

PROCESSO DE

moldagem de pós metálicos por injeção – uma revisão

PATRIK O. BONALDI*
LÍRIO SCHAEFFER**

A moldagem por injeção de pós metálicos vem se tornando um processo altamente atrativo, por aliar a versatilidade e a produtividade da moldagem por injeção de plásticos com as propriedades inerentes aos materiais metálicos, sendo uma técnica na área da metalurgia do pó. O reflexo do crescimento desse processo pode ser observado pelo aumento do número de publicações e patentes relacionados com aplicações, como, por exemplo, implantes ósseos, brackets ortodônticos, componentes de instrumentos cirúrgicos, armas de fogo e peças automotivas. Este trabalho tem como objetivo descrever todas as etapas do processo de Moldagem de Pós Metálicos por Injeção (Metal Injection Moulding - MIM), como preparação de carga injetável, moldagem por injeção, extração de aglutinantes (química e térmica) e sinterização. Juntamente com suas variações de parâmetros e influências

O processo de moldagem por injeção de pós metálicos, conhecido no inglês por MIM (Metal Injection Moulding), vem crescendo devido a vários fatores, entre eles, produção de peças com geometrias complexas, até de dimensão na ordem de micrometros, conhecido como Micro Powder Injection Molding (μ PIM) [1], alta produtividade, produção de peças em séries, alta reprodutibilidade, obtenção de microestrutura uniforme e sem necessidade de uma etapa de acabamento. De acordo com o relatório da Business Communications Co., Inc. [2], o mercado mundial de MIM foi estimado em 382 milhões de dólares em 2004. Este mercado está projetado para crescer em uma taxa de crescimento anual média de 8,4% e deverá alcançar 571 milhões de dólares em 2009. A moldagem de pós por injeção é uma tecnologia avançada do processo de metalurgia do pó e as limitações que existem na compactação de peças com geometrias complexas. A metalurgia do pó convencional consiste basicamente em

compactação do pó na geometria desejada, conforme o molde e posterior sinterização (densificação). A figura 1 mostra uma relação entre alguns processos, avaliando a relação entre quantidade de peça produzida e sua complexidade geométrica.

O processo de moldagem de pós metálicos por injeção embora seja muito utilizado em larga escala industrial em alguns países, ainda não é muito dominada no Brasil. Alguns exemplos de peças produzidas por MIM são apresentadas pela figura 2.

A utilização da técnica de moldagem por injeção teve início há muitos anos, com a produção de plásticos, proporcionando facilidades na obtenção de peças de tamanho pequeno e formatos complexos. Na década de 20 combinou-se essa técnica com processamento de pós cerâmicos. Já na segunda grande guerra a técnica se estendeu aos pós metálicos [7]. O processo de MIM está esquematizado na figura 3, onde apresenta as etapas de mistura entre o pó metálico e o ligante, ou aglutinante, formando a



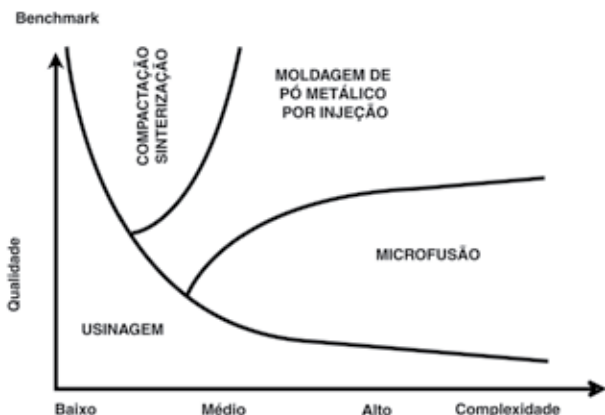


Figura 1 - Relação entre quantidade de peça produzida-complexidade geométrica em relação à técnica utilizada [3]

carga injetável, peletização ou granulação, a moldagem por injeção, extração do aglutinante, química e térmica e a sinterização. O nível de acabamento superficial apresentado é alto, com tolerâncias dimensionais de aproximadamente 0,3% [8] e densidade de peças finais de aproximadamente 97% da densidade picnométrica do material [7].

a partir de cera ou plástico, materiais que possuem baixas temperaturas de fusão. Despeja-se uma lama fluida ao redor do modelo padrão, que se estabelece e sedimenta para formar um molde ou revestimento sólido. O molde é aquecido, deixando para trás uma cavidade de molde que possui o formato desejado [9].

Todas essas etapas serão descritas neste trabalho, discutindo sua importância e influência na variação de parâmetros.

A microfusão, algumas vezes também chamada de fundição por cera perdida é um processo que compete diretamente com o processo MIM, pois também tem como características a produção de peças de geometria complexas e pequenas, neste processo o modelo padrão é feito

Tabela 1 - Comparação entre os processo de fabricação Microfusão x MIM

Propriedades	Microfusão	MIM
Φ mínimo de furo	2mm	0,4mm
Profundidade Máx. furo cego de Φ 2mm	2mm	20mm
Espessura mín. de parede	2mm	<1mm
Espessura máx. de parede	Ilimitado	5mm
Tolerância em uma dimensão de 14mm	+/- 0,2mm	+/- 0,06mm
Rugosidade superficial Ra	5 μm	1 μm

Na tabela 1 é apresentada uma comparação de algumas especificações entre os dois processos.

PRODUÇÃO DE PÓ METÁLICO

Uma larga variedade de técnicas de produção de pós são aplicadas à moldagem de pós por injeção. A técnica utilizada influencia diretamente no pó, como, tamanho, forma, microestrutura, composição química e custo do pó. A tabela 2 apresenta uma comparação entre algumas técnicas de produção de pó metálico. Algumas características do pó devem ser levadas em conta, as características de um pó ideal para moldagem por injeção podem ser descritas na tabela 3. O tamanho em micrometros (μm) indica o diâmetro médio das partículas.

PREPARAÇÃO CARGA INJETÁVEL (feedstock)

A mistura física do pó metálico e aglutinante resulta na carga injetável ou feedstock. O aglutinante serve de veículo temporário, permitindo a injeção homogênea do pó dentro de uma forma desejada. Cinco fatores são atribuídos ao feedstock, característica do pó, composição do ligante, relação pó/ligante, método de mistura e peletização. As propriedades reológicas das cargas influenciam muito na injeção, como principalmente a viscosidade, elasticidade e plasticidade. Alguns exemplos de feedstock e propriedades são apresentadas na tabela 4. As ceras resultam da união de ácidos graxos de peso molecular elevado, com álcoois, também de peso molecular



Figura 2 - Exemplo de peças produzidas pelo processo MIM [4,5,6]

Tabela 2 - Comparação de técnicas de produção de pequenas partículas [11]

Técnica	Tamanho, μm	Forma	Material	Custo
Atomização a gás	5-40	Esférica	Ligas	Alto
Atomização a água	6-40	Arredondada	Ligas	Moderado
Atomização centrífuga	25-60	Esférica	Ligas	Alto
Atomização a plasma	2-40	Esférica	Ligas	Alto
Carbonyl	0,2-10	Esférica	Elementos	Moderado
Oxi-redução	1-10	Poligonal	Elementos	Moderado
Precipitação	0,1-3	Poligonal	Compostos	Baixo
Moagem	0,1-400	Irregular	Materiais frágeis	Moderado

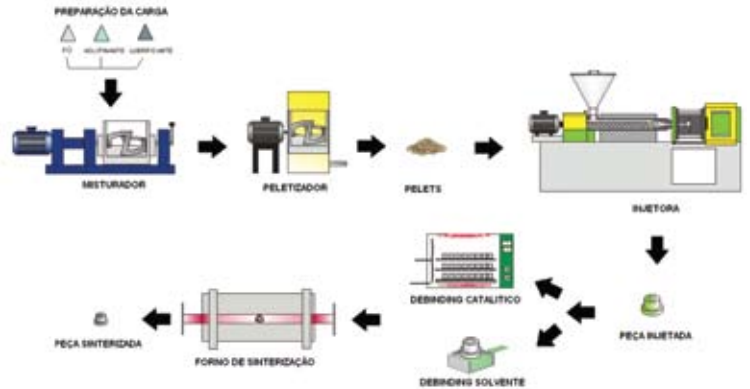


Figura 3 - Esquema do processo de moldagem de pós metálicos por injeção [10]

elevado. As ceras são muito utilizadas em MIM, por apresentar pequenos tamanhos de moléculas, características termoplásticas e baixa temperatura de fusão. Os polímeros são macro moléculas, podendo ser termoplásticos ou termofixos, sendo os termoplásticos mais utilizados. Os aditivos podem ser colocados na carga para alterar alguma de suas propriedades, como, por exemplo, melhorar lubrificação do molde, viscosidade, molhabilidade do pó, ou facilitar a remoção de aglutinantes. Um dos aditivos mais utilizados é o ácido esteárico, pois reduz o ângulo de contato pelo abaixamento da energia superficial pó/aglutinante, além de lubrificar as paredes do molde [7].

EXTRAÇÃO DE AGLUTINANTE (debinding)

Extração do ligante é a etapa chave do processamento de peças moldadas por injeção [12], pois remover o aglutinante sem afetar a forma final da peça é um processo

muito delicado, sendo uma grande fonte de defeitos. Já que o aglutinante sustenta a união das partículas de pó, determinando o sucesso ou insucesso da peça final. Existem diversas técnicas para extração do aglutinante, dependendo de qual componente do ligante se deseja extrair, consistindo em processos térmicos e químicos (por solvente), podendo coexistir no processo de fabricação. A extração térmica consiste na remoção de ligante através da ação da temperatura. Envolvem os mecanismos de extração controlada por difusão, por permeação e extração térmica de aglomerantes no estado líquido. A extração por solvente envolve imersão da peça moldada em um fluido que dissolve algum componente do sistema aglutinante, deixando uma estrutura de poros abertos, facilitando a saída de outros componentes na extração térmica, podendo ainda ser assistida termicamente. A extração química das peças pode variar com sua geometria, e a cinética de remoção do ligante esta é diretamente proporcional

à temperatura [13]. A figura 4 mostra esquematicamente processo de extração do sistema aglutinante.

SINTERIZAÇÃO

Sinterização é a etapa de densificação da peça fabricada, onde serão fornecidas as propriedades mecânicas. Este processo consiste em transporte de matéria, ativado termicamente, em uma massa de pós ou um compactado poroso, resultando na diminuição da superfície específica livre pelo crescimento de contatos entre as partículas, redução do volume e alteração da geometria dos poros [12]. Do ponto de vista teórico, como uma transformação de estado termodinâmico, espontânea e conseqüentemente irreversível. Ocorrendo uma diminuição da energia livre do sistema. A sinterização pode ser dividida em 3 estágios, esquematizado na figura 5.

O primeiro é a formação de "necks", a matéria torna-se contínua na região dos contatos, ocorrendo pouca retração. O se-

Tabela 3 - Características do pó e sua influência [11]

	Vantagens	Desvantagens
Tamanho de partícula pequena	Rápida sinterização, menor defeitos de moldagem, retenção de forma	Extração lenta, maior contaminação, maior contração, alta viscosidade, maior aglomeração
Forma esférica	Alta compactação, baixa viscosidade, melhor fluxo	Baixa resistência, alto custo, desmoronamento na extração
Larga distribuição	Alta compactação, menor contração na sinterização	Menor qualidade, microestrutura heterogênea, extração lenta

Tabela 4 - Exemplos de feedstock e suas propriedades [11]

Pó	Aglutinante (wt%)	Sólido (vol.%)	Densidade (g/cm^3)	Temperatura de Moldagem ($^{\circ}\text{C}$)	Viscosidade (Pa.s)	Resistência (MPa)
4 μm Fe	60CP-40PE	58	4,90	120	35	5
4 μm Fe	55CP-45PP-5AE	61	5,12	150	19	22
4 μm Fe-Ni	90PA-10PE	58	4,52	180	190	20
2,5 μm Mo	60CP-35PP-5AE	58	5,97	113	200	7
10 μm inox.	55CP-45PP-5AE	67	5,60	130	14	-
15 μm inox.	90PA-10PE	62	5,33	190	80	20
8 μm W	65CP-30PP-5AE	56	11,22	142	-	5

CP = cera de parafina, PE = Polietileno, PP = polipropileno, PA = poliacetil, AE = ácido esteárico

"Qualidade é o nosso principal compromisso"

Projetos para
Trânsito e Transporte

FUNCIONAIS • BÁSICOS • EXECUTIVOS

INFRA-ESTRUTURA

SINALIZAÇÃO

PESQUISAS DE TRÁFEGO

SEGURANÇA VIÁRIA

TRAFFIC CALMING

POLOS GERADORES DE TRÁFEGO

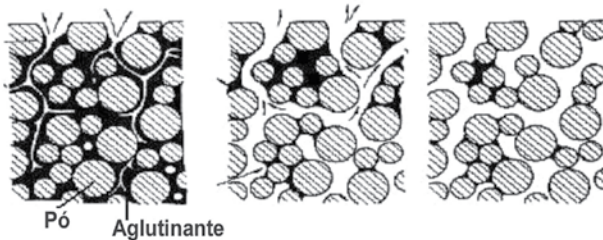


Figura 4 - Remoção de sistema aglutinante

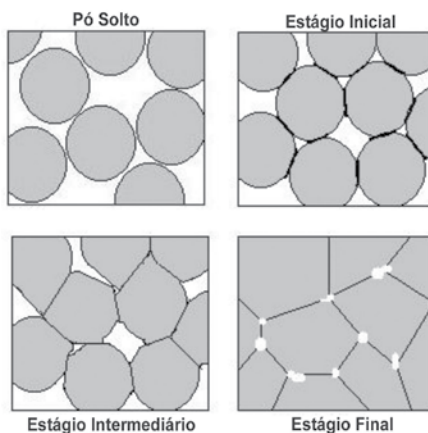


Figura 5 - Etapas de sinterização [11]

gundo, estágio intermediário, as partículas perdem gradativamente sua identidade, aumentando a relação raio do neck/raio da partícula, apresentando duas fases contínuas, fase sólida e vazios (poros interligados). E por fim o estágio final, onde ocorre o isolamento e arredondamento dos poros, com densificação entre 90% e 95% teórico.

CONCLUSÃO

O processo de MIM é atualmente utilizado na fabricação de peças com pequenas dimensões e geometrias complexas, como, ortodontia, armas de fogo, componentes eletrônicos, instrumentos

médicos, e outros. Que possui vantagens sobre o processo de microfusão. Um dos materiais mais utilizados no processo MIM com o objetivo de pesquisar aplicações industriais devido às propriedades mecânicas e resistência à corrosão, é o aço inoxidável 316L. Este material, entretanto, apresenta dificuldade na retenção de forma do injetado, principalmente quando o pó é obtido por atomização a gás. O uso desse material justifica-se por sua melhor combinação entre custo, propriedades mecânicas, resistência à corrosão, biocompatibilidade e trabalhabilidade. 🍷

* **Patrik Bonaldi** é engenheiro de materiais pela UFSC, mestrando da UFRGS no programa de pós graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, engenheiro pesquisador, bolsista CNPq
E-mail: patrik.bonaldi@ufrgs.br

** **Lirio Schaeffer** é engenheiro mecânico pela UFRGS, possui mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS e doutorado em Conformação Mecânica, atualmente é consultor do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e professor titular - Departamento de Metalurgia

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZAUNER, R. - "Micro powder injection moulding" Materials Research, Austria, 2006.
 [2] <http://www.bccresearch.com/editors/RGB-306.html>
 [3] http://www.investmentcasting.microfond.it/MIM_investment_casting_metal_injection_molding.htm
 [4] <http://www.metalinject.com/images/photodebut.jpg>
 [5] <http://www.ortho-direct.com/mcart/images/artista018mbt.jpg>
 [6] <http://www.alberox.com/images/mim.jpg>
 [7] REI, M. - Estudo de Propriedades de Cargas Moldáveis por Injeção de Pós de Aço Inoxidável 316-L. Dissertação Mestrado, Porto Alegre (RS), 1999.
 [8] MACHADO, C.F. - Aços inoxidáveis sinterizados, dissertação de mestrado, UFRGS, 1996, P.1;
 [9] CALLISTER, WILLIAM D. - Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª Ed. LTC, Rio de Janeiro (RJ), 2002.
 [10] ASM AMERICAN SOCIETY FOR METALS - Metals Handbook, v. 7, Powder Metal Technologies and Applications, 1998.
 [11] GERMAN, RANDALL M. - Injection molding of metals and ceramics. Princeton, 1997.
 [12] KLEIN, A.N. - Materiais Sinterizados: técnica, produtos e aplicações. Apostila de aula.
 [13] OLIVEIRA, R.V.B ET. AL. - "Moldagem por Injeção de Pós Cerâmicos: Remoção da Parafina e do Polipropileno Utilizados como Veículo Orgânico" Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, nº 3, p. 150-155, 2004.