



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 28 – 25, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

MICROFABRICAÇÃO - ESTUDO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MICROCOMPONENTES MECÂNICOS

Flávio Pires Oliva, flaviooliva@gmail.com
Luciana Montanari, montanar@sc.usp.br
Jaime Gilberto Duduch, jgduduch@sc.usp.br
Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br
Arthur José Vieira Porto, ajvporto@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Pq Arnold Schimidt, São Carlos - SP, CEP 13566-590

Resumo: *A miniaturização de componentes e sistemas incorporados nos mais diversos ramos da indústria e em aplicações médicas e domésticas vem sendo uma realidade nas duas últimas décadas. A evolução constante nas técnicas de microfabricação e em materiais tem criado novas aplicações, ainda mais complexas, eficazes e ambiciosas no que toca à visão do futuro. A massificação desses mini, micro e nanossistemas depende fortemente da capacidade de replicação dos seus componentes. Esse trabalho enumera e discute as técnicas de microfabricação existentes atualmente e os processos de microrreplicação. Com esse objetivo é feita análise ao estado da arte dos processos de microfabricação e classificação quanto à sua aptidão de possibilitar a obtenção direta das microestruturas ou a obtenção de ferramentas que podem ser usadas para replicação. As limitações técnicas que alguns processos de microfabricação possuem atualmente justificam a necessidade de análise comparativa entre tudo aquilo que é possível realizar de modo a privilegiar a produtividade.*

Palavras-chave: *microfabricação, microtecnologia, miniaturização.*

1. INTRODUÇÃO

A miniaturização de componentes e sistemas incorporados nas mais diversas áreas como a biomedicina, farmacêutica, fibras ópticas, microeletrônica, telecomunicações, informática, indústria automotiva, entre outras, constituiu uma realidade nas últimas duas décadas, isso por possuir vantagens inerentes como melhor velocidade de resposta, menor custo e grande capacidade de compactação. Segundo Tay (2005), a predição do potencial de mercado de componentes e sistemas miniaturizados para 2007 girou em torno de US\$ 26,4 bilhões, com previsão de crescimento anual médio de 19,1%.

A massificação do uso de microcomponentes, bem como de sua crescente exigência técnica, concorrem para o desenvolvimento contínuo de técnicas de produção, podendo ser elas de baixa replicação, para fabricação de moldes e protótipos ou produção em série, de forma a dar resposta a um mercado em crescimento acelerado.

Esse trabalho surgiu em 2007, período de forte agitação no mercado mundial para o investimento e pesquisa em equipamentos associados à microfabricação. Há, no Brasil, o grande desafio de consolidar o estudo de tal tecnologia, pois há plenas condições de implementação.

É nesse contexto que esse trabalho procura auxiliar, sumarizando os processos de microfabricação mais relevantes, analisando suas capacidades e aplicações.

2. PROCESSOS DE MICROFABRICAÇÃO

Um dos maiores problemas enfrentados no processo de miniaturização é que a tecnologia conhecida e estabelecida para macrocomponentes não pode ser proporcionalmente escalonada e aplicada a micropeças (Cerveira, Silva e Batalha, 2005). Os desafios tecnológicos colocados pela microtecnologia têm impulsionado as tecnologias de fabricação de microcomponentes que, por sua vez, oferecem novas soluções a problemas existentes e permitem novas aplicações.

Há, certamente, muitos processos diferentes de microfabricação e novos processos surgem a cada dia pela fusão de diferentes técnicas e descoberta de novas tecnologias. De modo geral, os processos de microfabricação estão classificados da seguinte forma: aditivos e corrosivos, litografia, eletrofísicos e químicos, mecânicos, moldagem e processos por feixe de energia (Rajurkar, 2006).

Alguns processos produzem geometrias simples, enquanto outros fornecem geometrias mais complexas. A Tab. (1) mostra uma comparação entre os processos de microfabricação (Rajurkar, 2006).

Tabela 1. Comparação entre os processos de microfabricação. ((+) Bom, (o) Neutro e (-) Ruim)

Processos	Complexidade Geométrica	Diversidade de Materiais	Prototipagem	Produção em Massa	Qualidade Superficial	Acessibilidade Econômica
Aditivos e Corrosivos	+	-	+	o	o	+
Litográficos	-	-	-	+	+	-
Eletrofísicos e químicos	o	+	+	-	o	o
Mecânicos	+	o	+	o	+	+
Moldagem	o	o	-	+	o	o
Feixe de Energia	o	+	+	-	o	o

2.1. Processos Aditivos e Subtrativos

2.1.1. Processos de Deposição

Nos processos de deposição, materiais podem ser depositados em fase líquida, plasma, gás ou sólida em substratos sólidos. Essas técnicas aditivas frequentemente são acompanhadas ou seguidas de processos térmicos para obtenção de propriedades específicas dos materiais e boa adesão ao substrato (Madou, 2001). Os principais processos de deposição são:

- **Oxidação Térmica:** é a técnica onde se faz uso de altas temperaturas (geralmente entre 700 a 1300°C) para promover o crescimento de uma camada de óxido num determinado material. Por exemplo, a oxidação térmica de SiO₂ consiste em expor o substrato de silício a um ambiente com temperatura elevada contendo O₂ (oxidação seca) ou H₂O (oxidação úmida), para oxidação do material, produzindo, assim, uma fina película de óxido com espessura variando entre 60 a 10000 Å. A elevada temperatura usada na oxidação térmica serve principalmente como aceleradora do processo de oxidação, tendo por resultado camadas mais grossas de óxido por unidade de tempo.
- **Deposição Química:** processo para deposição de material por transformação química. Podem ser categorizados da seguinte forma: Galvanoplastia é um processo onde se usa corrente elétrica para depositar, em um objeto eletricamente condutor, fina camada de metal que tenha alguma propriedade desejada, por exemplo, resistência a abrasão ou ao desgaste, proteção a corrosão, lubrificação, melhoria de qualidades estéticas, etc. Outra aplicação da galvanoplastia é aumentar a espessura de peças pequenas; Deposição Química por Solução (DQS), o material do filme é depositado durante reações químicas que ocorrem entre a solução líquida e a superfície da peça, as soluções são combinações de diferentes precursores em pó dissolvidos em solventes apropriados. DQS é um dos processos mais simples e baratos de fabricação de filme fino, pois, normalmente, não é necessário nenhum sistema de vácuo ou câmara elaborada de deposição. É possível a síntese de filmes finos em baixas temperaturas. Produzem-se películas de pureza elevada e de boa homogeneidade; Deposição Química por Vapor (DQV), processo químico usado para se produzir materiais sólidos com alta pureza e alta qualidade. Em um típico processo de DQV, o substrato é exposto a um ou mais gases voláteis, que reagem e/ou decompõe-se na superfície do substrato para produzir a película desejada. Os processos de microfabricação usam extensamente o DQV para depositar materiais em várias formas, incluindo: monocristalino, policristalino, amorfo e epitaxial. Esses materiais incluem: silício, fibra de carbono, nanofibras de carbono, filamentos, nanotubos de carbono, dióxido de silício, silício-germânio, tungstênio, carbetto de silício, nitreto de silício, oxinitreto de silício, nitreto de titânio, e vários dielétricos de constante dielétrica elevada.
- **Deposição Física:** o material a ser depositado é colocado em ambiente energético entrópico, de modo que as partículas do material escapem de sua superfície. Em volta dessa fonte está uma superfície fria que extrai a energia dessas partículas quando colidem, permitindo que formem uma camada contínua. O sistema inteiro é mantido em uma câmara à vácuo para permitir que as partículas viajem livres. Pelo fato de que as partículas tendem a seguir trajetória retilínea, as películas depositadas por meios físicos são geralmente direcionais. Os diferentes processos de deposição física diferem pelo que utiliza para elevar a energia do material: Evaporação Térmica, usa resistência elétrica como fonte de calor para derreter o material e aumentar sua pressão de vapor a uma escala útil; Evaporação Térmica por Feixe de Elétrons, um injetor de elétron atira um feixe de alta energia para ferver um pequeno ponto do material a ser depositado, desde que o aquecimento não seja uniforme. Podem ser depositados materiais com pequena pressão de vapor. O feixe é curvado geralmente a um ângulo de 270° a fim de assegurar que o filamento do injetor não esteja diretamente exposto ao fluxo evaporador; Deposição Sputter, método de depositar filmes pela pulverização do material em substrato. Os átomos pulverizados lançados em fase gasosa não estão termodinamicamente em equilíbrio e tendem a se depositar em

todas as superfícies na câmara de vácuo. Sputtering usa geralmente um plasma do argônio para pulverização do material, o alvo pode ser mantido em temperatura relativamente baixa, dado o fato de que o processo não é de evaporação, fazendo dessa técnica de deposição umas das mais flexíveis. É especialmente útil para composições ou misturas que possuam taxas evaporação diferentes; Feixe Molecular Epitaxial, elementos ultra puros são sublimados formando feixe dirigido ao substrato de modo que o material deposite uma camada muito fina. O feixe do material pode ser gerado por meios físicos ou por reação química (feixe químico epitaxial). Composições tais como arseneto de gálio são geralmente depositados repetidamente, aplicando uma camada de elemento de cada vez (primeiro Ga e em seguida As); no Spin Coating, uma quantidade de solução é colocada sobre o substrato que então é girada em alta velocidade a fim de espalhar o líquido por força centrífuga. A rotação continua, enquanto o líquido é jogado para fora das bordas do substrato, até que a espessura desejada da película seja conseguida. Quanto maior a velocidade angular de rotação, mais fina será a camada.

2.1.2. Processos de Corrosão

São usados na microfabricação para remover quimicamente camadas da superfície de um substrato durante a manufatura.

Para muitas etapas da gravação, a parte do substrato é protegida da corrosão por máscara de material que resista a corrosão. Em alguns casos, o material de proteção é o fotossensível, modelado usando o processo de fotolitografia. Se for necessário produzir uma cavidade, a profundidade da cavidade pode ser controlada aproximadamente usando o tempo e a taxa de corrosão conhecida. A corrosão deve remover inteiramente a camada superior da estrutura multicamadas sem danificar as camadas inferiores ou a máscara. A habilidade do sistema de corrosão de fazer isso depende da relação entre as taxas de corrosão dos dois materiais.

Algumas vezes o processo corrói abaixo das camadas de proteção, formando rampas nas laterais. Corrosivos com grande polarização são chamados isotrópicos, porque corroem o substrato igualmente em todos os sentidos. Nos processos modernos é usada a corrosão anisotrópica, pois produz cantos vivos e geometrias bem controladas (Madou, 2001).

- **Corrosão Úmida**, o substrato pode ser imerso em um banho de corrosivo, que deve ser agitado para conseguir bom controle do processo. Como alternativa à imersão, algumas máquinas empregam um gás (geralmente nitrogênio puro) para amortecer e proteger um lado do substrato enquanto corrosivos são aplicadas do outro lado. Corrosivos líquidos são geralmente isotrópicos, que conduz a grandes desvios, quando atacando filmes grossos. Requerem também a eliminação de grandes quantidades de resíduo tóxico. Por essas razões é raramente usado em processos avançados.
- **Corrosão Seca** refere-se à remoção de material, normalmente um substrato mascarado por processo litográfico, expondo o material a um bombardeio de íons (geralmente um plasma de nitrogênio, de cloro ou de tricloreto de boro) que expele parcelas do material da superfície exposta. O processo de corrosão a seco normalmente grava direcionalmente ou anisotropicamente.

2.2. Processos Litográficos

A técnica é usada para transferir cópias de um modelo (máscara) à superfície de um material sólido. Os tipos de litografia diferem entre si essencialmente pela fonte de radiação.

O processo simplificado ocorre da seguinte forma: uma placa de silício com fina camada de óxido é coberta com uma camada de aproximadamente 1µm de material sensível à radiação usada. Após a exposição, o substrato é lavado com solução reveladora que remove as áreas não expostas do material sensível e deixa a geometria da máscara exposta na superfície do substrato. Após a revelação, o substrato é colocado em solução líquida ou bombardeado por gases, com o intuito de atacar o óxido mas não o material sensível ou o silício subjacente. O material sensível protege as áreas de óxido cobertas e o ataque faz a corrosão do modelo exposto no substrato (Madou, 2001).

2.2.1. Fotolitografia

Este processo, essencialmente bidimensional, tem tolerância limitada para topografias não-planares criando, assim, restrição no uso em outros sistemas miniaturizados que exibem frequentemente topografias mais complexas.

A matriz usada para gerar modelos em substratos revestidos com fotossensível é chamada fotomáscara. Um vidro liso (transparente à luz ultravioleta (UV) próxima) ou placa de quartzo (transparente a UV profundo) com um metal absorvente, dando a forma na máscara, é colocado em contato direto com a superfície revestida com fotossensível e o substrato é exposto à radiação UV. As máscaras, em contato físico com a base, são chamadas máscaras de contato. Infelizmente, estas máscaras apresentam um desgaste mais rápido que as máscaras de proximidade.

Podem ser adicionados componentes ópticos ao sistema tornando um sistema por projeção de imagem – litografia óptica. No sistema por projeção, o contato com o substrato é totalmente evitado. Um conjunto de lentes de alta resolução projeta uma imagem da fotomáscara no fotossensível, permitindo assim, que sejam feitas reduções na imagem, facilitando a fabricação da fotomáscara. Não há necessidade de relação 1:1 com a dimensão desejada da geometria no substrato. Devido às imperfeições das lentes e difrações, técnicas de projeção têm resoluções mais baixas para transferência de forma que aquelas obtidas por máscaras de contato.

Os principais componentes dos fotossensíveis são polímeros (basicamente resina), sensibilizadores e solventes. O polímero muda a estrutura quando exposto à radiação, o solvente permite a aplicação de rotação para formação de camadas finas e uniformes nas superfícies do substrato e sensibilizadores controlam as reações fotoquímicas na fase polimérica.

Há dois tipos de polímeros fotossensíveis: positivos e negativos. Se o fotossensível for do tipo positivo a reação fotoquímica, durante a exposição, enfraquece o polímero pela ruptura ou cisão das ligações principais e laterais do polímero, e o resistivo exposto torna-se mais solúvel em soluções reveladoras. Se o fotossensível for do tipo chamado negativo, a reação fortalece o polímero pela ligação cruzada aleatória da ligação principal ou das ligações laterais, tornando-se menos solúvel (dissolução mais lenta) (Madou, 2001).

2.2.2. Litografia por UV Extremo

A litografia por ultravioleta extremo (EUVL), usando comprimento de ondas na escala de 10 a 14nm para realizar a projeção da imagem, é talvez a extensão mais natural da litografia óptica de projeção, somente diferindo no comprimento de onda. As fontes para esse tipo de radiação são plasmas produzidos por laser e sincrotrons.

2.2.3. Litografia por Feixe de Partículas

Um feixe de partículas carregadas é um grupo espacialmente localizado de partículas eletricamente carregadas que têm aproximadamente a mesma velocidade e sentido. A energia elevada e a direcionalidade dos feixes de partícula carregados fazem-na úteis para aplicações.

Os tipos mais importantes de feixes de partícula carregados são:

- **Feixes de Elétrons (EBL):** técnica de modelagem de alta definição, onde elétrons com muita energia (10 a 100 keV) são focalizados em um estreito feixe e usados para expor resistivos eletrossensíveis. A EBL apresenta alguns outros atrativos comparados a fotolitografia, a Tab. (2) sintetiza alguns prós e contras do processo (Madou, 2001).

Tabela 2. Prós e contras do processo de litografia por feixe de elétrons.

Prós	Contras
Controle preciso da energia liberada	Os elétrons se dispersam rapidamente nos sólidos
Não há necessidade de máscara física	Precisa de vácuo, tornando o aparelhamento complexo e caro
Habilidade de gravar precisamente pequenas áreas	Velocidade lenta de processo, pois um feixe deve fazer a varredura completa da superfície
Baixa densidade de erro	
Grande profundidade de foco	

- **Feixe de Íons:** as três técnicas de litografia por feixe de íon têm atributos muito diferentes e para tanto têm suas próprias forças e áreas de aplicação. São técnicas litográficas, pois sensibilizam materiais que necessitam ser revelados para obtenção da geometria moldada. O IPL (Ion Beam Projection Lithography) segue as linhas tradicionais da litografia, usando máscaras de grandes áreas através do qual uma forma é replicada em material resistivo, que pode ser usado para modificar as propriedades próximas à superfície. A ausência completa dos efeitos da difração unidos à habilidade de controlar a profundidade de penetração do íon para satisfazer a espessura do resistivo ou a profundidade da modificação são características principais dessa técnica, como é a habilidade de modelar uma área grande em única exposição breve de irradiação sem nenhuma corrosão úmida. Os processos por Feixe de Próton e FIB (Focused Ion Beam) são processos de gravação direta (sem máscara), que têm sido, por muito tempo, considerados muito lentos para a produção em massa. Entretanto, essas duas técnicas podem ter vantagens distintas quando usadas em combinação com microestampagem e moldagem por transferência. O FIB pode produzir estampos padrões em todo o tipo de material e a gravação por Feixe de Próton é ideal para produzir estampos metálicos tridimensionais de elevada relação de aspecto e geometria precisa (Watt et al., 2005).

2.2.4. Litografia por Raio-X

Em contraste com a litografia por feixe de elétrons e litografia por feixe de íons, nenhuma partícula carregada é envolvida diretamente nas exposições por raio-X, assim, eliminando a necessidade de vácuo. A litografia por raio X é superior à litografia ótica por causa do uso de comprimentos de ondas mais curtos e maiores profundidades de campo e o tempo de exposição e as condições de revelação não são tão restritas. A reprodutibilidade é elevada, porque os resultados são independentes do tipo do substrato, reflexões de superfície e topografia. Os efeitos da difração são geralmente insignificantes e as máscaras de proximidade podem ser usadas.

Na litografia por raio X, não há essencialmente nenhum sistema óptico envolvido e, embora isso se apresenta como vantagem, há também uma desvantagem, somente podendo trabalhar com imagens 1:1.

A produção da máscara do raio X é um dos aspectos mais difíceis da litografia por raio X. Para ser altamente transmissível aos raios X, o substrato da máscara deve ser uma membrana fina de baixo número atômico (Z). As máscaras de raio X devem suportar muitas exposições sem distorção, serem alinháveis à amostra e serem robustas. A máscara tem três componentes principais: um absorvente, uma membrana e uma estrutura. O absorvente contém a informação a ser copiada no resistivo. É feita de um material com número atômico elevado, freqüentemente ouro. O material de elevado Z absorve raios X, visto que o material de baixo Z transmite raios X. A estrutura gera a robustez ao conjunto membrana/absorvente de modo que o todo possa ser mais bem manuseado.

Na litografia por raio X, o substrato principal, deve ser um condutor ou um isolador revestido com camada superior condutora. Um condutor é requerido para a subsequente galvanização. Alguns exemplos de substratos principais que foram usados com sucesso são alumínio, placa de aço austenítico, placas de silício com fina camada superior de titânio ou prata com cromo e cobre revestido com ouro, titânio, ou níquel. Outros substratos de metal, bem como, placas cerâmicas, plásticas, e de vidro revestidas com metal foram empregadas. É importante que a base do revestimento forneça boa adesão ao resistivo.

Um resistivo para raio X idealmente deve apresentar sensibilidade elevada aos raios X, alta resolução, resistência a corrosão seca e úmida, estabilidade térmica maior que 140°C , e uma matriz ou resina de absorção menor que $0,35\ \mu\text{m}$ no comprimento de onda de interesse, a parte não exposta do resistivo deve ser absolutamente insolúvel durante o processo de revelação, o resistivo também deve ter muito boa adesão ao substrato e ser compatível com o processo de galvanização, isso impõe temperatura de transição vítrea ao resistivo maior que a temperatura do banho eletrolítico usado para eletrodepositar metais na geometria do resistivo restante do processo de revelação (60°C). Para evitar danos mecânicos à microestrutura produzida pela tensão durante a revelação, as camadas de resistivo devem apresentar baixas tensões internas. Se a estrutura de material resistivo for o produto final, especificações adicionais dependem de sua aplicação, por exemplo, transparência e índice refração para componentes óticos ou alta tensão de escoamento mecânica para aplicações de sustentação de carga. Por exemplo, PMMA exhibe propriedades óticas boas na escala visível e infravermelho próximo e auxilia na fabricação de todos os tipos de componentes óticos.

2.2.5. Microestereolitografia

A tecnologia de microestereolitografia é baseada na estereolitografia convencional, um processo aditivo de fabricação, que foi introduzido no começo dos anos 90. Pode ser uma tecnologia atrativa para a microfabricação de peças complexas, pois o processo pode fabricar estruturas 3D reais no método de camada-por-camada. Entretanto, a tecnologia de microestereolitografia tem dificuldades na fabricação de microestruturas sem resina fotocurável, neste caso, esse processo pode ser útil para se produzir padrões para a fabricação dos moldes.

Quando o fotopolímero (resina líquida) é irradiado com luz UV, o fotoiniciador polimeriza monômeros do fotopolímero, assim, o fotopolímero solidifica. A fotopolimerização é iniciada pelos fótons existentes na luz UV que, então se propaga pela quebra de ligação dupla ou pela abertura de um anel no monômero. As ligações cruzadas do polímero são finalmente formadas quando a propagação é terminada. A fim de criar estruturas 3D, empilha-se camada-por-camada de uma seção bidimensional, obtida de arquivos CAD, e obtém-se a forma desejada (Vasco, 2006).

2.2.6. Polimerização Multifotônica

É uma técnica poderosa para a fabricação de estruturas micron e submicrométricas tridimensionais. Seu princípio é um tanto similar àquele da técnica de estereolitografia, mas a polimerização multi-fotônica fornece definição e qualidade estruturais melhores. A principal distinção entre as tecnologias de polimerização multi-fotônica e de estereolitografia é que no caso de polimerização multi-fotônica são usados pulsos de laser infravermelho próximo e no caso de estereolitografia a radiação é de laser ultravioleta para se curar os materiais fotossensíveis. Levando em consideração que os materiais fotossensíveis são geralmente transparentes a infravermelho e são altamente absorptivos na escala UV, a polimerização multi-fotônica pode iniciar a polimerização com pulsos IR de laser dentro do volume, já que a polimerização do material acontece somente no foco do feixe, e fabricar estruturas 3D, visto que com a radiação de laser UV, devido a absorção de fóton único, a polimerização ocorre na superfície. Para a fabricação de estruturas 3D, a estereolitografia é usada como uma tecnologia planar, com etapas de polimerização camada-por-camada, visto que polimerização multi-fotônica é verdadeiramente uma tecnologia 3D de alta resolução.

2.3. Processos Eletro-Físicos e Químicos

2.3.1. Microeletroerosão (EDM)

É um método de usinagem usado originalmente para metais duros ou aqueles que seriam impossíveis de usinar com técnicas tradicionais. Uma limitação crítica é que EDM trabalha somente com materiais eletricamente condutores. É um método não tradicional de remover material por uma série de rápidas descargas de arcos elétricos entre um eletrodo (ferramenta de corte) e a peça. A ferramenta de corte EDM é guiada ao longo do trajeto desejado, movendo-se muito próximo, mas sem tocar a peça. Sucessivas faíscas produzem uma série de microcrateras na peça de trabalho, que também são formadas na ferramenta, e removem o material por derretimento e vaporização. As partículas são removidas pelo fluxo contínuo de líquido dielétrico (Asad et al., 2007).

O processo de EDM é usado mais extensamente pelas indústrias de fabricação de molde-ferramenta e de estampos, mas está se tornando um método comum de se fazer protótipos e peças de produção, especialmente na indústria aeroespacial, automotiva e eletrônica em que as quantidades de produção são relativamente baixas.

Na fabricação por eletroerosão a fio, um fio único de metal fino, geralmente de bronze, é passado através da peça. Normalmente o processo ocorre submerso em um tanque com líquido dielétrico (normalmente a água). A água serve também para remover os restos da zona de corte (Rajurkar et al., 2007).

2.3.2. Microfabricação Ultrassônica

Técnica usada para fabricar pequenas peças em materiais frágeis tais como o silício, vidro e cerâmica, mas também metais. É rápida, fácil e barata, particularmente quando comparada a processos como LIGA.

A ferramenta pode ter o formato desejado e que melhor se ajuste ao uso, já que pode ser usinada em diversos metais. A cabeça da ferramenta vibrará verticalmente em uma frequência muito elevada (na escala de 20-28 kHz) do sistema que compreende a ferramenta e sua fixação. A pasta abrasiva (tipicamente grão abrasivo de carbetto de silício ou carbetto de boro com água) é colocada entre a ferramenta e a peça de trabalho. A vibração ultra-sônica é responsável pela remoção de material. O uso da pasta desgastará as superfícies tanto da peça como da superfície da ferramenta. Para peças muito pequenas ou de altíssima precisão e para produção em larga escala, o uso de pó de diamante é mais aconselhável tanto prática como economicamente (Medis e Henderson, 2005).

2.4. Processos Mecânicos

2.4.1. Microfresamento

Microfresamento é um processo de corte por remoção direta de material. As ferramentas para microfresamento possuem diâmetros muito pequenos, entre 22 e 100 μ m. Outras limitações atuais dessa tecnologia são a profundidade máxima de corte de 100 μ m e a menor espessura de parede, 8 μ m.

Todavia, é um processo rápido quando comparado com outros, capaz de gerar paredes perfeitamente verticais, superfícies com baixa rugosidade, cantos exteriores vivos e geometrias relativamente complexas. As ferramentas de fresamento são feitas usando o processo FIB, o qual possibilita a remoção de material na escala atômica (Rajurhar e Madou, 2005).

2.4.2. Microtorneamento

Processo típico para peças de revolução, sendo alternativo aos processos litográficos. Um dos principais problemas associados aos processos de microusinagem é o fato de que fabricar microcomponentes recorrendo a processos de corte por remoção de material exige microferramentas e equipamentos mais precisos. Contudo, a miniaturização traz benefícios ao nível da minimização de erros devido às menores expansões térmicas e menor flexão da peça, provocada por pequenas forças de corte. No entanto, não é possível obter ferramentas de dimensões tão pequenas quanto desejável, razão pela qual a precisão do processo é seriamente afetada pelo conjunto de forças de corte, considerando-se também a diminuição de rigidez da peça com a diminuição de suas dimensões.

O processo possibilita as mesmas operações que podem ser executadas no torneamento convencional: faceamento, torneamento de contorno, abertura de rasgos e roscas assim como a furação (Rajurhar e Madou., 2005).

2.4.3. Microfuração

É caracterizado não apenas por ser um processo que usa pequenas brocas, mas também pela rotação precisa da microbroca e ciclo especial de furação, chamado ciclo pica-pau. Com isso, as paredes do microfuro tornam-se superfícies mais lisas que as superfícies produzidas por processos convencionais. As menores microbrocas são do tipo espada, não possuem canais helicoidais, e isso torna a remoção de cavacos do furo mais difícil. A microfuração apresenta como desvantagem principal a geometria da broca. Por causa da ponta da broca, não é possível obter um furo com fundo plano. Uma alternativa para criar furos cegos, com fundo plano, é usar ferramenta de fresamento. A desvantagem deste procedimento é que as brocas têm profundidade de corte maior (Rajurhar e Madou, 2005).

2.5. Processos de Moldagem

Outros processos podem ser usados para obter protótipos de microcomponentes, porém, para produção em escala comercial, são exigidos processos com alto nível de replicação. Os processos de moldagem, na produção em série de microcomponentes, têm desempenhado um papel importante na disseminação dos microssistemas.

Essas técnicas apresentam características diferentes e, conseqüentemente, capacidades diferentes, podendo por isso ser complementares no contexto da obtenção de microestruturas funcionais. São técnicas de moldagem, portanto, necessitam de moldes feitos por outros processos de microfabricação, anteriormente descritos.

2.5.1. Moldagem por Transferência de Resina

Como alguns processos de microfabricação são limitados a alguns tipos de materiais frágeis ou quebradiços para a fabricação de moldes, que os tornam mais baratos, a micromoldagem por transferência de resina é uma alternativa muito atraente já que trabalha em baixa pressão (pressão atmosférica), porém, há a limitação de somente ser possível o uso de polímeros reativos de baixa-viscosidade como epoxies, uretanos, silicões, acrílicos, etc. Durante o processo de micromoldagem por transferência de resina, os componentes da resina são misturados pouco antes da transferência para a cavidade, ativando a polimerização da resina. Pode ser efetuado em resina vazada ou por máquina. Duas complicações desse método são a necessidade de uso de desmoldante, o qual tende a reduzir as propriedades termomecânicas da peça, e a contração do polímero durante sua polimerização. A inconveniência causada pela dificuldade de inserção do desmoldante nas microcavidades também é um fato a ser destacado negativamente. A Tab. (3) mostra os prós e contras do processo de moldagem por transferência de resina.

Tabela 3. Prós e contras do processo de moldagem por transferência de resina.

Prós	Contras
Fácil enchimento da cavidade	Longo tempo de ciclo
Pequeno esforço causado ao molde	Contração Polimérica
Alta resistência química e térmica (devido ao cross-linking)	Contaminação (resíduo se a reação não é 100%)
Alta replicabilidade de pequenas peças com grandes relações entre dimensões e microestruturas 3D	Custo de Produção de médio a alto

2.5.2. Microinjeção

A microinjeção é baseada no processo de injeção convencional, onde há o aquecimento, até a fundição, de um material, em seguida o mesmo é injetado à alta pressão na cavidade do molde. O molde deve permanecer aquecido à temperatura constante, para que o material injetado não endureça prematuramente. Para que seja possível o preenchimento de cavidades de dimensões micrométricas, o molde deve ser mantido a temperatura maior que na injeção de peças grandes, mas abaixo da temperatura de fundição do material de preenchimento, devido aos defeitos que podem surgir a essa temperatura. Como o molde necessita de altas temperaturas para garantir seu completo preenchimento também é necessário resfriamento para garantir dureza suficiente da peça não-curada antes de ser retirada do molde (Imgrund et al., 2007).

Um dos mais importantes fatos para a fidelidade da replicação é a espessura da camada sólida formada nas paredes do molde de microcavidades. A pressão de injeção deve ser suficiente para penetrar nessas cavidades. Quanto maior a pressão, mais rápida será a injeção e menor será a parede formada. A injeção de peças micrométricas e com baixa relação entre dimensões já têm sido muito usada com excelentes resultados, porém, o desafio está nas micropartes com alta relação entre dimensões necessárias.

Microestruturas plásticas podem ser satisfatória e economicamente produzidas pela tecnologia de microinjeção, porém, para muitas aplicações, são exigidos materiais com propriedades mecânicas e estabilidade térmica superiores. Para suprir essa necessidade, a microinjeção de materiais cerâmicos e de metais, ainda que menos difundida, é uma realidade. É uma variante do processo chamado PIM (Powder Injection Molding) e tem os mesmos 4 passos principais (mistura, injeção, remoção do aglutinante e sinterização) (Fu et al., 2005).

O pó do material é misturado a um aglutinante, em seguida, a mistura é injetada na cavidade do molde (similar à injeção de plástico). É necessário um pó muito fino para a microinjeção de metal, na faixa de 2 a 5 μm . O aglutinante então é removido por um solvente e/ou por um processo térmico. A peça porosa, devido à remoção do aglutinante, é sinterizada para aumentar sua densidade com a contração do material (Bulger, 2005). A Tab. (4) mostra os prós e contras do processo de microinjeção.

Tabela 4. Prós e contras do processo de microinjeção.

Prós	Contras
Bom para micropartes com baixa relação entre dimensões	Somente para polímeros de baixo peso molecular (pode se reduzir muito a resistência mecânica e térmica)
Excelente controle dimensional	Equipamentos caros
Baixo tempo de ciclo (variando na casa dos segundos)	Somente processos cíclicos
Alta produtividade	Alto esforço causado ao molde
Processo de molde fechado permite maiores pressões de compactação	Grande esforço residual na peça moldada

Um número crescente de ligas vem sendo disponível para a microinjeção de metal como aço baixa-liga Fe-Ni, aço inoxidável, cobre puro, ligas magnéticas doce de Fe-Co, ligas de expansão controlada Fe-Ni e outras ligas ferrosas (Fu et al., 2005). Aglutinantes à base de Poliacetal ou Poliolefine com cera como a fase polimérica da mistura são os materiais mais usados, já na injeção cerâmica, Óxidos de Alumínio, Óxido de Zircônio (Piotter, 2002).

2.5.3. Microestampagem

É um processo simples com baixo custo, alta repetitividade e alta resolução. Cria formas por deformação mecânica do estampo no material resistivo, que é normalmente uma formulação de monômero ou polímero que possa ser curado por calor ou luz UV. A transferência em larga escala de formas usando microestampagem representa uma técnica com potencial elevado para a produção em massa de uma geração nova de estruturas de densidade elevada e pequenas dimensões.

Há diferentes tipos de microestampagem, mas dois deles destacáveis: Microestampagem de Termoplásticos, onde uma camada fina de resistivo estampável (polímero termoplástico) é aplicada ao substrato por Spin Coating, em seguida, o molde, que pré-defini a forma, é então posto em contato com a amostra, quando aquecido acima da temperatura de transição vítrea do polímero, o molde é pressionado contra a película de polímero derretido, após ser esfriado, o molde é separado da amostra e o resistivo moldado permanece no substrato, o aquecimento do material pode se dar por ultrassom, radiação infravermelha e ar quente; Fotomicroestampagem, o molde é feito normalmente do material transparente como sílica fundida, um resistivo foto curável (UV) é aplicado ao substrato, depois que o molde e o substrato são pressionados um contra o outro, o resistivo é curado à luz UV solidificando (Worgull et al., 2006). A Tab. (5) mostra os prós e contras do processo de microestampagem.

Tabela 5. Prós e contras do processo de microestampagem.

Prós	Contras
Baixa vazão de polímeros	Mais difícil para estruturas de alta relação entre dimensões
Polímeros de alto peso molecular (com melhores propriedades mecânicas e térmicas)	Baixo controle dimensional (devido ao processo de molde aberto)
Processo Simples	Somente estruturas planas
Cíclico ou Contínuo	Grande tensão residual nas partes moldadas
Bom para estruturas simples	Dificuldade para canais profundos múltiplos

2.6. Processo por Feixes de Energia

2.6.1. Ablação Laser

Nesse processo são usados pulsos de laser de elevada potência para vaporizar a matéria de uma superfície, elevando a temperatura a mais de 2000°C.

O processo de ablação ocorre numa câmara de vácuo, em atmosfera controlada, onde se encontra também o substrato, cuja temperatura deve ser elevada, cerca de 700 a 800°C, e uniforme ao longo de toda sua área. É um processo aplicado tipicamente a polímeros, em que a remoção de material se dá através da quebra de ligações químicas entre as macromoléculas, dispersando-se sob a forma de gás ou de pequenas partículas. Essa técnica é bastante útil na obtenção de microcomponentes e/ou microestruturas, necessitando, contudo, de impulsos laser de elevada frequência para minimizar defeitos superficiais devido a fenômenos indesejados de transferência de calor para as áreas adjacentes às processadas. A capacidade atual dessa tecnologia possibilita a ablação de materiais para a obtenção de microestruturas com tolerâncias de $\pm 1\mu\text{m}$ e rugosidade Ra 0,1 μm (Vasco, 2006).

2.7. Aplicações de Técnicas Conjuntas

Muitos dos processos de microfabricação são usados em conjunto para atingir resultados melhores, resultando em conjuntos de processos padrões, como os descritos abaixo.

2.7.1. LIGA

LIGA é o acrônimo alemão para o conjunto de processos, litografia por raio X (x-ray Litographie), galvanização (Galvanoformung), e moldagem (Abformtechnik). LIGA foi uma das primeiras grandes técnicas que possibilitou a manufatura de estruturas de elevada relação de aspecto.

O processo envolve uma grossa camada de material sensível a raio X (de micron a centímetros) exposta a uma radiação de raio X de alta potência e sua posterior revelação, para se chegar a uma estrutura tridimensional. A subsequente deposição do metal, por galvanoplastia, preenche o molde de material resistivo com metal que, após a remoção do resistivo, resulta em estrutura metálica. A forma metálica pode ser o produto final ou servir como inserto de precisão para moldagem de outros materiais. Para peças de plástico moldadas podem, por sua vez, ser produtos finais ou moldes de sacrifício. O molde plástico de sacrifício apresenta a mesma geometria, tamanho, e forma da estrutura de material resistivo original, mas é produzido rapidamente e pode gerar peças de metal em um segundo processo de galvanização ou gerar partes cerâmicas em um processo de colagem de barbotina (Vasco, 2006).

Há, atualmente, três tipos principais de tecnologias LIGA, que diferem no tipo de radiação:

- LIGA raio X, com litografia por raio X.
- LIGA UV, usando litografia por UV ou EUV.
- LIGA-Si, usando DRIE como método de fabricação.

2.7.2. Microfabricação de Superfície e de Volume

A microfabricação de superfície é baseada na deposição e na corrosão de camadas estruturais diferentes no topo do substrato. Como as estruturas são construídas no topo do substrato e não dentro dela, as propriedades do substrato não são tão importantes quanto em microfabricação de volume, e os substratos de silício podem ser substituídos por materiais mais baratos, tais como o vidro ou o plástico. Componentes complicados como partes móveis, podem ser construídas usando camadas de sacrifício. Por exemplo, uma viga em balanço suspensa pode ser construída pela deposição de uma camada estrutural de sacrifício, que será, em um primeiro momento, removida seletivamente nos locais onde a futura barra será depositada. Após a deposição do material estrutural da viga, no topo da camada de sacrifício, finalmente, a camada de sacrifício será removida para liberação da barra, usando-se de corrosão seletiva que não causará nenhum dano ao material estrutural.

A microfabricação de volume define estruturas por corrosão seletiva dentro de um substrato. Dá-se início ao processo com um substrato de silício ou de outros materiais e grava seletivamente nele, usando a fotolitografia para transferência da forma de uma máscara à superfície (Madou, 2001).

2.7.4. Processo UPSAMS

O acrônimo UPSAMS é a sigla em inglês para Ultra Precision Manufacturing of Self Assembled Micro Systems, ou seja, Fabricação Ultraprecisa para Microsistemas Auto-montados.

É baseado na combinação de tecnologias de corte de ultraprecisão e no uso de técnicas de deposição multicamadas e técnicas de remoção análogas àquelas usadas em processos de litografia para fabricação de MEMS. O processo envolve a deposição de camadas estruturais e de sacrifício conjuntamente com a remoção seletiva de material realizada através de operações de usinagem de ultraprecisão, incluindo microfresamento, microtorneamento, microfuração e microretificação. A combinação da deposição de camadas estrutural e de sacrifício com usinagem de ultraprecisão, facilita a fabricação de geometrias 3D com características que não seriam possíveis com qualquer desses processos sozinhos. As principais fases do processo são:

- O material que vai servir de apoio e que será posteriormente sacrificado é depositado sobre uma base;
- É usinada nesse material uma das metades da peça, deixando uma cavidade com o negativo de metade da peça;
- É depositado o material estrutural que vai constituir a peça final;
- O material estrutural vai ser então usinado de forma a obter a outra metade da peça;
- O material de sacrifício que serviu de suporte para a usinagem do material estrutural é removido, deixando apenas a peça final em material estrutural.

O processo UPSAMS permite a obtenção de geometrias complexas, a possibilidade de obter microsistemas já montados e apresenta poucas limitações quanto aos materiais que podem ser utilizados.

O processo é perfeitamente apto para pequenas e médias séries de produção ou para a produção de protótipos, dado que não necessita de máscaras. As técnicas de microusinagem por corte com ferramentas diamantadas usadas nessa estratégia de fabricação conseguem tolerâncias submicrométricas, possibilitando paredes com rugosidades inferiores a Ra 4nm. Como materiais para os componentes, podem ser usados níquel, alumínio, cobre e algumas das suas ligas. Como material de suporte e que será mais tarde sacrificado, pode ser usado o cobre ou uma resina epóxica (Sharon et al., 2003).

3. CONCLUSÕES

O mercado de miniaturização se apresenta com um grande potencial de mercado. Esse trabalho mostrou os processos usados para microfabricação de microcomponentes mecânicos. Em alguns desses processos é possível fabricar peças com geometria complexa, no entanto com duas dimensões. Entretanto, há outros processos onde é possível a obtenção de formas complexa e em três dimensões. Por meio desse trabalho, verifica-se que existem várias aplicações para os processos existentes e que muitos outros processos podem surgir. Podendo ser derivados dos processos já existentes ou inovadores. Cabe aos pesquisadores estudar as limitações do processo, maquinário, materiais e produto e propor novas soluções.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asad, A. B. M. A.; Takeshi Masaki, M.; Rahman, M.; Lim, H. S. e Y.S. Wong, Y. S., 2007, "Tool-based micro-machining". *Journal of Materials Processing Technology*, No. 192 – 193, pp. 204–211.
- Bulger, M., 2005, "Metal Injection Molding", *Advanced Materials & Processes*, No. 3, pp.39-40.
- Cerveira, R. L. L. P., Silva, F. R. D. A. e Batalha, G. F., 2005, "Effect of the miniaturization in the forming process", *Annals of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, Nov., Ouro Preto, Brazil.

- Fu, G.; Loh, N. H.; Tor, S. B.; Tay, B. Y.; Murakoshi, Y. e Maeda, R., 2005, "Injection molding, debinding and sintering of 316L stainless steel microstructures", Applied Physics A - Materials Science & Processing, No. 81, pp. 495–500.
- Imgrund, P. Rota, A.; Petzoldt, F. e Simchi, A., 2007, "Manufacturing of multi-functional micro parts by two-component metal injection moulding", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 33, No. 1-2, pp. 176-186.
- Madou, M. J., 2001, "Fundamental of Microfabrication: The Science of Miniaturization", 2 ed., CRC Press LLC.
- Medis, P. S. e Henderson, H. T., 2005, "Micromachining using ultrasonic impact grinding", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, pp. 1556–1559.
- Piotter, V., 2002, "Microinjection Moulding of Medical Device Components", Businessbriefing : Medical Device Manufacturing & Technology, pp. 63-66.
- Rajurkar, K.; Levy, G.; Malshe, A.; Sundaram, M. M.; McGeough, J.; Hu, X.; Resnick, R. e DeSilva, A., 2006, "Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes", Annals of the CIRP, Vol. 55, pp. 643 – 666.
- Rajurhar, K. e Madou, M., 2005, "Processes. WTEC Panel on Micromanufacturing", Ch 4, Oct.
- Sharon, A.; Biking, A.; Lewis, G. e Zhang, X., 2003, "Manufacturing of 3D microstructures using novel UPSAMS process (ultra precision manufacturing of self-assembled micro systems)". In: IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. MEMS-03 Kyoto. 19-23, pp. 542 – 545.
- Tay, B. Y.; Liu, L.; Loh, N. H.; Tor, S. B.; Murakoshi, Y. e Maeda, R., 2005, "Surface roughness of microstructured component fabricated by μ MIM", Materials Science and Engineering A, No. 396, pp. 311-319.
- Vasco, J. O. C., 2006, "A Micro-Fabricação aplicada ao processo de Micro-Injecção". Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal.
- Watt, F. et al. 2005, "Ion Beam Lithography and Nanofabrication: A Review", International Journal of Nanoscience, Vol. 4, No. 3, pp.269–286.
- Worgull, M.; Hetu, J. -F.; Kabanemi, K. K. e Hecke, M., 2006, "Modeling and optimization of the hot embossing process for micro- and nanocomponent fabrication", Microsystem Technologies, No. 12, pp. 947-952.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído nesse trabalho.

MICROFABRICATION – STUDY OF MANUFACTURING PROCESSES OF MECHANICAL MICROCOMPONENTS

Flávio Pires Oliva, flaviooliva@gmail.com
Luciana Montanari, montanar@sc.usp.br
Jaime Gilberto Duduch, jgduduch@sc.usp.br
Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br
Arthur José Vieira Porto, ajvporto@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Pq Arnold Schimidt, São Carlos - SP, CEP 13566-590

Abstract: *The miniaturization of incorporated components and systems in a lot of different areas of industry, as well as in medical and domestic applications, are becoming a reality in the last two decades. The constant evolution in the microfabrication techniques and materials has been creating new fields of applications, more complex, efficient and ambitious. The mass production of mini, micro and nanosystems highly depends on the replication capacity of these components. This work shows and discusses some techniques of micromanufacturing that are available nowadays, as well as, some microreplication processes. With this objective in mind, an analyze, to the state of the art, of the microfabrication processes and their classifications about its aptitude to make possible the direct attainment of microstructures or the attainment of tools that can be used for replication is made. The technical limitations that some micromanufacturing processes currently possess justify the necessity of this comparative analyze between everything possible to emphasize productivity.*

Keywords: *microfabrication, micromanufacturing, microtechnology, miniaturization.*

5. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.