais podem ser admitidas variações (especificações de tolerâncias);
- especificação da inclinação admissível nas faces internas e externas;
- indicação das superfícies que devem resultar sem linhas de divisão nem marcas de extração;
- especificação do tratamento de superfície seja galvânico, químico, térmico ou similar;

- indicação das partes da peça que estão submetidas a esforços mecânicos e as resistências que se esperam delas;
- especificações dos pontos que devem resultar livres de poros;
- especificações sobre os ensaios solicitados;
- determinação das superfícies a serem usinadas nas peças fundidas.

Por outro lado, nas peças fundidas sob pressão deve ser evitado o seguinte:

- pontos bruscos da transição (pontos de formação de fissuras);
- desigualdade na espessura das paredes (tendência à formação de zonas de chupagem e porosas);
- partes salientes de parede fina, por exemplo, orelhas, mancais, apoios (tendência à porosidade), nervos e paredes interrompidas (perigo de formação de trincas), grandes superfícies sem reforço na borda ou sem nervuras (tendência à flambagem).

Qualquer formato de peça que possa ser produzida através da injeção de termoplásticos pode ser produzida através da IPM, mas existem certas limitações em ambos os casos. A tab. 3.3 mostra algumas diretrizes a serem tomadas para o projeto da peça e a figura 3.1 ilustra alguns exemplos de peças com paredes uniformes[GERMAN (1990)].

Tabela 3.3 – Diretrizes para o projeto da peça para a IPM [www.epma.com(1998)].

Restrições	<p>Sem Cavidades internas fechadas;</p> <p>Sem rebaixos em furos;</p> <p>Raios de cantos acima de 0,2mm;</p> <p>2° de inclinação para peças longas;</p> <p>Diâmetro mínimo de 0,1mm para furo;</p> <p>Paredes de espessura mínima de 0,5mm;</p> <p>Peso mínimo de 0,1g.</p>
Características desejáveis.	<p>Mudança gradual de seção da parede;</p> <p>Ranhuras ou furos simétricos;</p> <p>Maior dimensão abaixo de 100mm;</p> <p>Peso abaixo de 100g;</p> <p>Espessura de parede abaixo de 15mm;</p>
Possíveis características de projeto	<p>Número da peça ou identificação;</p> <p>Rosca externa;</p> <p>Ressaltos e pinos;</p> <p>Recartilhado externo;</p> <p>Nervuras;</p> <p>Furos hexagonais, quadrados, cego e de fundo chato.</p>

Figura 3.2 – Exemplo de peças com parede uniforme [www.epma.com (1998)]

3.1.4 – Projeto do molde

O processo de moldagem por injeção metálica é semelhante ao de injeção de polímeros, porém existem grandes dificuldades relacionadas ao projeto dos moldes, pois este se torna crítico devido aos fatores associados à reologia da massa metálica, ao acentuado desgaste do molde provocado pela extrema abrasividade, ao aparecimento de tensões na fase de resfriamento e a fragilidade dos componentes. [MUTSUDDY (1983), MANGELS (1984), UPADHYAYA (1989)]

Para WREGE (1994), o projeto do molde deve levar em consideração vários fatores, como se segue.

a) Materiais empregados na construção dos moldes

A utilização de aços especiais é necessário devido ao alto grau de desgaste dos moldes causado pelo atrito das partículas no momento da injeção.

b) Tratamentos empregados nos moldes

O tratamento térmico recomendado é a têmpera ou cementação com dureza mínima de 55 HRC para todos os elementos do molde que mantêm contato direto com o material de injeção.

c) Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é composto de vários elementos que incluem a bucha e bico de injeção, que devem possuir formas adequadas para que haja um bom assentamento entre eles e com isso evitar vazamentos. Os canais de alimentação têm por finalidade levar o material fundido da bucha de alimentação para a entrada das cavidades com o mínimo de perda de pressão e desperdício de material possível.

d) Localização e geometria da entrada

A localização da entrada influencia na qualidade do produto. Deve ser posicionada, em relação ao produto, em regiões de grande espessura e de baixa solicitação mecânica, possibilitando que o escoamento se processe em contato com alguma superfície do molde, imediatamente após a entrada, evitando-se com isso o esguichamento.

São duas as funções da geometria da entrada, uma é de controlar a taxa de material que penetra na cavidade e a outra é de evitar o refluxo do material que se encontra em processo de resfriamento na cavidade.

e) Poço frio

O poço frio tem por finalidade evitar que o material resfriado nos intervalos de injeção penetre dentro da cavidade. Normalmente está localizado na extremidade do canal de injeção na face de abertura do molde e na extremidade do canal principal ou junto a última área a ser preenchida pela cavidade.

f) Sistema de ventilação

Com a penetração do material no sistema de alimentação e nas cavidades é muito comum aparecer bloqueio de gases, que causam falta de preenchimento e podem ocasionar queimaduras localizadas chamadas de *efeito diesel* ou mesmo a ocorrência de furos. Para se eliminar esse bloqueio dos gases, são adotados sistemas de ventilação localizados convenientemente no molde de forma a possibilitar a exaustão dos gases. Esses sistemas são normalmente constituídos de pequenos orifícios e devem ser localizados em todos os pontos onde houver chance de aprisionamento de gases.

4 – PRINCÍPIO DA INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS (IPM)

O processo de injeção de massa metálica consiste basicamente da injeção de uma mistura de pós metálicos com polímeros fundidos sob pressão na cavidade de um molde, que fornece o formato desejado à peça. Após a solidificação tem-se a peça verde que apresenta-se com rigidez suficiente para ser manipulada e pode ser extraída da cavidade sem deformações. O componente final é obtido através do processamento de 5 etapas, que inclui a preparação dos pós metálicos, a mistura dos pós com um veículo orgânico, a injeção, a extração do material orgânico e a sinterização do produto. [FORTULAN (1991)]

Apesar das vantagens, a injeção somente deve ser utilizada onde os processos convencionais de conformação não possam ser empregados, tais como a prensagem uniaxial, a prensagem isostática e outros, pois o custo inicial do molde é alto e a etapa de extração do veículo orgânico é delicada, com longa duração e altos custos envolvidos em virtude do alto consumo de energia.[ERICKSON et al. (1985), URAM (1987), MUTSUDDY (1987), BARBEZAT (1991)]

Para BATALHA (1991), a IPM torna-se mais competitiva quando os critérios de projeto podem direcionar a função da peça de modo a reduzir as operações secundárias, eliminar montagens, reduzir peso, rebarba e retrabalho. Os principais atrativos da IPM para os fabricantes de peças pequenas são:

- melhora da produtividade, reduzindo os custos de fabricação e menor desperdício de matéria prima;
- retorno mais rápido, tempo de amortização mais curto e previsível, e introdução mais rápida de novos produtos;
- menores investimentos em estoques;
- maior flexibilidade em relação a mercado e clientes;
- habilidade de fazer formas até aqui impossíveis e combinações de metais , limitada somente pela disponibilidade dos pós;
- propriedades dinâmicas superiores à MP convencional.

BATALHA (1991) estabelece quatro regras básicas para os projetos envolvendo IPM, algumas inclusive compartilhadas com a MP convencional.

- Uma peça deve ser feita pela IPM somente se não puder ser fabricada pela MP convencional, pois o custo do pó mais fino, para uma dada composição, pode chegar a ser 8 vezes maior.
- Deve-se lembrar de que as tolerâncias de fabricação e a cotada na peça após a sinterização estão na faixa de $\pm 0,6\%$ para fabricantes iniciantes no processo IPM e mais baixa, na faixa de $0,1\%$ para os mais experientes.
- As peças fabricadas pela IPM deveriam ser reprojetadas ou pelo menos examinadas cuidadosamente por engenheiros experientes em IPM, para serem mais efetivas em termos de custos.
- A composição não deve ser necessariamente sempre a melhor, especialmente quanto a impurezas e elementos de liga tradicionais. As

especificações devem ser feitas mais em termos de propriedades do que composições.

O processo da IPM se inicia com uma proporção de volume de aproximadamente de 40,0% de VO e 60,0% de pó metálico fino, onde se obtém a massa metálica para a moldagem dos componentes. A moldagem é feita injetando-se a massa metálica dentro de um molde, com o mesmo princípio da injeção de termoplásticos. Após a moldagem, os produtos a “verde” obtidos são aproximadamente 15,0% maiores do que o produto final pretendido. Os produtos a “verde” são então colocados a alta temperatura, dentro de fornos, para o processo de extração do VO pela extração térmica da maior parte dos polímeros aglomerantes.

Antes da sinterização é necessário remover os constituintes orgânicos. Este processo de remoção consome muito tempo e é o estágio mais crucial no ciclo de moldagem por injeção. Muitos defeitos formados durante a mistura e moldagem podem ser notados somente depois da remoção do VO. Se feito de maneira errada, os corpos moldados provavelmente se deformam ou trincam.

O estágio de extração do VO deve ser baseado numa abertura progressiva dos canais da superfície para facilitar a remoção dos vapores constituintes das regiões do núcleo.

Pelo processo de extração térmica o polímero pode ser removido na forma de gases por difusão ou permeação acompanhada de decomposição térmica, ou rompimento das cadeias, ou mesmo por depolimerização. Geralmente a difusão é dominada por pressão muito baixa, enquanto a permeação é dominada por tamanho de poros maiores e maiores pressões.

No processo de extração do VO pelo método de capilaridade, que é comumente usado quando se tem VO a base de ceras, as peças formadas

são removidas do molde e embebidas num pó fino onde, sob aquecimento, o VO fundido é absorvido por capilaridade.

Sinterização é o tratamento térmico usado para transformar um compacto de pó metálico em um estado agregado ou policristalino que possui uma resistência. É essencialmente uma remoção de poros, acompanhada por crescimento e forte adesão entre as partículas adjacentes, provocando como resultado a retração do produto. É também a última etapa do processo de conformação por injeção. Nesta etapa são atingidas as características e as propriedades finais do produto, como densidade e propriedades mecânicas (GERMAN,1990).

Durante a sinterização, o remanescente do VO é extraído das peças e a densificação é completada. A sinterização é feita sobre temperatura e atmosfera controlada cuidadosamente num forno de alta temperatura. Geralmente, para alta produção, são utilizados fornos de esteira. Operações secundárias, tratamento térmico e recobrimento são efetuados quando necessários.

A atmosfera de sinterização é obtida através da injeção de gases dentro do forno, para o controle das reações químicas durante este processo, adicionalmente, esses gases transportam o calor para o componentes injetados. Inicialmente, a sinterização de peças metálicas eram feitas no vácuo mas com o desenvolvimento da sinterização, o vácuo foi sendo substituído por uma mistura de nitrogênio-hidrogênio.

Muitas atmosferas de sinterização são utilizadas na IPM, incluindo ar, gases inertes, hidrogênio, mistura de nitrogênio-hidrogênio, mistura de argônio-hidrogênio e vácuo. O ar é utilizado na sinterização de óxidos cerâmicos enquanto que o nitrogênio é uma opção para os nitretos cerâmicos. A atmosfera de gás inerte (argônio é a mais típica) é neutra e prove uma pequena interação termoquímica com o compactado, onde é mais útil em materiais reativos como o titânio. A falta de redução dos gases

inertes faz com que esse tipo de atmosfera seja descartada na maioria das aplicações.

Várias misturas de hidrogênio e nitrogênio são utilizados na sinterização de ligas de ferro. Amônia dissociada é uma das bases para a formação da mistura de 75,0% H_2 e – 25,0% N_2 , e é formada pela decomposição do vapor de amônia. O nitrogênio é neutro na maioria das situações e é utilizado com uma concentração acima de 95,0% na atmosfera de sinterização. Em termos de características de redução, o hidrogênio puro é mais favorável e a umidade diminui as características de redução da atmosfera e ainda o transforma em descarburizante. Muitos materiais, como o titânio, berílio, aços ferramentas e aços inoxidáveis poder ser sinterizados no vácuo [GERMAN & CORNWALL (1997)].

4.1 – Defeitos Associados à Fase de Injeção dos Produtos.

Os defeitos nos produtos injetados podem surgir em cada etapa do processo, ou seja, na fase da injeção, na fase de extração do VO e na fase de sinterização. A figura 4.1 ilustra os defeitos possíveis de ocorrerem nos produtos injetados, segundo GERMAN (1990), e a tab. 4.1 os defeitos que surgem em cada etapa da IPM, segundo EDIRISINGHE et al. (1989).

Tabela 4.1 – Relação dos defeitos com a etapa da injeção de pós metálicos [EDIRISINGHE et al. (1989)]

FASE	ETAPA	TIPO DE DEFEITO
INJEÇÃO	Mistura	<ul style="list-style-type: none"> - VO's não dispersados; - aglomerados não dispersados; - contaminação abrasiva pelo equipamento de mistura; - contaminação com material degradado no equipamento de mistura.
	Preenchimento do molde	<ul style="list-style-type: none"> - linhas de solda; - jatos; - contaminação abrasiva pela injetora.
	Solidificação	<ul style="list-style-type: none"> - vazios relacionados com a retração; - vazios causados pela umidade residual da mistura; - trincas relacionadas à retração.
	Ejeção	<ul style="list-style-type: none"> - deformação devido ao pino ejetor; - deformações no volume ou trincamento; - bolhas causadas por deformação térmica na cavidade
	Repouso	<ul style="list-style-type: none"> - trincamento devido à tensão residual induzida.
EXTRAÇÃO DO VO	1º Estágio do aquecimento	<ul style="list-style-type: none"> - deformação causada por relaxamento da tensão residual; - defeito devido à tensão residual induzida; - trincamento devido à degradação térmica.
	2º Estágio do aquecimento	<ul style="list-style-type: none"> - inchaço causado por evolução de produtos gasosos; - depressão.
	3º Estágio do aquecimento	<ul style="list-style-type: none"> - trincas causadas pela evolução de produtos gasosos; - trincas causadas pela não uniformidade da remoção do VO; - trincamento ou deformação associada aos efeitos gravitacionais; - laminação da superfície; - resíduo de contaminação.

Figura 4.1 – Defeitos nos produtos injetados [GERMAN (1990)]

5 – METODOLOGIA APLICADA

Este trabalho trata da injeção de pós de aço inoxidável. Para este desenvolvimento foram projetados e executados moldes de corpos de prova de tração e de uma peça em forma de cadinho com o propósito de avaliar o processo de injeção a baixa pressão, utilizando-se uma injetora construída no LAMAFE da EESC-USP, para assim obter-se informações relativas ao desempenho dos produtos injetados, das taxas de aquecimento para a extração do VO e sinterização assim como o ambiente utilizado nos fornos de sinterização.

5.1 – Formulações

5.1.1 – Formulação da massa metálica

Utilizou-se uma formulação contendo 65,0% de pó metálico e 35,0% de VO em volume. A proporção utilizada foi definida para se obter uma massa metálica com baixa viscosidade e maior capacidade de molhamento do VO sobre as partículas metálicas.

5.1.2. – Formulação do VO

A formulação do VO foi baseada em estudo da viscosidade, e a melhor formulação obtida apresentou as seguintes proporções: 94% de cera de carnaúba, 5% de polietileno e 1% de ácido esteárico, em peso [Nogueira (1998)].

5.1.3 – Formulação da parte metálica

Para a injeção da massa metálica, utilizou-se pó de aço inoxidável 316L da *Pacific Metal* com tamanho médio de partícula de 15,0 μm , atomizado a gás. O pó utilizado possui características, como tamanho e forma das partículas, favoráveis ao processo de injeção.

5.2 – Construção de Moldes

Foram construídos moldes para o estudo do processo de injeção a baixa pressão do pó de aço inoxidável, conforme os ilustrados nas figuras 5.1 e 5.2. A figura 5.1 mostra as cavidades do molde que foram preenchidos com uma mistura de resina e pó de cobre para obtenção da forma desejada, utilizando-se os modelos de corpos de provas conforme ilustrado. Uma vez obtida a forma desejado para as cavidades dos corpos de provas, e uma vez a resina curada, o molde estava em condições de ser utilizado na injetora. A figura 5.2 ilustra o molde e a respectiva peça em forma de cadinho utilizados neste trabalho.

Figura 5.1 – Molde de corpo de prova

Figura 5.2 – Molde de um cadinho

5.3 – Injeção

Para a obtenção da massa metálica, o VO foi colocado em um recipiente adequado e aquecido numa estufa até atingir o estado líquido. O pó foi adicionado e misturado manualmente até se obter uma massa viscosa e assim transferido para o recipiente da injetora de baixa pressão, ilustrada na figura 5.3, previamente aquecido à 100°C. Fechado o recipiente, as bateadeiras e o vácuo foram ligados e o sistema de aquecimento ajustado para 150°C. Após 15 minutos, o vácuo foi fechado e iniciou-se a injeção das peças, com a colocação dos moldes no bico de injeção e estes sendo fixos pelo cilindro pneumático.

Figura 5.3 – Máquina de injeção à baixa pressão

5.4 - Extração do VO

A extração do VO é a etapa mais crítica de todo o processo e por isso é necessário um cuidado maior para se evitar a ocorrência de defeitos nas peças, principalmente o surgimento de bolhas e deformação.

As peças à verde, embebidas em pó de alumina, para se evitar a deformação e o surgimento de bolhas, foram aquecidas a 100°C e mantidas a essa temperatura durante 24 horas, conforme Nogueira (1998). Depois a temperatura foi elevada até 400°C a uma taxa de 20°C por hora e mantida por mais 24 horas.

Foram feitas duas taxas de aquecimento para a extração do VO, com o intuito de se verificar a eficácia do processo e para uma comparação dos resultados, tanto na qualidade da extração como no tempo gasto no processo. A tab. 5.1 mostra as taxas utilizadas na extração do VO.

Tabela 5.1 – Tempo e temperatura de extração do VO

A – Tempo total – 32 horas		B – Tempo total – 34 horas	
Temperatura [°C]	Tempo [h]	Temperatura [°C]	Tempo [h]
100	24	100	26
200	1	200	1
250	1	300	3
300	1	400	4
350	1		
400	4		

5.5 - Sinterização

As peças atingem o seu estado final na etapa de sinterização. As características mecânicas, físicas e químicas dependem de como é feito o processo de sinterização, onde cada material necessita de uma temperatura, ambiente do forno e taxa de aquecimento específicos. Como neste trabalho foi utilizado pó de aço inoxidável, vários experimentos foram feitos para se verificar a viabilidade da sinterização desse tipo de material, como por exemplo a utilização de um forno comum sem ambiente controlado, que teria um custo mais baixo em relação a outros métodos.

A sinterização das peças foram feitas em três tipos de fornos. O primeiro a ser utilizado foi um forno comum sem ambiente controlado, com o objetivo de analisar a extração do VO. O segundo, um forno à vácuo com temperatura controlada e o terceiro, com ambiente controlado de hidrogênio e nitrogênio. A figura 5.4 e mostram a taxa de aquecimento utilizado nos experimentos.

Figura 5.4 – Taxa de aquecimento da sinterização

5.6 – Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados para a injeção a baixa pressão de pó de aço inoxidável são especificados abaixo.

Injetora de baixa pressão para massas metálicas, construída no LAMAFE – Laboratório de Máquinas e Ferramentas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Estufa elétrica Soc. FABBE Ltda, modelo 119, para 300°C.

Forno elétrico QUIMMIS Aparelhos Científicos Ltda, modelo Q.318.24, para 1200°C.

Balança OHAUS modelo TS4KD com capacidade de 4000g.

Aparelhagem combinada para a determinação rápida de carbono e enxofre no aço e ferro (Stroehlein – Dusserldorf), modelo C+S.

Pó de aço inoxidável 316L

Procedência: Pacific Metals Co., LTD. Hachinohe Works.

Lote: 87V3021

Tamanho nominal: PF-20F, HIGH T/D.

Densidade compactada: 4,49 g/cm².

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)
0,020	0,80	0,83	0,012	0,006	12,54	16,47	2,09	0,05

6 – RESULTADOS OBTIDOS

Em função dos produtos injetados, pôde-se obter informações relevantes relativas ao processo de injeção a baixa pressão de pó de aço inoxidável 316L, as quais são descritas a seguir.

Composição do VO utilizado – A composição do VO utilizado demonstrou uma boa fluidez, retenção das partículas e molhabilidade, possibilitando assim a obtenção de peças a verde de boa qualidade.

Peças injetadas – As peças obtidas da injeção, apresentaram um aspecto satisfatório. Algumas peças apresentaram defeitos de preenchimento que poderiam ter sido causados pelo aquecimento insuficiente dos moldes e também pelo posicionamento do canal de alimentação. As figuras 6.1 e 6.2 ilustram a modificação feita no canal de alimentação do molde. Na figura 6.1, com a posição do canal de alimentação na lateral do corpo de prova, algumas peças apresentaram falta de preenchimento nessa região, como é uma região importante da peça, a modificação feita, como ilustra a figura 6.2, melhorou a qualidade da peça em termos de falta de preenchimento, pois com o novo posicionamento, algumas peças apresentaram falta de preenchimento somente na extremidade do corpo de prova, aonde é uma região que não apresenta tanto problema em termos de desempenho do corpo de prova.

Figura 6.1 – Defeito causado pelo posicionamento do canal de alimentação.

Figura 6.2 – Nova posição do canal de alimentação.

Na figura 6.3, pode-se observar alguns defeitos que surgiram na injeção. A falta de preenchimento pode ter sido causada pela contração do material após o resfriamento da mesma ou pela retenção do ar na região. As linhas de solda surgiram devido a qualidade do molde e principalmente ao desgaste causado pela injeção. Uma provável causa do aparecimento da bolha pode ter sido pela falha da retirada de ar da massa metálica, através do sistema de vácuo, devido ao travamento da válvula de retenção do vácuo após algumas injeções.

Em algumas peças apareceram pequenas bolhas internas observadas após a quebra das peças com o VO extraído, provavelmente causada pela falta de desempenho da válvula de retenção do vácuo após várias injeções. A abertura do molde precisa ser feita no tempo certo, para que as peças adquiram resistência suficiente com o resfriamento e que não ocorram quebras ou trincas durante essa etapa.

Figura 6.3 – Defeitos encontrados nas peças injetadas a baixa pressão.

Extração do VO - A extração do VO foi realizada com sucesso, não surgiram novos defeitos nas peças durante esta etapa, observou-se apenas os defeitos causados pela injeção, como bolhas, linhas de solda e falta de preenchimento.

Sinterização – A sinterização foi realizada utilizando-se dois tipos de fornos para se observar qual deles se adapta melhor ao presente trabalho: forno à vácuo e forno com ambiente controlado. Na sinterização feita em forno comum (sem ambiente controlado e sem vácuo), as peças apresentaram oxidações internas e externas, conforme a literatura.

Na sinterização feita no forno à vácuo as peças obtidas apresentaram uma casca externa dura com o interior oxidado e em alguns casos a oxidação interna não foi encontrada. A taxa de aquecimento, a falta de um ambiente controlado ou a contaminação do forno por carbono, podem ter sido a causa do surgimento desses defeitos. A figura 6.4 ilustra algumas das peças obtidas,

Figura 6.4 – Peças obtidas através da injeção à baixa pressão de pó de aço inoxidável.

O melhor resultado foi obtido na sinterização em forno com ambiente controlado de uma mistura de Hidrogênio (4,0 %) e Nitrogênio, como mostra a figura 6.5, onde podemos observar a ausência de oxidações, brilho característico do aço inoxidável e em algumas peças a presença de vazios, que pode ter sido causado pela saída do veículo orgânico.

Figura 6.5 – Peça sinterizada em forno de ambiente controlado.

Ensaio mecânicos – Os ensaios foram realizados com o intuito de se ter uma idéia das propriedades mecânicas, em termo de resistência a tração, dos corpos obtidos através da injeção a baixa pressão. As peças foram submetidas a ensaio de tração e dureza, cujos resultados foram utilizados para serem comparados com os encontrados na literatura. O resultado da média do ensaio de tração de dois corpos de prova está ilustrado na figura 6.6 e os valores estão na tab. 6.1 e a tab. 6.2, que mostra os resultados de um ensaio feito por CAI & GERMAN (1994) de peças injetadas a alta pressão de pós de aço inoxidável 316L obtidos por atomização a gás e água. Uma micrografia da peça sinterizada em ambiente controlado está ilustrada na figura 6.7, onde pode-se observar pequenos e grandes grãos austeníticos, maclas e óxidos, provavelmente pela utilização inadequada do ambiente de sinterização, predominante nos contornos de grão.

Figura 6.6 – Curva Tensão X Deformação, para pó de aço inoxidável 316L injetado à baixa pressão, $V = 5 \text{ mm/min.}$, onde é observado o limite de escoamento, σ_e (0,2%) e a tensão de fratura.

Tabela 6.1 – Propriedades mecânicas dos corpos ensaiados

Propriedade Mecânica	Resultado
σ_R – Tensão de Ruptura [MPa]	corpo de prova I: 462 MPa
	corpo de prova II: 491 MPa
σ_E – Tensão de Escoamento [MPa]	corpo de prova I: 218 MPa
	corpo de prova II: 390 MPa
ϵ - alongamento	0.04
H - Dureza [Rockwell B]	77.1 HRb

Tabela 6.2 – Resultado do ensaio de tração de amostras sinterizadas a 1350 °C por 1h em 100% H₂ [CAI & GERMAN (1994)].

Pó atomizado por	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Água 62% vol.	188 ± 6	448 ± 14
Gás 65% vol.	180 ± 8	266 ± 67
Gás 67% vol.	199 ± 4	370 ± 39

Figura 6.7 – Micrografia da peça sinterizada em forno de ambiente controlado.

7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

Neste trabalho, o processo de injeção à baixa pressão de pó de aço inoxidável foi realizado através dos conhecimentos adquiridos em atividades interdisciplinares realizadas nas áreas de Engenharia Mecânica e Engenharia de Materiais. Estas atividades permitiram a obtenção de componentes (corpos de prova) para a análise da viabilidade do processo, já que este ainda é de pouco conhecimento tanto a nível industrial como a nível de pesquisa.

Durante a revisão do estado da arte, verificou-se que a injeção de pós de aço inoxidável a baixa pressão é um processo ainda insipiente que necessita de mais estudos e dispõe de poucas referências bibliográficas. Através da revisão do estado da arte da injeção de pós metálicos (IPM), pôde-se observar que o processo de injeção a alta pressão de pós metálicos é pouco explorado pela indústria e a injeção a baixa pressão ainda está em fase de estudo. As vantagens que a injeção a baixa pressão de pós metálicos possui em relação a de alta pressão, são a possibilidade de construção de máquinas mais compactas, com ausência de unidades hidráulicas sofisticadas, um menor desgaste dos componentes da máquina (fuso e pistão), possibilidade de automação e o menor desgaste dos moldes.

A máquina de injeção de baixa pressão utilizado neste trabalho mostrou um bom desempenho durante a injeção das peças e corpos de provas. As propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados foram satisfatórias, quando comparados com resultados semelhantes obtidas por outros processos de conformação descritos pela literatura.

A metodologia aplicada relacionada com a injeção, extração de VO e sinterização, mostraram resultados que induzem a necessidade de mais estudos referentes ao projeto dos moldes, principalmente com relação à posição dos canais de alimentação. A automatização da abertura dos moldes poderia ser utilizado como uma solução para eliminar a quebra das peças durante esta etapa.

Os problemas de extração do veículo orgânico que apareceram principalmente durante a primeira fase de remoção, podem ser resumidos principalmente pela presença de bolhas em algumas das peças, devido ao alívio de tensão causado durante o processo de injeção. Verificou-se que na sinterização, a taxa de aquecimento e o tempo de exposição influem nas características mecânicas e físicas dos componentes. Devido a isso, sugere-se que mais experimentos com taxas de aquecimento e tempo de exposição devem ser realizados para se conseguir peças com resultados satisfatórios em termos de propriedades físicas e mecânicas, assim como a viabilidade da utilização do vácuo como ambiente de sinterização para aços inoxidáveis. O forno à vácuo foi utilizado para verificar a sua viabilidade, com o intuito de diminuir o custo do processo, com a dispensa do uso de gases. Verificou-se portanto, que a extração do VO foi a etapa que quase não apresentou problemas e a sinterização com forno de ambiente controlado mostrou resultados satisfatórios

Verificou-se que na injeção, o projeto do molde tem grande influência na qualidade da peça. A posição do canal de alimentação e a geometria da peça tem que levar em conta a retenção de ar durante a injeção, onde uma possível solução seria a colocação de canais de saída de ar.

Os resultados obtidos mostraram que as peças conformadas através do processo de injeção à baixa pressão apresentaram poros e a resistência à tração dos corpos de prova tiveram resultados parecidos com os obtidos, pela IPM, por outros autores. Nos aparelhos ortodônticos existe uma peça chamada "braqu岸ts". Essas peças não são submetidas a grandes

esforços mecânicos, necessitam de uma alta resistência à corrosão e possuem pequenas dimensões de forma complexa. A fabricação desses “braquets” através da injeção à baixa pressão de pó de aço inoxidável seria uma das opções viáveis.

Como recomendação para trabalhos futuros, considerando que o principal objetivo deste trabalho foi o de verificar a viabilidade do processo de injeção a baixa pressão de pó de aço inoxidável, alguns parâmetros não foram aplicados, ficando como sugestões, as que se seguem:

- estudos adicionais com relação ao projeto do molde para se obter peças com poucas tensões residuais e ausência de bolhas;
- utilização de outros tipos de pó de aço inoxidável para se comparar as propriedades das peças à verde e sinterizadas;
- empregar outras taxas de aquecimento para a remoção do VO e sinterização com o intuito de diminuir o tempo gasto nestas etapas e paralelamente, novas formulações de VO;
- analisar a sinterização das peças utilizando outros gases, como por exemplo o argônio;
- micrografia mais detalhada, com ataque térmico e/ou por difusão atômica, para a análise dos óxidos encontrados na peça sinterizada com ambiente controlado e para se obter mais detalhes micrográficos.

8 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. ADAMS, S.M.; NAYAR,H.S. Advantages of nitrogen as a brazing atmosphere. **Heat Treating**, Apr 1991.
2. ADKINS, N. J. E.; YIASEMIDES, G. P. Production of powders for metal injection moulding by inert gas atomization. In: **ADVANCES IN POWDER METALLURGY & PARTICULATE MATERIALS**, San Francisco, 1992. Proceedings: Metal Powder Industries Federation, v.1, p. 201-214, 1992.
3. ALLAN, P. S.; BEVIS, M.J.; EDIRISINGHE, M. J.; EVANS, J.R.G. ; HORNSBY, P.R. Avoidance of defects in injection - moulded technical ceramics. **Journal of Materials Science Letters**, v. 6, p.165-166,1987.
4. ALLEGHENY POWDER METALLURGY, Inc. www.alleghenypm.com (16/02/1998).
5. AMBS, H.D.; STOSUY, A. The powder metallurgy of stainless steel, in **Handbook of Stainless Steel**, p. 29-31, 1977.
6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A370-77 - Standard methods and definitions for mechanical testing of steel products. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1982. part.10. p.28-83
7. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**: powder metallurgy. 9 ed. Metals Park, Ohio, 1984. v.7.
8. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**: mechanical testing. 9 ed. Metals Park, Ohio, 1984. v.8.

9. ANGERMANN, H. H.; YANG, F.K.; VANDER BIEST, O. Removal of low molecular weight components during thermal debinding of powder compacts **Journal of Materials Science**, v.27, p.4381-4388, 1992.
10. ASHBY, M. F. A first report on sintering diagrams. **Acta Metallurgica**, v.22, n.3, p.275-285, Mar.1974.
11. BANDYOPADHYAY, G.; FRENCH, K. W. Injection-molded ceramic: Critical aspects of the binder removal process and component fabrication. **Journal of the European Ceramic Society**, n.11, p.23-34, 1993.
12. BANDYOPADHYAY, G. ; FRENCH, K. W. Effects of Powder Characteristics on Injection Molding and Burnout Cracking. **American Ceramic Society Bulletin**. v.73, n.3, Mar.1994.
13. BARBEZAT, G. Rational manufacture of components with complicated geometries. **Sulzer Technical Review**, n.1, p.10-12, 1991.
14. BATALHA, G. F. Conformação de peças metálicas pela moldagem de pós por injeção (MPI) técnica e potencialidade. In: **SEMINÁRIO SOBRE METALURGIA DO PÓ**, 3, 1991. São Paulo, ABM, p.77-97, 1991.
15. CAI, L.; GERMAN, R. M. Comparing water-atomized powder with gas-atomized powder of 316L stainless steel via powder injection molding. **Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials**, Metal Powder Industries Federation, v.4, p. 157-170, 1994.
16. CALVERT, P. D.; CIMA, M. J. Theoretical models for binder burnout. **Journal of American Ceramic Society**, v.73, n.3, p.575-579, 1990.

17. CHIAVERINI, V.; JESZENSKY, G. Sintered stainless steel. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Compiled by J.M. Capus and R.M. German, MPIF, v.5 P/M Steels, p. 359-372, 1992.
18. CHUNG, C. I. ; CAO, M. Y. ; KUPPERBLATT, G. B.; RHEE, B. O. A New binder system for powder injection molding. In: **Powder mettallurgy conference and exhibition**. Advances in Powder Metallurgy, Proceedings of 1990 Powder Metallurgy Conference, part 3, 1990, Pittsburgh, p.193-211.
19. CLAPP, D. Overview of conventional powder metallurgy processing. **Advanced Materials & Process** n.8, p. 60-61, 1995.
20. CLARK, F. Advanced techniques in powder metallurgy. New York, **Rowman and Littefield**, N.Y., 1963, Chapter 12.
21. DAHN, C. J. Explosivity and Pyrophoricity of Metal Powders. In: American Society for Metals. **Metals Handbook: Powder metallurgy**. 9 ed. Metals Park, Ohio, 1984. v.7.
22. EDIRISINGE, M. J.; EVANS, J. R. G. Review: fabrication of engeneering ceramic by injection molding, I Materials Selection. *Int. J. High Tecnology Ceramics*, (2): p. 1-31, 1986.
23. EDIRISINGE, M. J.; EVANS, J. R. G. Properties of ceramic injection molding formulations. Part 1 Melt reology. **Journal of Materials Science**, n.22, p.267-277, 1987.
24. EDIRISINGE , M. J. ; EVANS, J. R. G. Systematic development of the ceramic injection moulding process . *Materias Science and Engineering A* 109, p. 17-26, 1989.
25. EDIRISINGE , M. J. Binder removal from moulded ceramic bodies in different atmospheres. **Journal of Materials Science Letters**, n.10 p.1338-134, 1991.

26. ERICKSON, A. R. ; AMAYA, H. E. Recent developments in injection moulding of P.M. parts. **Metal Powder Report**, v.40, p.484-489, 1985.
27. ERICKSON, A. R. ; WIECH, JR. Injection moulding. In: American society for metals. **Metals Handbook**. Powder metallurgy. 9 ed. Metals Park, Ohio, 1984. v.7
28. EUROPEAN POWDER METALLURGY ASSOCIATION
<http://www.epma.com> (14/02/1998).
29. EVANS, J. R. G. ; EDIRISINGHE, M. J. Interfacial factors affecting the incidence of defects in ceramic mouldings. **Journal of Material Science**, v.26, n.8, p.2081-2088, 1991.
30. FANELLI, A. J. ; SILVERS, R. D. ; FREI, W.S.; BURLEW, J.V.; MARSH, G.B. New aqueous injection molding process for ceramic powder. **Journal of American Ceramic Society**, v.72, n.10, p.1833-1836, 1989.
31. FIRE PROTECTION HANDBOOK. National Fire Protection Association. 14 ed., 1976, cap.8.
32. FORTULAN, C. A.; PURQUERIO, B. M. Injetora de baixa pressão para cerâmica avançada. XI Congresso de Engenharia Mecânica, Anais/Proceedings, São Paulo, p. 373-375, 1991.
33. FORTULAN, C. A. **Estudo do processo de injeção de cerâmica e desenvolvimento de injetora**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1993.
34. GERMAN, R. M. Global P/M in United States of America. **International Journal of Powder Metallurgy**, v.25, n.2, p.153-156, Apr. 1989.
35. GERMAN, R. M. Powder injection moulding. **Metals powder industries federation**, New Jersey, Princeton, 1990.

36. GERMAN, R. M. ; HENS, K.F.; LIN, S.T.P. Key issues in powder injection molding. **Ceramic Bulletin** v.8, n.70, p.1294-1302, 1991.
37. GERMAN, R. M.; CORNWALL, R. G. Thermal processing consideration for injection molding of metal and ceramic powder, **Industrial Heating**, ISSN 0019-8374, v.64, n.6, p. 35-38, Jun. 1997.
38. GERMAN^a, R. M. The production of stainless steels by injection molding water atomized prealloy powders, **Journal of Injection Molding Technology**, v.1, n. 3, p. 171-180, Sep. 1997.
39. GERMAN, R. M. Metal injection molding. In. KUNZE, K. D. **Competitive Advantages by Near-Net-Shape Manufacturing**. Frankfurt , Germany, p. 211-222, 1997.
40. GLANVILL, A. B.; DENTON, E. N. **Moldes de Injeção: Princípios básicos e projetos**. 2 ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1989. 304p.
41. GONÇALVES, A.C. **Conformação de pós metálicos através do processo de injeção à baixa pressão**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1997.
42. GONÇALVES, A. C. ; PURQUERIO, B. M. Injeção de Pós Metálicos. **Metalurgia & Materiais**, v.52, n.449, p.30-37, jan. 1996.
43. HENS, K. F.; LEE, D. Injection molding of powders into complex shapes. Advances in Powder Metallurgy. In: **Powder Metallurgy Conference and Exhibition**, pat3, Pittsburgh, PA, 1990.
44. HENS, K. F.; LEE, D. ; LIN, S. T. ; GERMAN, R. M. Integrity of complex shape products by powder injection molding. **PMI** , v.23, n.1, p.15-21, 1991.
45. HIRSCHHORN, J. Introduction to powder metallurgy. Princeton, N.J., APMI, 1991.

46. HOME, J. D. Powder injection moulding: still waiting in the wings. **Materials World** v.1, n.10, Out. 1993.
47. HUNT, K. N.; EVANS, J.R.G.; WOODTHORPE. Computer modelling of the origin of defects in ceramic injection moulding Part II Shrinkage voids **Journal of Material Science** v.26, p.292-300, 1991.
48. INOUE, M. ; KIHARA, Y. ; ARAKIDA, Y. Injection moulding machine for high performance ceramics, In: **Terceram 2**. Journal Ceramic Review, v.2, p. 53-57, 1989.
49. IWAI, T.; AIZAWA, T.; KIHARA, J. Granular Modeling for Powder-Binder Coumpound Flow in MIM. 14p. INTERNET 25/06/1996
<http://bahamut.mm.t.utokyo.ac.jp/~iwai/paper/granular-model.html>
50. JACOBSON, M.; COOPER, A. R.; NAGY, J. Explosibility of metal powders. **Bureau of Mines**, 1964. Report n. 6516.
51. JAMES^a , P. J. Discovering the PIM process. **Manufacturing Engineer**, n.9, v.68, p.40,42-44, Jan. 1989.
52. JAMES^b, P. J. Injection moulding of Metal Powders. **Metal Powder Report**, n.44, p.369-372, 1989.
53. JAPKA, J. E. Iron powder for metal injection molding. **International Journal of Powder Metallurgy**, v.27, n.2, p. 107-114, apr.1991.
54. JAPKA, J. E.; GERMAN, R.M. Research developments in carbonyl iron powder for MIM. **Metal Powder Report**, v. 47, n. 5, p. 68-77, mai. 1992.
55. JENKINS, I. WOOD, J.V. Selected case studies in powder metallurgy,. The institute of metals. 152p, 1991.
56. JOHNSON , A. , CARLSTROM , E. ; HERMANSSON, L.; CARLSSON, R. Rate controlled thermal extraction of organic

- binders from injection-molded bodies, In: MANGELS, J. A. **Advances in Ceramic, 9 Forming Ceramics**. P.241- 245, 1984.
57. JOHANSSON, P.K. New P/M Applications. Metal Powder Industries Federation. In: **POWDER METALLURGY CONFERENCE AND EXHIBITION**, Pittsburgh, PA, May 20-23, 1990.
 58. KARANDIKAR, D. A. ; RAMAKRISHNAN, P. Injection Moulding of P/M Structural Steels. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWDER METALLURGY AND RELATED HIGH TEMPERATURE MATERIALS**, Bombay, p.171-178, 1987.
 59. KIMURA, A. ; KATO, Y. Production of Stainless Steel Powders at Pacific Metals. **Metal Powder Report**, v. 43, p. 148-154, 1988.
 60. KING, E. Health risks of fine powders. In: **Principles of Powder Technology**. MARTIN RHODES, University of Bradford, UK. Cp. 12, p. 335-366, 1995.
 61. KLAR, E. ; FESKO, J. W. Gas and Water Atomization. In: **AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook: Powder Metallurgy** 9 ed, Metals Park, Ohio, 1984. v. 7.
 62. KUMAR, P.; VEDULA. K.; RITTER, A. Symposium on processing and properties for powder metallurgy composites. Denver, Co. Feb. 1987. 171p.
 63. KWON, T. H. Mold cooling system design using boundary element method. **Journal of the Engineering for Industry**. v. 110, p.384-394, Nov. 1988.
 64. LENEL, F.V. Powder Metallurgy. **Metal Powder Industries Federation**, Princeton, NJ, 1980
 65. LEVY,S. DUBOIS, J.H. **Plastics Product Design Engineering Handbook**, 2nd edition. New York, Chapman and Hall, 1984
 66. MAJEWSKA - GLABUS, I. ; ZHUANG, L. ; VETTER, R.; DUSZCZUK, J. Thermal debinding of Fe₃Al - X metal powder

- compacts. **Journal of Materials Science**, v.30, p.6209-6217, 1995.
67. MANGELS, J. A.; TRELA, W. Ceramic componentes by injection moulding. In: MANGELS, J.A. **Advances in Ceramics v.9 Forming of Ceramics**, USA, p. 220-233, 1984.
 68. MANGELS, J. A. Low-Pressure injection moulding. **Ceramic Bulletin**. American Ceramic Society, v.73, n.5, May, 1994.
 69. MANNINEN, H. ; VIROLAINEN, J. Comparison of binders in binder removal. **Powder Metallurgy Conference and Exhibition**. Pittsburgh, PA, May 2 1990.
 70. MARUTA, K. ; MAKIISHI, Y. ; OHTSUBO, H. ; TAKAJO, S. Deformation behavior of metal injection-molded compacts during sintering. **Kawasaki Steel Technical Report**, n.28, June, 1993.
 71. METAL HANDBOOK: Powder Metallurgy. v.7, 9 ed. Ohio, ASM, 1984.
 72. METAL PÓ. Metalurgia do Pó. **Informativo Técnico**. Manual, 24p,1990.
 73. METAL POWDER INDUSTRY FEDERATION – Powder Metallurgy 1999 Facts. <http://www.mpif.org/indusf.html> (11/01/2000).
 74. MILBY,R.V. **Plastics Thechnology**, New York, McGRAW-HILL. Book Company, 1973.
 75. MOSCA, E. Education: A Key factor in the development of PM Technology. **Powder Metallurgy and related High temperature material**. In: International conference on powder metallurgy and related hight temperature materials, Bombay , p.793-800, Dec. 1987.
 76. MUTSUDDY, B. C. Injection moulding research paves way to ceramic engine parts. *Industrial Research & Development*, 76-80, 1983.

77. MUTSUDDY, B. C. Study of Ceramic Injection Moulding Parameters. **Advanced Ceramic Materials**, v.2, n. 3 A , p. 213-218, 1987.
78. MUTSUDDY^a, B. C. Equipment selection for injection molding. **Ceramic Bulletin**, v.68, n.10, p. 1796-1802, 1989.
79. MUTSUDDY^b, B. C. Roles of injection molding in forming shapes from powders. **Industrie Ceramique** n.839, p.436-441, June, 1989.
80. NAJMI, L. A.; LEE , D. Simulation of mold filling for powder injection molding processes. **Advances in powder metallurgy**. Conference and Exhibition, 3th Pittsburgh, P.A., USA, 1990.
81. NAYAR, H.S. Production Sintering Atmospheres. Powder Metallurgy. **Metals Handbook**. 9 ed., p.339-349, ASM 1984.
82. NOGUEIRA, R. E. F. Q.; EDIRISINGHE, M. J.; GAWNE, D.T. Fabrication of engineering ceramics by injection moulding a suspension with optimum powder properties: Part I Processing and microstructure. **Journal of Materials Science**, n.28, p4167-4174, 1993.
83. NOGUEIRA, R. E. F. Q. **Processing and properties of moulded alumina bodies**. Brunel. 116p. Thesis. Department of Materials Technology, Brunel University. 1992.
84. NOGUEIRA, R. E. F. Q. Produção de um guia fio cerâmico por injeção à baixa pressão. Aceito no V Congresso de Engenharia Mecânica NNE 98.
85. PALMER, K. N. Explosion and fire hazards of powders. In: **Principles of Powder Technology**. University of Bradford, UK, Martin Rodes. Cap.11, p.299-334, 1995.
86. PATTERSON, B. R. ; ARIA , C. S. Debinding injection molded materials by melt wicking. **JOM**, v.41, n.8, p.22-24, Aug. 1989.

87. PELTSMAN, I. ; PELTSMAN, M. Low pressure moulding of ceramic materials **Interceram**, v.4, p.56, 1984.
88. PELTSMAN, I. ; PELTSMAN, M. Low pressure injection molding and mould design. **Metal Powder Report**, v.5, p.367-369, 1988.
89. PESHEK, J. R. Machinery for injection moulding of ceramic shapes. IN: MANGELS J. A. Advances in ceramic, v.9 **Forming of Ceramics**, USA, p.234-238, 1984.
90. PINWILL, I. E. ; EDIRISINGHE, M. J. BEVIS, M. J. Fabrication of aluminium components by injection moulding: role of carbon residue caused by removal of the organic vehicle. **Journal of Materials Science Letters**, n.10, p.1107-1110, 1991.
91. PINWILL, I. E. ; EDIRINGHE, M. J. ; BEVIS, M. J. Development of temperature- heating rate diagrams for the pyrolytic removal of binder used for powder injection moulding. **Journal of Material Science**. n.27, p.4381-4388, 1992.
92. REINSHAGEN, J.H.; MASON, R.P. Improved corrosion resistant stainless steel based P/M alloys. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Compiled by J.M. Capus and R.M. German, MPIF, v.5 P/M Steels, p. 373-384, 1992.
93. RISTOW JR., W. O Processo de moldagem por injeção de pós metálicos. **Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais. CBECIMAT**, I. Águas de São Pedro, SP, 11-14 de dez. de 1994,p91-94
94. RHODES, M. J. et al. Principles of powder metallurgy. University of Bradford, UK, 1995.
95. ROSE, J.L.; GERMAN,R. M., HONGER, HOLT, D.D. Advances in ultrasonic inspection techniques for monitoring the powder injection molding process. 6 p. 1996. The Pennsylvania State University. INTERNET. 26/06/1996

96. ROSOF, B. H. The Metal Injection Molding Process Comes of Age. **JOM**. aug. 1989
97. SAKAI, T. State of the art of injection molding of high-performance ceramics. **Advances in Polymer Technology**, v.11, n.1, p.53-67, 1992.
98. SHARON A.; ITZHAK, D. Mechanical properties of sintered austenitic stainless steel effect of silicon addition. **Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials**. Compiled by J.M. Capus and R.M. German, MPIF, v.5 P/M Steels, p. 373-384, 1992.
99. SHAW, H. M.; HUTTON, T. J. ; EDIRISINGHE, M. J. On the formation of porosity during removal of organic vehicle from injection-moulded ceramic bodies. **Journal of Materials Science Letters** v.11, p.1075-1077, 1992.
100. SHAW^a, H. M.; EDIRISINGHE, M. J. Binder degradation and redistribution during pyrolysis of ceramic injection mouldings. **Journal of Materials Science Letters** v.12, p. 1227-1230, 1993.
101. SHAW^b, H. M. ; EDIRISINGHE, M. J. Removal of binder from ceramic bodies fabricated using plastic forming methods. **American Ceramic Society Bulletin**. v.72, n.9, p. 94-99, Sept. 1993.
102. SHUKLA , V. N. ; HILL , D. C. Binder evolution from powder compacts: thermal profile for injection molded articles. **Journal American Ceramic Society** v.10, n.72, p. 1797-1803, 1989.
103. SILVA, A. L. C. ; MEI, P. R. Aços e ligas especiais. **Eletrometal S.A. Metais Especiais**, Cap.6, 1988.
104. SINTER METALS, Inc. – A Market and Technology Leader <http://www.sinter-metals.com> (23/07/1997).
105. STEDMAN, S. J.; EVANS, J. R. G. Rheology of composite ceramic injection suspensions. **Journal of Materials Science**, v.25, p.1833-1841, 1990.

106. TELLES, P. C. S. *Materiais para equipamentos de processo*. 5. ed. Rio de Janeiro, Interciência, 1994.
107. THUMMLER, F.; OBERACKER, R. An introduction to powder metallurgy. London: Institute of Materials, 1993.
108. UPADHYAYA, D. D. ; ROY, S. K. ; GUPTA, C. K. FOTEDAR, R. K. ; ARYA, R. N. Ceramics fabrication by injection moulding technique-selection of material and fabrication experience. **International Conference on Powder Metallurgy and related High Tempertare Materials**, 4, Bombay, 159-169, 1989.
109. URAM, S. Injection molding of ceramic components provides flexibility in metal casting and forming. **Industrial Heating**, v.54, n.4, p. 42-43, 1987.
110. VAN VLACK. Lawrence H. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo, Blucher, 1988. 427p.
111. YANG, M. J.; ATRE, S. V.; GERMAN, R. M. Wax-based and peg-based binder system development for metal and ceramic powders. **Avances in Powder Metallurgy and Particulate Materials**, Metal Powder Industries Federation, p. 19.225-19.232, 1996.
112. YOKOY^a, H.; HAYASHI, T. ; TODA, K. ; MORIKITA, N. Direct observation of jetting phenomena under a high injection pressure by using a prismatic-glass inserted mold. **ANTEC**, p.329-333, 1988.
113. YOKOI^e, H.; MURATA, Y.; TSUKAKOSHI, H. Mesurement of melt temperature profiles during filling and packing proceesses using a new integrated thermocouple sensor. **ANTEC**, p.1875-1881, 1992.
114. WHITE, D. G. Powder metallurgy in 1995. **Advanced Materials & Process**, v.8, p. 49-51, Aug. 1995.
115. WIECH, R. E. Manufacture of parts from particulate material. **United Stated Patent** n 4.197.118, Apr.8, 1980.

116. WIECH , R. E. Method and means for removing binder from a green body. **United Stated Patent**, n. 4.305.756, Dec.,15, 1981.
117. WOODTHORPE , J. ; EDIRISINGHE, M. J. ; EVANS, J. R. G. Properties of ceramic injection molding formulations , part3 Polymer Removal. **Journal of Material Science**, v.24, n.3, p.1038-1048, 1989.
118. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE – Powder Metallurgy Research Center
<http://www.wpi.edu/Academics/Research/PMRC/industry.html#pm>
(11/01/2000).
119. WREGE, P. A. S. **Projeto de Moldes para injeção de massas cerâmicas a baixa pressão**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1994
120. WRIGHT, M.; HUGHES, L. J.; GRESSEL, S. H. Reological Characterization of Feedstocks for Metal Injection Molding. **Journal of Materials Engineering and Performance**. v. 3, n.2, p.300-306, 1994.