

## **UMA ABORDAGEM GLOBAL SOBRE O PROCESSO DE MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO**

E. Harima

Departamento Acadêmico de Formação de Professores – CEFET-RN  
Av. Salgado Filho, 1159 Morro Branco CEP 59.000-000 Natal-RN  
E-mail: eharima@cefetrn.br

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma abordagem global do processo de moldagem de pós por injeção (MPI). A moldagem de pós por injeção é um processo de fabricação de materiais particulados que utiliza polímeros como meio de transporte. Nesse processo, a mistura de pós cerâmicos ou metálicos com 50-60% de volume de polímeros (ligante) é aquecida numa máquina injetora para adquirir fluidez, e em seguida, injetada no molde e resfriada para adquirir resistência suficiente para o manuseio. A peça injetada é submetida à remoção de ligante e depois sinterizada. Esse método de fabricação tem muitas vantagens em relação aos demais processos convencionais de fabricação, sendo principal a possibilidade de produzir peças com grande variedade de formas e alta precisão dimensional do produto final. A remoção de ligante é a etapa mais demorada e também a mais crítica do processo MPI, devido a possibilidade de formação de defeitos. Atualmente, a tecnologia MPI constitui dois terços do campo de aplicação industrial e tem-se observado um crescimento significativo nos últimos anos, principalmente na Europa e na Ásia, que tem, respectivamente, 30% e 21% do comércio mundial.

**PALAVRAS-CHAVE:** moldagem por injeção; processo de fabricação; polímeros; remoção de ligante.

## 1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho será abordado fundamentos indispensáveis para compreensão do processo de moldagem de pós por injeção (MPI). A MPI é um processo de fabricação que permite produzir peças com geometrias complexas, empregando polímeros com alta concentração de materiais particulados.

O processo MPI é constituído basicamente por cinco etapas: (i) a seleção de matérias-primas - consiste na escolha do tipo de pó e de ligante, que dependerá do método usado para a remoção de ligante e da aplicação do produto final; (ii) a mistura - tem a finalidade básica de promover a dispersão do pó cerâmico no meio polimérico, para obter uma mistura homogênea; (iii) a moldagem - consiste na injeção da mistura pó-ligante aquecida dentro da cavidade do molde, onde adquire a forma do molde; (iv) a remoção de ligante - etapa anterior a sinterização, que consiste em remover o ligante empregando-se diversas técnicas e (v) a sinterização - em que ocorre a consolidação das partículas para garantir a forma e a resistência mecânica desejada do produto final. Essas etapas estão esquematizadas na Figura 1.

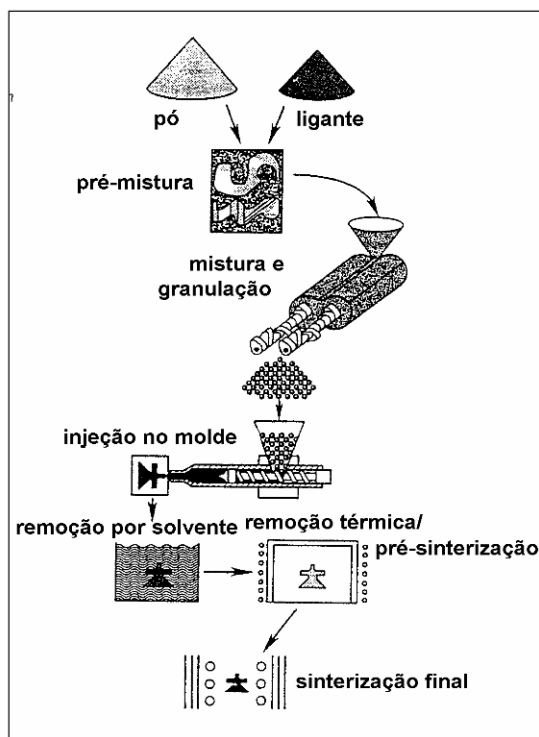


Figura 1: Esquema do processo de moldagem de pós por injeção (German, 1993)

A moldagem por injeção tem muitas vantagens em relação aos demais processos convencionais de fabricação, porém, a principal é a possibilidade de produzir peças de grande variedade de formas com alta produtividade. A outra grande vantagem é a precisão dimensional do produto final. Atualmente, a maior parte da produção industrial consegue manter uma tolerância dimensional dentro da faixa de 0,3%; entretanto, é possível um excelente controle dimensional, podendo atingir até 0,05% em peças de geometria relativamente simples (Ter Maat e Wohlfromm, 1997).

Uma das grandes limitações desse processo está relacionada com a espessura da peça injetada. Peças de seção muito fina, menor que 2 mm, são muito difíceis de produzir porque o rápido resfriamento do material de injeção dificulta o preenchimento da cavidade do molde (Huang e Tai, 2001). Por outro lado, paredes espessas trazem dificuldades principalmente na etapa de moldagem e na remoção de ligante (Krug et al, 1999), uma vez que o tempo de remoção depende do quadrado da espessura da parede (German, 1987). Por isso, as peças fabricadas por esse processo têm, normalmente, menos que 10 mm de espessura. No entanto, para algumas cerâmicas refratárias, é possível fabricar peças cuja espessura varia de 0,1 mm a 1 m (German, 1993).

Embora a moldagem de pós por injeção seja uma tecnologia conhecida há mais de 70 anos, o êxito na área comercial é ainda recente. Atualmente, a tecnologia MPI constitui dois terços do campo de aplicação industrial e tem observado um crescimento significativo nos últimos três anos, principalmente na Europa, mas, a América do Norte é ainda a

maior região de produção, com 49% de venda. A Europa e a Ásia têm, respectivamente, 30% e 21% do comércio mundial de MPI (German e Cornwall, 2001).

Segundo German e Cornwall (1997), para os próximos dez anos o crescimento do mercado mundial nesse setor será de aproximadamente 32% ao ano. Em termos de vendas, a previsão para o ano de 2010 é atingir a marca de 2 a 2,4 bilhões de dólares (German e Cornwall, 2001).

Atualmente, apesar de uma grande variedade de materiais disponíveis para fabricação de peças via MPI, os mais utilizados são aço inox, alumina, sílica, aço e várias ligas para materiais magnéticos e eletrônicos. Esses materiais são empregados na produção de peças tais como aparelhos ortodônticos, ferramentas especiais para microcirurgia, guias-fios, bicos injetores, sensores de oxigênio, micro-rolamentos, palhetas de turbinas, cabeças de impressora, componentes para armas de fogo, etc.

Recentemente há interesse especial para fabricação de peças com alto valor estético, incluindo itens esportivos como medalhas e medalhões, olhos de vidro, jóias, relógios de pulso e pulseiras de relógio e frascos de cosméticos. Esses produtos apresentam excelente acabamento superficial quando fabricados pela tecnologia de moldagem de pós por injeção. A Figura 2 mostra dois relógios de pulso fabricados por MPI (esquerda) e macho cerâmico usado para fabricar bico injetor de motor a diesel (direita).

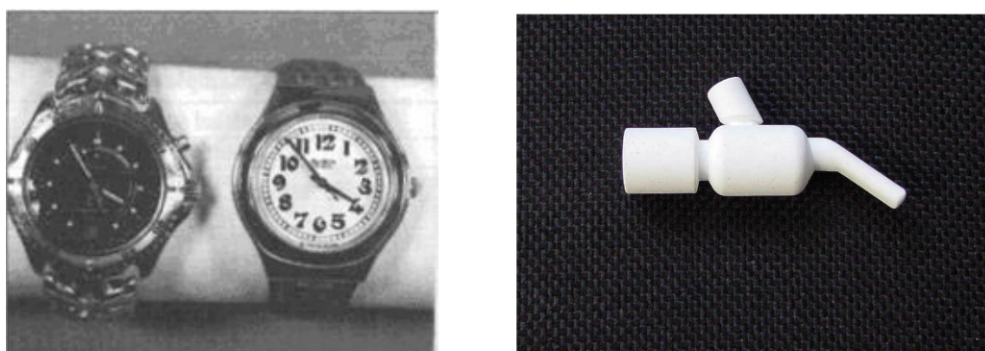


Figura 2: Mostra dois relógios de pulso fabricados por MPI (esquerda) e macho cerâmico usado para fabricar bico injetor de motor a diesel (direita)

Dentre vários produtos cerâmicos produzidos por injeção, o macho cerâmico tem sido apontado como o maior mercado para os próximos anos. Os machos cerâmicos, que são feitos de alumina, sílica ou zircônia, são usados principalmente pelas indústrias que trabalham com a moldagem por transferência de metais fundidos. A direita da Figura 3 mostra um macho cerâmico usado para fabricar bico.

## 2 O PROCESSO DE MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO

A seguir, apresentam-se, com maior detalhe, todas as etapas que envolvem o processo de moldagem de pós por injeção, bem como os defeitos gerados durante o processo.

### 2.1 Seleção de Materiais

#### 2.1.1 Materiais particulados (pós)

As características do pó têm uma forte influência sobre a densidade da peça moldada, resistência mecânica do corpo após a remoção de ligante e sobre a viscosidade do material de injeção (Edirisinghe e Evans, 1986a). Pós muito fino levam a aglomeração de partículas, que dificulta o fluxo do material dentro do molde e reduz a densidade do sinterizado (Mutsuddy, 1991). Além disso, partículas muito pequenas trazem algumas consequências indesejáveis, tais como dificuldade na remoção de ligante e maior risco de surgimento de defeitos (Evans e Edirisinghe, 1991). Por outro lado, o uso de pó grosso reduz a viscosidade da mistura (Agarwala et al, 1992), acelera a remoção de ligante (German, 1987) e também minimiza a formação de defeitos. O tamanho de partícula usado no processo MPI geralmente fica na faixa de 0,1 a 20  $\mu\text{m}$  (German e Bose, 1997).

O pó com a forma aproximadamente esférica é mais satisfatório para todas as etapas do processo (Nogueira et al, 1992). Partículas de superfícies ásperas e de forma irregular reduzem a eficiência de empacotamento e também dificultam a moldagem. Por outro lado, partículas lisas e esféricas apresentam baixa fricção interparticular e geram dificuldades na retenção de forma da peça durante a remoção de ligante (Kipphut e German, 1991).

Outro fator que influencia o processamento de materiais via MPI é a distribuição de tamanho de partículas, que afeta principalmente a viscosidade da mistura. Uma larga distribuição de tamanho de partículas é preferida para o processamento MPI, pois proporciona maior densidade de empacotamento, permitindo incorporação de maior volume de pó cerâmico no meio polimérico (Mangels e Williams, 1983). Entretanto, a larga distribuição tende a dificultar a remoção do ligante devido ao alto grau de empacotamento da peça injetada.

### **2.1.2 Formulação de ligante**

De modo geral, o ligante usado na MPI tem três funções básicas: mudar a reologia da mistura, oferecer resistência ao injetado e deve ser passível de remoção, sem a introdução de defeitos na peça. Para conferir essas propriedades, geralmente o ligante contém pelo menos três componentes: (i) um polímero "estrutural" que dá resistência e mantém a forma da peça até o início da sinterização; (ii) uma fase orgânica de "preenchimento" que é facilmente removível na primeira fase de remoção e (iii) um surfactante que acopla o ligante à superfície do pó. Frequentemente, o surfactante pode também servir como um lubrificante, reduzindo o atrito entre o pó e as paredes do equipamento, ou como um plastificante, melhorando a dispersão do pó no ligante durante a mistura (Edirisinghe, 1991). Assim, o ligante, na realidade, é um sistema composto de vários componentes, cada um com funções específicas.

Os ligantes mais utilizados na MPI são os termoplásticos e à base de água. Os ligantes termoplásticos são formados por polímeros lineares com ligações secundárias entre os grupos funcionais que amolecem sob aquecimento e endurecem ao serem resfriados, independentemente do número de ciclos. Nessa categoria, pode-se destacar os seguintes polímeros, pelo maior número de citações na literatura: polietileno de alta e de baixa densidade (PEAD e PEBD), polipropileno atático e isotático (PPA e PPI), poliestireno (PS), polioximetileno e os copolímeros, como o etileno-acetato de vinila (EVA). Também se incluem nessa categoria as ceras e as parafinas.

O sistema de ligante à base de água é usado essencialmente para fabricação de peças cerâmicas. Apesar desses polímeros serem pouco usados no setor industrial, eles têm atraído algumas atenções recentemente, principalmente porque, na remoção, não é usado solvente tóxico e nem inflamável e o equipamento de remoção é muito simples. Os ligantes solúveis em água são: álcool polivinílico, polietileno-glicol, Agar, agarose, hidroxipropil-celulose, etc.

Dentre os sistemas descritos, o mais utilizado industrialmente para preparar misturas para moldagem de materiais particulados é, indiscutivelmente, o sistema de ligante termoplástico como o polipropileno, polietileno ou EVA combinado com a parafina ou a cera de carnaúba.

## **2.2 Reologia da Mistura**

A análise reológica da mistura é fundamental porque é ela que vai orientar quanto as condições de moldagem da mistura na cavidade do molde. A propriedade reológica mais importante da mistura para injeção é a viscosidade. O material deve apresentar uma viscosidade abaixo de  $10^3$  Pa.s (Mutsuddy, 1983), preferencialmente possuir uma consistência parecida com a pasta de dente durante a injeção, e endurecer quando resfriado na cavidade do molde. A viscosidade de uma mistura depende principalmente da temperatura, da carga cerâmica e da taxa de cisalhamento.

### **2.2.1 Influência da temperatura**

O controle da temperatura do material de injeção, tanto durante a mistura quanto durante o preenchimento do molde, é importante para o êxito da MPI. Temperaturas muito acima da temperatura de fusão de um dos componentes de ligante podem degradar os componentes de menor estabilidade térmica, ao passo que, temperaturas muito baixas impedem o fluxo do material no molde devido à sua alta consistência.

Os polímeros do grupo termoplástico são muito sensíveis à temperatura. Em altas temperaturas apresentam uma viscosidade muito baixa, ao passo que, à temperatura ambiente são normalmente rígidos. O material de injeção apresenta propriedade reológica similar àquela da mistura de polímeros, porém, com alguns parâmetros de correção (German e Bose, 1997).

Para o material de injeção, a dependência da viscosidade em relação à temperatura deverá ser tão baixa quanto possível na região logo abaixo da temperatura de moldagem (Edirisinghe e Evans, 1987).

### 2.2.2 Influência do pó

A viscosidade da mistura é fortemente influenciada pela quantidade de pó na matriz polimérica. A viscosidade tende ao infinito quando a carga de pó aproxima-se do valor crítico. O valor da carga crítica depende fortemente do tipo de ligante, do pó usado e das condições de mistura (Paul Lin e German, 1994). A Figura 3 mostra as curvas de viscosidade variando em função da carga de pó para dois tipos de materiais.

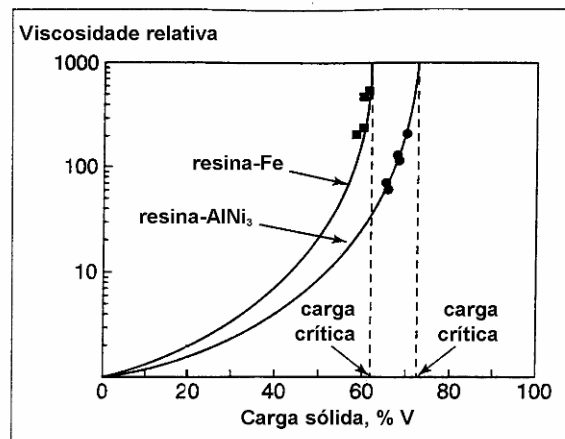


Figura 3: Variação da viscosidade com teor de carga de pó na mistura para dois materiais distintos (German e Bose, 1997)

Vários modelos têm sido propostos para analisar o comportamento da viscosidade em função da carga de pó (Mooney, 1951; Farris, 1968 e Chong et al, 1971). Todos os modelos apresentados confirmaram que a viscosidade da suspensão aumenta assintoticamente para fração de volume de carga de pó maior que 0,5 (Mooney, 1951, Mutsuddy, 1983).

Estudos posteriores mostraram que as características do pó também afetam a viscosidade da mistura. Segundo Farris (1968), a viscosidade de uma suspensão diminui quando aumenta a distribuição de tamanhos de partículas, segundo a equação 1:

$$\eta_r = (1 - V)^p \quad (1)$$

onde  $p$  é uma constante que depende da distribuição de tamanho de partículas.

O tamanho e a forma do pó também influenciam diretamente a viscosidade da suspensão. A viscosidade aumenta com o decréscimo de tamanho de partícula, enquanto que um aumento substancial é observado a medida que a morfologia das partículas se desvia da esfericidade (Agarwala et al, 1992).

### 2.2.3 Influência da taxa de cisalhamento

A viscosidade da maioria dos materiais de injeção apresenta um comportamento pseudoplástico, isto é, a viscosidade decresce com o aumento da taxa de cisalhamento. A Figura 4 mostra a viscosidade variando com a taxa de cisalhamento uma mistura contendo 64% de volume de Fe disperso em uma resina.

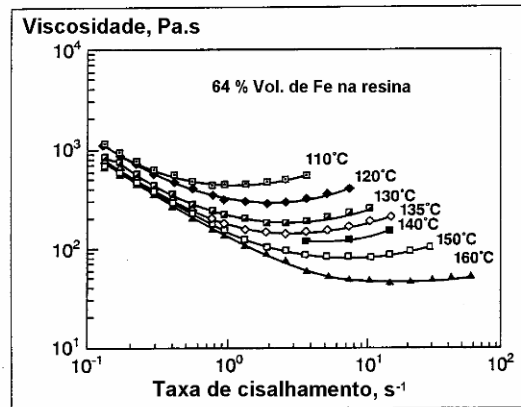


Figura 4: Variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento (German e Bose, 1997)

## 2.3 Preparação de Mistura para Injeção

Após a seleção do pó e do ligante apropriado, o próximo passo é a preparação de uma mistura para ser injetada. A preparação do material de injeção passa por três etapas importantes: dosificação de pó cerâmico na mistura, processo de mistura e granulação.

### 2.3.1 Dosificação de pó cerâmico na mistura

O limite máximo de carga cerâmica admissível dentro da matriz polimérica, acima do qual a viscosidade tende ao infinito, é denominado de carga crítica. Na carga crítica, as partículas estão tão juntas quanto possível e com os espaços interparticulares totalmente preenchidos com ligante (Markhoff et al, 1986). Quando a carga sólida ultrapassa o valor crítico, começa surgir falha de preenchimento, que por sua vez, propicia o surgimento de força capilar entre as partículas quando submetidas às tensões de cisalhamento. Isso explica o excessivo aumento da viscosidade. Por outro lado, se a quantidade de ligante for excessiva poderá dificultar a retenção de forma durante a remoção de ligante, uma vez que as partículas não estão bem imobilizadas. Assim, o material de injeção deve ser preparado com uma quantidade de carga cerâmica que varia de 4-6% abaixo do nível crítico (German, 1994).

A determinação de carga crítica é geralmente feita em um misturador acoplado com torque reométrico. A Figura 5 mostra comportamento do torque durante a mistura. O pó cerâmico deve ser adicionado progressivamente para não forçar o equipamento. A cada adição de carga de pó observa-se um aumento rápido do torque, proveniente da desaglomeração de partículas. À medida que a mistura se efetiva, a tendência do torque é estabilizar num certo valor. Na carga crítica, o torque reométrico apresenta dois comportamentos típicos na carga crítica: um aumento súbito do torque e a oscilação do seu valor.

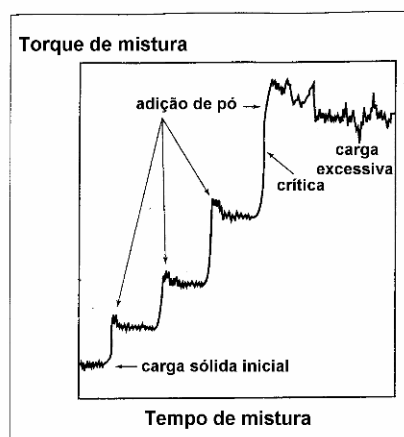


Figura 5: Variação do torque com o tempo de mistura (German e Bose, 1997)

### 2.3.2 A mistura de pó com o ligante

O processo de mistura tem como finalidade: dispersar os aglomerados do pó, recobrir as partículas com camada fina de ligante e obter uma massa homogênea livre de poros. Uma mistura bem homogênea reduz o problema de separação pó-ligante e garante um bom fluxo do material dentro da cavidade do molde (German, 1994), ao passo que, um material pobremente misturado acarreta principalmente a distorção da peça durante a sinterização (Edirisinghe e Evans, 1986c).

Para conseguir homogeneidade adequada do pó e ligante, necessariamente a mistura terá que ser realizada em temperaturas nas quais o ligante fique fundido. Raman et al (1993) mostraram que a dispersão do pó no ligante é melhorada quando a mistura é realizada em temperaturas menores, uma vez que nestas condições tem-se maior cisalhamento em consequência do aumento da viscosidade da suspensão. Isso resulta na quebra mais eficiente de aglomerados.

A reometria capilar é a melhor técnica para avaliar o grau de homogeneidade de uma mistura. Essa técnica consiste em passar a mistura (pó-ligante) fundida através de um tubo capilar, onde a pressão é medida por um transdutor. Para uma suspensão pobremente misturada, o reômetro capilar registra uma pressão maior e com grandes flutuações durante o ensaio (traçado superior do gráfico da Figura 8). Para uma mistura homogênea, essa pressão, além de ser menor, praticamente fica estável no decorrer do tempo (traçado inferior do gráfico da Figura 6).

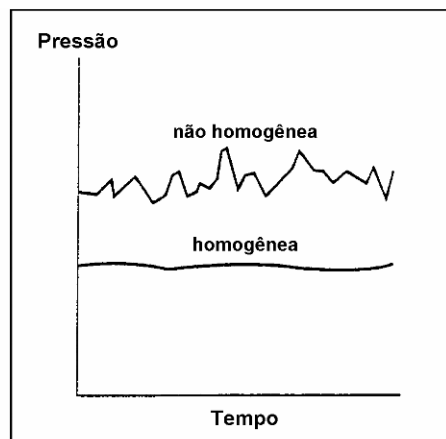


Figura 6: Comportamento da pressão durante o ensaio reológico

Os equipamentos usados para misturar pó cerâmico com o ligante incluem os de baixa intensidade de mistura, como o misturador de duplo rotor e a extrusora de rosca simples, e os misturadores de alto cisalhamento, como o moinho de duplo rolo e a extrusora de dupla rosca (Edirisinghe e Evans, 1986b). O emprego do último equipamento consegue melhor homogeneidade da mistura, uma vez que o material é forçado a passar através de uma estreita passagem, onde é submetido às altas taxas de cisalhamento.

### 2.3.3 Granulação

A granulação da mistura tem como finalidade básica: facilitar o transporte e carregamento na unidade injetora. Geralmente ele é preparado pela granulação da mistura a frio por um granulador tipo faca, conforme ilustra a Figura 7. O material é aquecido nesse equipamento e forçado para o bico da extrusora, onde é formado um filete de seção uniforme. Esse filete é resfriado e cortado na saída do equipamento para formar pequenos grânulos.

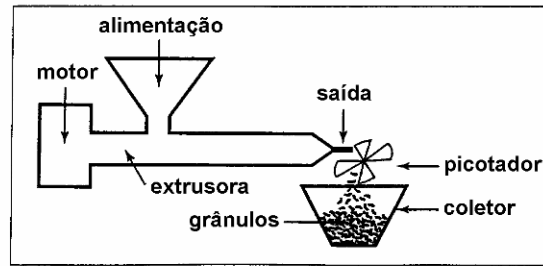


Figura 7: Esquema de um equipamento de granulação

Os grânulos têm tipicamente um tamanho de aproximadamente 4 mm (German e Bose, 1997). Granulação muito fina do material pode agravar problemas durante a injeção como aprisionamento do ar na peça moldada e entupimento do bico da injetora (Mutsuddy e Ford, 1995). Por outro lado, grânulos muito grandes dificultam o transporte pelo fuso da injetora ou podem dificultar a fusão dos mesmos no início da moldagem.

## 2.4 Moldagem

A moldagem da mistura pó-ligante envolve o uso de uma máquina injetora, semelhante ao de injeção de polímeros. A diferença é que, como o material a ser injetado é extremamente abrasivo, o equipamento tem a parte interna revestida com materiais de alta dureza para resistir ao desgaste.

Dois tipos básicos de máquinas injetoras são empregados na injeção de pós: tipo rosca (Figura 8a) e tipo pistão (Figura 8b). A diferença principal entre esses dois equipamentos consiste basicamente no modo de transporte e aquecimento do material através da tubulação até a unidade de molde.

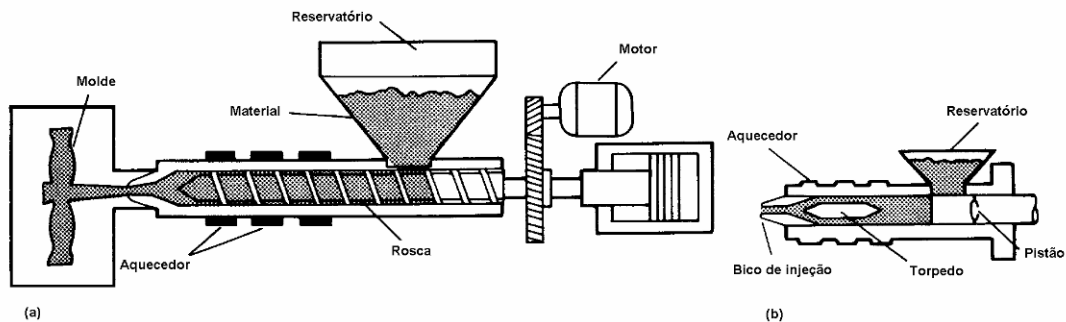


Figura 8: Equipamentos de injeção para a moldagem

O equipamento empregado na moldagem pode ser de alta ou baixa pressão de injeção. A maioria dos processos de moldagem de pós por injeção de alta pressão usa polímeros termoplásticos como o ligante principal da mistura, cuja viscosidade fica em torno de 100 a 1000 Pa.s durante a injeção. Os equipamentos de baixa pressão ( $< 1$  MPa), por sua vez, normalmente usam polímeros solúveis em água ou uma combinação de cera e parafina, cuja mistura apresenta uma viscosidade entre 1 e 4 Pa.s durante a injeção (Rak, 1998).

As principais vantagens dos equipamentos de moldagem de alta pressão são: melhor controle dos defeitos e alta precisão dimensional (German e Cornwall, 1997), enquanto que os de baixa pressão são mais baratos e simples para operar e apresenta baixo custo de manutenção (Peltsman e Peltsman, 1984). Por essa razão este último tem, recentemente, atraído atenção como uma técnica alternativa de moldagem de pós por injeção.

## 2.5 Remoção de Ligante

A remoção de um ligante orgânico normalmente é feita pelo processo térmico ou químico. No processo térmico o ligante é removido da peça injetada por evaporação, degradação térmica, degradação oxidativa ou por escoamento de fluido por ação capilar, enquanto que no processo químico o ligante é dissolvido por um solvente. A remoção térmica



é indiscutivelmente o método mais largamente utilizado na fabricação de peças de cerâmica avançada e tradicional. A seguir são apresentados detalhes técnicos de alguns tipos de remoção de ligante.

#### **2.5.1 Remoção térmica**

O uso de sistema multicomponente de ligante é vantajoso, uma vez que possibilita a remoção térmica progressiva: o de menor estabilidade, no estágio inicial, enquanto o outro, que mantém a estrutura do corpo, é removido na etapa posterior.

A remoção térmica envolve o fluxo de fluido através dos poros como um líquido ou um gás. No início da remoção, são formados pequenos poros dentro do corpo devido à decomposição do ligante de baixo peso molecular. Como os poros são pequenos, a taxa de fluxo do ligante fundido para a superfície é lenta. Portanto, a taxa de aquecimento deve ser muito lenta de modo a permitir a difusão do ligante do interior para a superfície da peça, permitindo, assim, uma abertura gradativa de poros. Um rápido aquecimento é catastrófico, visto que o ligante funde completamente antes de dar início a sua degradação e, conseqüentemente, o corpo pode vir a sucumbir ao seu próprio peso devido à ausência da força capilar. No estágio final de remoção, os componentes remanescentes são aprisionados nos pontos de contato entre as partículas do pó, formando estruturas pendulares, que os mantêm para preservar a forma do corpo (Hwang e Tsou, 1992).

German (1987) propôs um modelo teórico que prevê o tempo de remoção térmica. Segundo esse modelo, o tempo de remoção de ligante é diretamente proporcional ao quadrado da seção da peça.

#### **2.5.2 Remoção por solvente**

Remoção química é uma das rotas mais rápidas de remoção de ligante e proporciona uma boa retenção de forma. Essa técnica consiste na imersão da peça injetada em um líquido, que dissolve apenas um dos componentes do sistema de ligante. O líquido pode ser água ou algum tipo de solvente orgânico, dependendo do sistema de ligante usado. Os componentes remanescentes são, então, removidos na etapa subsequente por tratamento térmico.

Os solventes orgânicos geralmente são tóxicos e muito reativos, devendo-se tomar muita precaução no seu manuseio. São eles, hexano, heptano, octano, tetracloreto de carbono, acetona, etc. Esses produtos podem ser evitados pelo uso de ligantes hidrossolúveis. Yang et al (1999) desenvolveram um sistema de ligante onde a remoção é feita simplesmente pela imersão da peça moldada em água na temperatura ambiente, para remover primeiro o componente solúvel em água. De acordo com a invenção, o álcool polivinílico parcialmente hidrolisado é empregado como componente solúvel em água. Álcool polivinílico é um polímero completamente seguro e manipulável. Quando dissolvido na água, ele é completamente degradável, e não causa nenhum dano ao meio ambiente.

#### **2.5.3 Remoção por ação capilar**

Essa técnica oferece algumas vantagens, como: proporcionar uniformidade térmica na peça, rápida remoção e boa retenção de forma (German e Bose, 1997).

A remoção por ação capilar consiste em remover o ligante de baixo peso molecular da peça injetada com auxílio de um pó fino (denominado pó capilar) ou de um substrato poroso. A peça recoberta com pó capilar ou sob um substrato poroso é então aquecida lentamente até fundir o ligante. O ligante fundido é atraído pela força capilar, devido aos poros do pó capilar ou do substrato. É preciso remover mais de 40% do ligante, nessa etapa, para evitar a formação de trincas na etapa subsequente. Por outro lado, acima de 85%, a peça não resiste ao manuseio. Após remover o ligante, a peça é removida do pó ou do substrato e, em seguida, submetida ao processo de sinterização.

German (1987) desenvolveu um modelo teórico que prevê o tempo de remoção de ligante por ação capilar. Segundo esse modelo a remoção é tão rápida quanto maior a diferença no tamanho de partículas entre o pó da peça moldada e do capilar e maior a energia superficial do fluido ou menor a viscosidade do fluido.

#### **2.5.4 Remoção catalítica**

A remoção catalítica é um híbrido entre a remoção térmica e a remoção por solvente. O mecanismo de remoção depende da permeação do vapor catalítico dentro dos poros e da permeação dos produtos decompostos para fora do corpo. A taxa de despolimerização, geralmente, é o que controla o processo e não a taxa de permeação (German e Bose, 1997).

Há no mercado um material de injeção com o nome comercial Catamold™ (Bloemacher e Weinand, 1997). Esse material é preparado com sistema de ligante à base de poliacetal. Este ligante, na presença de ácido catalítico, despolimeriza a uma temperatura próxima de 110°C, bem abaixo da sua temperatura de amolecimento. Isso significa que, durante a remoção, o polímero passa diretamente do estado sólido para a forma gasosa por meio de uma reação química.

## 2.6 Sinterização

Após a remoção do ligante, a peça moldada por injeção, assim como qualquer compacto cerâmico após a etapa de conformação, passa pela etapa de sinterização para adquirir a resistência mecânica final compatível com o desempenho que lhe será exigido. A sinterização é um processo de consolidação de partículas que acontece pela transferência de massa termicamente ativada.

O grau de sinterização é, normalmente, medido pela variação da densidade do injetado, que aumenta em virtude da contração volumétrica. A densidade do sinterizado e a retração da peça estão relacionadas por:

$$\rho_s = \rho_v / (1 - \Delta l/l_0)^3 \quad (2)$$

onde,  $\Delta l/l_0$  é a expansão térmica linear e  $\rho_v$  é a densidade à verde, antes da sinterização.

A peça injetada a verde após a remoção de ligante apresenta um volume de poros que pode variar de 25% a 50%. Assim, durante a sinterização a peça experimenta uma retração volumétrica caracterizada principalmente pela eliminação desses poros. Segundo Zhang et al (1990), a peça moldada por injeção sofre uma retração linear superior a 10%, podendo, em alguns casos, atingir valores da ordem de até 30%.

Durante o aquecimento, alguns grãos crescem à custa de outros, que encolhem, resultando num aumento efetivo do tamanho médio dos grãos e uma redução na área total de contorno de grão. O crescimento de grão reduz a área de contorno de grão, e essa perda de extensão do contorno de grão, especialmente próximo aos poros, inibe grandemente o fluxo do material nessa região. Assim, uma taxa de aquecimento lenta em uma temperatura intermediária é, normalmente, preferida para se conseguir alta densidade da peça sinterizada (German e Bose, 1997).

## 3. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A moldagem de pós por injeção (MPI) é um processo complexo de fabricação de peças, envolvendo várias etapas. Esse processo tem vantagens em relação as outras técnicas de fabricação porque consegue produzir peças de geometrias complexas e obter alta precisão dimensional. Esses atributos só são atingidos porque, durante a moldagem, o material consegue preencher toda cavidade do molde com pressão isostática, não gerando gradiente de densidade na peça moldada.

A MPI não é apropriada para produzir peças simples ou de baixo valor agregado porque requer um longo tempo de produção, especialmente para peças grossas. Assim é normalmente utilizada para produzir peças pequenas ou de geometrias complexas ou onde outras técnicas de fabricação não conseguem produzi-las.

O longo tempo de produção é devido a etapa de remoção de ligante, que pode demorar até mais que mês para remover o ligante se a parede da peça for muito espessa. Esse tempo, naturalmente, depende do tipo de ligante e principalmente da técnica de remoção de ligante utilizada. Por isso, o maior esforço dos pesquisadores atualmente é para tentar reduzir esse tempo. Essa etapa também é a mais crítica no que diz respeito à introdução de defeitos nas peças. Se a remoção de ligante não for realizada lentamente e com os devidos cuidados, poderá gerar vários tipos de defeitos que, alguns só poderão ser detectados após a sinterização.

Atualmente existem grande variedades de peças produzidas por MPI, que vai desde equipamentos eletrônicos, automotivas, hospitalares até objetos como jóias e bolas de golfe. A grande maioria de peças produzidas por esse processo é metálica, porém tem notado grande aumento na produção de peças cerâmicas ultimamente. Apesar da MPI ter introduzida há pouco tempo na indústria, tem crescido muito nos últimos anos e a tendência mostra um aumento quase que exponencialmente no mercado mundial. Hoje, essa tecnologia já responde com dois terço do campo de aplicação industrial.

No Brasil ainda existem poucas indústrias que empregam essa tecnologia para sua produção. Essas indústrias se concentram principalmente na Zona Franca de Manaus, para produzir peças de relógios, no Rio Grande do Sul, para

produzir componentes eletrônicos e odontológicos e em São Paulo, que produz componentes automotivos e peças cerâmicas. Portanto existe um grande mercado, tanto interno como externamente, que está em plena expansão.

## REFERÊNCIAS

- AGARWALA, M. K.; PATTERSON, B. R. and CLARK, P. E. **Rheological behavior of powder injection molding model slurries.** *Journal of Rheology*, v. 36, n. 2, p. 319-334, 1992.
- BLOEMACHER, M. and WEINAND, D. Catamold – **A new direction for powder injection molding.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, p. 918-922, 1997.
- CHONG, J. S.; CHRISTIANSEN, E. B. and BAER, A. D. **Rheology of concentrated suspensions.** *Journal Applied Polymer Science*, v. 15, p. 2007-2021, 1971.
- EDIRISINGHE, M. J. and EVANS, J. R. G. **Review: Fabrication of engineering ceramics by injection moulding I. Materials selection.** *International Journal High Technology Ceramics*, v. 2, p. 1-31, 1986a.
- EDIRISINGHE, M. J. and EVANS, J. R. G. **Review: Fabrication of engineering ceramics by injection moulding II. Techniques.** *International Journal High Technology Ceramics*, v. 2, p. 249-278, 1986b.
- EDIRISINGHE, M. J. and EVANS, J. R. G. **Compounding ceramic powders prior to injection moulding.** *Proceedings British Ceramic Society*, v. 38, p. 67-80, 1986c.
- EDIRISINGHE, M. J. and EVANS, J. R. G. **Rheology of ceramic injection moulding formulations.** *Transaction and Journal of the British Ceramic Society*, v. 86, p. 18-22, 1987.
- EDIRISINGHE, M. J. **The effect of processing additives on the properties of a ceramic-polymer formulation.** *Ceramics International*, v. 17, p. 89-96, 1991.
- EVANS, J. R. G. and EDIRISINGHE, M. J. **Interfacial factors affecting the incidence of defects in ceramic moulding.** *Journal of Materials Science*, v. 26, p. 2081, 1991.
- FARRIS, R. J. **Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data.** *Transaction of the Society of Rheology*, v. 12, p. 281-301, 1968.
- GERMAN, R. M. **Theory thermal debinding.** *Journal Powder Metallurgy*, v. 23, n. 4, p. 237-245, 1987.
- GERMAN, R. M. **Technological barriers and opportunities in powder injection molding.** *Powder Metallurgy International*, v. 25, n. 4, p. 165-169, 1993.
- GERMAN, R. M. **Homogeneity effects on feedstock viscosity in powder injection molding.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 77, n. 1, p. 283-285, 1994.
- GERMAN, R. M. and BOSE, A. **Injection molding of metals and ceramics**, 1 ed., Metal Powder industries Federation, Princeton, NJ, 1997.
- GERMAN, R. M. and CORNWALL, R. G. **Worldwide market and technology for powder injection molding.** *The International Journal of Powder Metallurgy*, v. 33, n. 4, 1997.
- GERMAN, R. M. and CORNWALL, R. G. **Powder injection molding: year 2000 market and industry report.** *The International Journal of Powder Metallurgy*, v. 37, n. 1, 2001.
- HUANG, M.-C. and TAI, C.-C. **The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 110, n. 1, p. 1-9, 2001.
- HWANG, K. S. and TSOU, T. H. **Thermal debinding of powder injection molded parts: observations and mechanisms.** *Metallurgical Transactions A*, v. 23A, p. 2775-2782, 1992.
- KIPPHUT, C. M. and GERMAN, R. M. **Powder selection for shape retention in powder injection molding.** *The International Journal of Powder Metallurgy*, v. 27, n. 2, p. 117-124, 1991.
- KRUG, S.; EVANS, J. R. G. and TER MAAT J. H. H. **The aetiology of defects in large ceramic moulding.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 82, p. 2094-2100, 1999.
- MANGELS, J. A. and WILLIAMS, R. M. **Injection molding ceramics to high green densities.** *Ceramic Bulletin*, v. 62, n. 5, p. 601-606, 1983.

MARKHOFF, C. J.; MUTSUDDY, B. C. and LENNON, J. W. **A method for determining critical ceramic powder volume concentration in the plastic forming of ceramic mixes.** *American Ceramic Society*, p. 246-250 in *Forming of Ceramics*, 1986.

MOONEY, M. **The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles.** *Journal of Colloid Science*, v. 6, p. 162-170, 1951.

MUTSUDDY, B. C. **Influence of powder characteristics on the rheology of ceramic injection molding mixtures.** *Proceedings British Ceramic Society*, v. 33, p. 117-137, 1983.

MUTSUDDY, B. C. **Injection molding.** *Engineered Materials Handbook, Ceramics and Glasses*, v. 4, ASM international, 1991.

MUTSUDDY, B. C. and FORD, R. G. **Ceramic injection molding.** *1 ed.*, Materials Technology Series, Chapman & Hall, NY, 1995.

NOGUEIRA, R. E. F. Q.; EDIRISINGHE, M. J. and GAWNE, D. T. **Selection of a powder for ceramic injection moulding.** *Journal of Materials Science*, v. 27, p. 6525-6531, 1992.

PAUL LIN, S. T. and GERMAN, R. M. **The influence of powder loading and binder additive on the properties of alumina injection-moulding blends.** *Journal of Materials Science*, v. 29, p. 5367-5373, 1994.

PELTSMAN, I. and PELTSMAN, M. **Low pressure moulding of ceramic materials.** *Interceram*, v. 4, 1984.

RAK, Z. S. **New trends in powder injection moulding.** *Forum of Technology*, v. 75, n. 9, p. 19-26, 1998.

RAMAN, R.; SLIKE III, W. and GERMAN, R. M. **Experimental evaluation of the mixing process for the preparation of feedstock for powder injection molding.** *Ceramic Engineering Science Procedure*, v. 14, n. 11-12, p. 166-186, 1993.

TER MAAT, J. H. H. and WOHLFROMM, H. **Ceramic injection moulding – from niches to riches.** In: *First European Symposium on Powder Injection Moulding*, Munich, October 15-16, 1997.

YANG, X. and PETOAVICH, R. J. **Powder and binder systems for use in metal and ceramic powder injection molding.** *United States Patent*: 6,008,281, December 28, 1999.

ZHANG, H.; GERMAN, R. M. and BOSE, A. **Wick debinding distortion of injection molded powder compacts.** *The International Journal of Powder Metallurgy*, v. 26, n. 3, 1990.