

LUCAS NAKANO

LUIZ HENRIQUE STEFFEN



PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA: VISÃO GERAL

CURITIBA

2015

LUCAS NAKANO

LUIZ HENRIQUE STEFFEN

PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA: VISÃO GERAL

Trabalho de graduação apresentado à disciplina de Processos de Fundição do curso de Engenharia Mecânica, do Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES | iv |
| RESUMO | v |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 O PROCESSO NUM CONTEXTO HISTÓRICO | 4 |
| 2.1 DESCOBERTA..... | 4 |
| 2.2 DESENVOLVIMENTO..... | 5 |
| 2.3 MODERNIDADE E INDUSTRIALIZAÇÃO..... | 5 |
| 3 O PROCESSO ATUALMENTE | 7 |
| 3.1 FABRICAÇÃO DA MATRIZ..... | 7 |
| 3.2 PRODUÇÃO DO MODELO | 8 |
| 3.2.1 RapidFreezePrototyping (RFP) | 10 |
| 3.3 REVESTIMENTO CERÂMICO..... | 11 |
| 3.4 DECERAGEM | 13 |
| 3.5 VAZAMENTO DO METAL E SOLIDIFICAÇÃO | 14 |
| 3.6 DESMOLDAGEM E ACABAMENTO..... | 16 |
| 3.7 PEÇA MODELO | 17 |
| 4 APLICAÇÕES | 19 |
| 5 ANÁLISE ECONÔMICA | 22 |
| 5.1 VANTAGENS DO PROCESSO..... | 22 |
| 5.1.1 Qualidade da Peça | 22 |
| 5.1.1 Variedade de Metais | 23 |
| 5.1.1 Automação | 23 |
| 5.2 DESVANTAGENS..... | 24 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 5.2.1 Custo e Tempo de Ciclo | 24 |
| 5.2.2 Porosidade | 24 |
| 5.2.3 Limitações do Processo | 25 |
| 6 CONCLUSÕES | 26 |
| REFERÊNCIAS | 27 |

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Processo primitivo de fundição por cera perdida. | 1 |
| Figura 2 - Processo de fundição de precisão simplificado. | 3 |
| Figura 3 - Peça em bronze, aproximadamente 2850 a.C. | 4 |
| Figura 4 - Antigos moldes de pedra, 1850 a.C. | 5 |
| Figura 5 - Máquina de injeção de cera | 7 |
| Figura 6 - Propriedades da B97 com e sem aditivos, comparadas as da B140 | 9 |
| Figura 7 - Confeção de árvore de modelos | 10 |
| Figura 8 - Modelo sendo mergulhado em mistura cerâmica | 12 |
| Figura 9 - Autoclave para deceragem | 14 |
| Figura 10 - Calcinação de moldes..... | 15 |
| Figura 11 - Vazamento de metal líquido..... | 15 |
| Figura 12 - Desmoldagem por vibração | 16 |
| Figura 13 - Turbina com detalhe | 18 |
| Figura 14 - Árvore de peças de joalheria | 19 |
| Figura 15 - Comparação modelo-peça..... | 20 |
| Figura 16 - Peças automotivas produzidas por microfusão..... | 20 |
| Figura 17 - Implantes dentários produzidos por microfusão..... | 21 |
| Figura 18 - Máquina de fundição Dentaurum 230 | 21 |
| Figura 19 - Tabela de comparação de processos de fundição (METALS MARKETING INC., 2015)..... | 22 |
| Figura 20 - Peças de diferentes ligas metálicas | 23 |
| Figura 21 - Representação de braço mecânico manuseando conjunto de árvores...24 | |

RESUMO

PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA: VISÃO GERAL

A fundição por cera perdida tem sido usada desde o início da produção de ferramentas e arte na história humana. Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma análise geral do processo, sendo a natureza dessa análise mais profunda nos aspectos considerados mais importantes.

São desenvolvidos o aspecto histórico e funcionamento do processo moderno de maneira geral, tendo em vista principalmente a fabricação. As peculiaridades e detalhes do processo são apresentados de forma a reunir informações disponíveis atualmente sobre as etapas de produção de molde e modelo até vazamento do metal e acabamento.

O trabalho também ressalta algumas aplicações notáveis do processo: peças artísticas, indústria automobilística e aeroespacial e implantes dentários. Por último, é estabelecida uma análise das vantagens e desvantagens da microfusão para fins de comparação no viés econômico e técnico-científico.

Palavras chaves: fundição por cera perdida, histórico da fundição, modelagem de cera.

1 INTRODUÇÃO

O processo de fundição por cera perdida, também conhecido como fundição de precisão ou microfundição, tem sido amplamente utilizado por centenas de anos. Este trabalho busca obter uma visão geral do processo e suas vantagens e desvantagens, bem como seu histórico, as especificidades de cada etapa do processo, aplicações e análise econômica.

O método primitivo que resultou no conhecido hoje pode ser observado em datas remotas até 5000 a.C., quando o homem começou a produzir ferramentas rudimentares (TAYLOR, 1983). A figura 1 ilustra os primórdios da fundição por cera perdida citados.

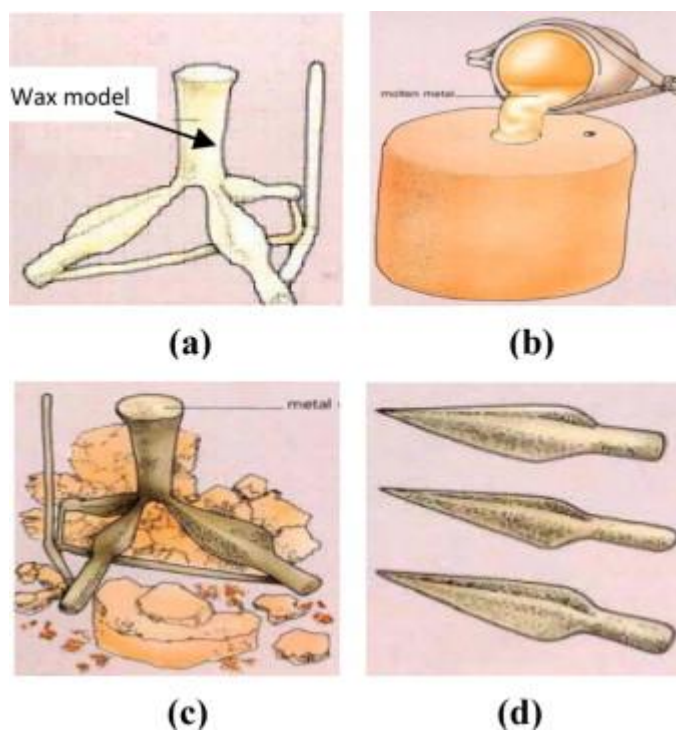


Figura 1 - Processo primitivo de fundição por cera perdida.

O método primitivo passou a ser utilizado para produzir joias e peças de arte durante anos (KOTZIN, 1981). Tais peças foram encontradas em diversas regiões como no Egito, em pirâmides faraônicas; nas Américas Central e do Sul, em tumbas Incas; e na Europa, nas civilizações grega e etrusca.

A tecnologia evoluiu significativamente nos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial (BARNETT, 1988), onde a necessidade de fabricação de peças com alta precisão dimensional e geometria complexa foi suprida pelo processo de fundição por cera perdida.

Desde então, a indústria de fundição de precisão tem expandido devido as diversas vantagens do processo, entre elas, a variedade de produtos possíveis e sua qualidade. A principal desvantagem deste processo é que exige grande quantidade de trabalho manual devido, em sua maior parte, às etapas de preparação do molde de cera e revestimento cerâmico. No entanto, na idade contemporânea, os avanços tecnológicos nos campos da mecatrônica e automação possibilitaram a solução deste problema, contanto que haja investimento inicial.

O processo hoje é empregado na fabricação de diversas peças, de componentes eletrônicos a implantes médicos, de joias a peças de ônibus espaciais. Ele é normalmente limitado somente pelo tamanho e massa da peça, contudo pode produzir fundidos de, por exemplo, 150kg.

A figura 2 exemplifica o processo numa forma simplificada. Em (a) é construído um molde de cera a partir de uma matriz, o qual é fixado a uma árvore de moldes (b). O conjunto é passado por uma mistura cerâmica (c), formando um revestimento da geometria desejada, do qual é posteriormente retirada a cera por aquecimento (d). Assim, pode ser feito o vazamento do metal líquido (e). Quando o mesmo se solidifica dentro do revestimento cerâmico, o último é retirado por sistemas de vibrações mecânicas (f). Para finalizar o produto, as peças são separadas da árvore e os canais de alimentação são removidos (g, h).

O processo em si será analisado e detalhado de forma mais completa no capítulo 3 deste trabalho.

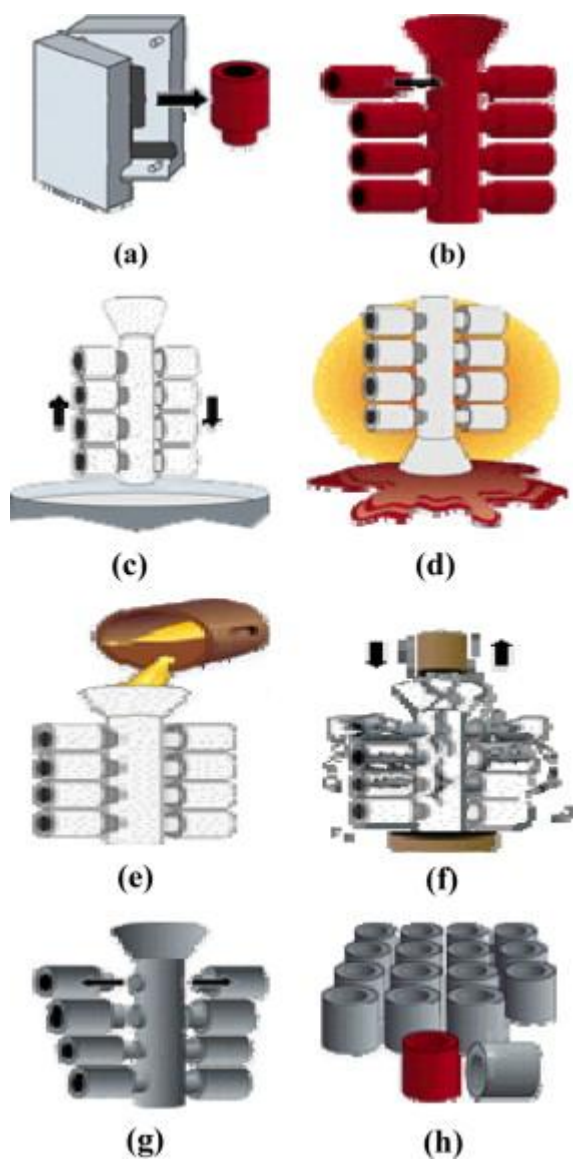


Figura 2 - Processo de fundição de precisão simplificado.

2 O PROCESSO NUM CONTEXTO HISTÓRICO

2.1 DESCOBERTA

A manipulação de metais quentes foi descoberta algum tempo antes de 5000 a.C., em diversas partes do mundo, quase certamente independentemente; artefatos que sugerem a fundição de cobre na produção de peças religiosas e ferramentas já foram encontradas no Irã, Palestina, Síria, e até Tailândia (HUNT, 1980).

O processo de fundição por cera perdida, no entanto, só foi descoberto no quarto milênio a.C., quando alguém teve a brilhante ideia de construir o molde—feito de argila—em volta de uma replica do objeto a ser criado, feita de cera de abelha. Ao esquentar o conjunto, a argila se endurece e a cera derrete, deixando uma cavidade aonde seria despejado o metal. Isto permitiu a produção de estatuetas e símbolos mais detalhados, comparados com pedra esculpida, e mais resistentes, comparados com obras de argila. Inicialmente somente cobre puro era usado, mas eventualmente bronze e ouro se tornaram mais utilizados. De novo, há provas que sugerem a descoberta simultânea e independente em diversas partes do mundo, com peças de idade semelhante sendo encontradas no Oriente Médio, Mesopotâmia, e Sul da Ásia.



Figura 3 - Peça em bronze, aproximadamente 2850 a.C.

2.2 DESENVOLVIMENTO

Foi na Mesopotâmia antiga, atualmente no Irã, que as técnicas de fundição e a metalurgia em geral mais se desenvolveram. Devido à riqueza da região, apesar de ser pobre em metais e minérios, a matéria prima na forma de cobre ou ouro era importada de outras regiões. Figuras complexas de humanos e animais do terceiro milênio a.C. foram encontradas em escavações da região, apesar das imperfeições dos métodos de fundição da época.

Os avanços em metalurgia se difundiram, se espalhando com o tempo a toda a Ásia menor, Oriente Médio, Grécia, Egito, e eventualmente o resto da Eurásia e África. Vale notar que peças fundidas por cera perdida do século 10 foram encontradas em escavações na América Latina, assim como pequenos moldes portáteis para os modelos, que seriam preenchidos com cera derretida.

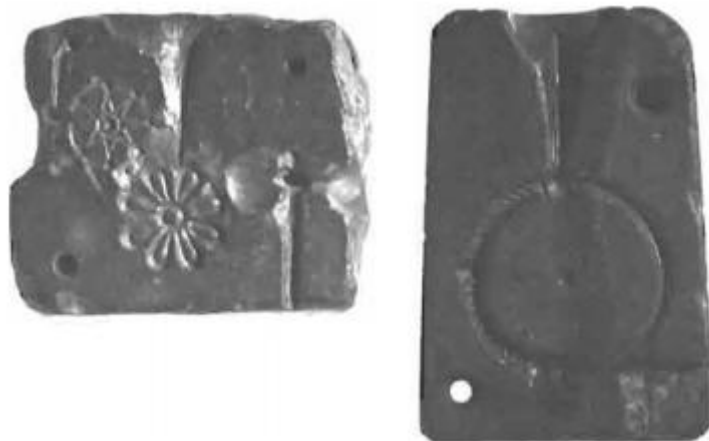


Figura 4 - Antigos moldes de pedra, 1850 a.C.

2.3 MODERNIDADE E INDUSTRIALIZAÇÃO

O processo de fundição achou uso quase exclusivamente para fins artesanais por muito tempo—começou a encontrar seu lugar na indústria só nos meados do século 19, na produção de implantes dentários.

Portanto, durante a segunda guerra mundial, cresceu a necessidade de precisão na manufatura e do uso de ligas especializadas que não poderiam ser utilizadas em métodos de fundição tradicionais, ou que precisariam de muita usinagem. Para esse fim o processo de cera começou a ser utilizado, seu uso continuando após o fim da guerra para a produção de peças metálicas complexas.

3 O PROCESSO ATUALMENTE

Nesta seção será dissertado sobre o processo em si. Cada subseção apresenta uma etapa do processo, juntamente com as análises relacionadas e informações relevantes.

3.1 FABRICAÇÃO DA MATRIZ

A fabricação da matriz é a etapa inicial na produção de uma peça por microfusão. Para fabricá-la, são utilizados processos de usinagem em aços ou alumínio. A matriz dará forma aos modelos (de cera ou outro material), normalmente através de um processo de injeção. A Figura 5 ilustra esse processo.



Figura 5 - Máquina de injeção de cera

As dimensões de uma matriz são estimadas a partir das mudanças dimensionais associadas ao material do modelo, revestimento cerâmico e liga metálica; dos quais a redução de volume da cera é componente com maior contribuição (OKHUYSEN, V. F. et al., 1998). Uma vez que a mudança dimensional

da cera envolve fenômenos complexos, a maioria da literatura técnica a respeito é limitada a estudos experimentais dos fenômenos, obtendo relações empíricas para rápidas aplicações na indústria. Por isso, dimensões de matriz são feitas (a partir de certo ponto) por tentativa e erro até que a tolerância dimensional desejada seja atingida, aumentando o custo do processo.

3.2 PRODUÇÃO DO MODELO

A etapa seguinte é a produção dos modelos. Estes devem possuir a geometria exata da peça final, e a suas dimensões deve ser adicionada uma parcela que leva em conta a retração volumétrica do material do modelo e a retração volumétrica de solidificação do metal. O material do modelo no processo de fundição de precisão varia de acordo as necessidades da peça e condições da fundição produtora, sendo os mais comuns cera, termoplásticos e mercúrio sólido, sendo o mais comum entre esses a cera (PATTNAIK, S. et al., 2012).

No artigo “Properties of natural waxes used in dentistry” (CRAIG, R. G. et al.), publicado no Journal of Dental Research, em 1965, são expostas extensas investigações com diferentes ceras, e foi concluído que o modelo de cera final deve possuir as propriedades listadas a seguir:

1. Possuir o menor coeficiente de expansão térmica possível, para produzir peças com tolerâncias dimensionais estreitas,
2. O ponto de fusão não deve ser muito maior que a temperatura ambiente, para evitar distorções em seções espessas,
3. Possuir resistência mecânica à temperatura ambiente suficiente para ser manuseado sem danos,
4. Possuir bom acabamento superficial, para que o mesmo ocorra na peça a ser produzida,
5. Ter baixa viscosidade para preencher áreas pequenas quando derretida,
6. Ser de fácil remoção do molde após solidificação,
7. Não produzir materiais tóxicos quando aquecido.

Tendo em vista tais características, pode ser selecionada a melhor cera para cada processo. A eficiência do material pode ser ainda melhorada através do uso de aditivos na cera. Entre aditivos utilizados estão colóides, carvão ativado, dodecilsulfato de sódio, glicerina. No artigo “Conversion of investment castings from wax to a pattern wax by chemical agents” (TASCIOGLU, S.; AKAR, N., 2000), foi apresentado o resultado de experimentos sobre propriedades da cera de acordo com aditivo, na forma da tabela da Figura 6. Nela são comparadas uma cera de baixa qualidade (B97) com e sem aditivos com uma cera de alta qualidade (B140). A sigla SR corresponde a acabamento superficial (surface roughness) e CTE a coeficiente térmico de dilatação.

| Exp. no. | Material | SR (µm) | CTE (µm/m °C) | Viscosity (cp) | | | Wetting angle | Penetration (mm × 10 ²) | Tensile strength (kg/cm ²) |
|----------|-------------------------------|---------|---------------|----------------|--------|--------|---------------|-------------------------------------|--|
| | | | | 55 °C | 60 °C | 65 °C | | | |
| | | | | | | | | | |
| 1 | B140 | 0.24 | 348.65 | 90,110 | 45,835 | 17,066 | 100 | 2 | 10 |
| 2 | B97 | 1.35 | 867.7 | 532 | 70 | 24 | 98 | 5.9 | 11.66 |
| 3 | B97 + gum arabic | 0.41 | 186.35 | 800 | 118 | 28 | 99 | 2.8 | 12.66 |
| 4 | B97 + pectin | 0.65 | 288.47 | 1381 | 206 | 31 | 94 | 3.8 | 12.66 |
| 5 | B97 + agar | 1.06 | 224.64 | 1914 | 211 | 55 | 102 | 3.3 | 13.16 |
| 6 | B97 + polyvinylpyrrolidone-40 | 1.28 | 160.01 | 1896 | 301 | 85 | 104 | 2.2 | 13.83 |
| 7 | B97 + alginic acid | 0.77 | 81.92 | 1500 | 200 | 65 | 104 | 5.1 | 14.33 |
| 8 | B97 + cellulose | 0.57 | 101.97 | 1586 | 243 | 79 | 96 | 2.6 | 13.66 |
| 9 | B97 + carboxymethyl cellulose | 1.27 | 186.31 | 1694 | 339 | 102 | 75 | 3.8 | 13.66 |
| 10 | B97 + silicone | 0.31 | 373.81 | 1021 | 123 | 33 | 102 | 5.3 | 11.66 |
| 11 | B97 + tannic acid | 0.52 | 203.17 | 1697 | 184 | 45 | 102 | 0.4 | 14.00 |
| 12 | B97 + saponine | 0.7 | 545.05 | 1107 | 159 | 50 | 102 | 0.8 | 13.66 |
| 13 | B97 + activated charcoal | 0.57 | 161.28 | 1281 | 167 | 52 | 105 | 0.7 | 12.66 |
| 14 | B97 + palmitic acid | 1.02 | 1061.4 | 138 | 30 | 8 | 102 | 4.2 | 14.66 |
| 15 | B97 + sodium dodecyl sulfate | 0.92 | 462.93 | 2396 | 250 | 76 | 102 | 8.4 | 7.33 |
| 16 | B97 + sorbitan oleostearate | 0.55 | 441.73 | 1360 | 124 | 32 | 102 | 10.3 | 16.33 |
| 17 | B97 + glycerine | 0.56 | 128.41 | 1343 | 166 | 42 | 102 | 0.7 | 7.83 |
| 18 | B97 + soybeans | 0.63 | 60.80 | 790 | 129 | 40 | 94 | 4.5 | 14.16 |

Figura 6 - Propriedades da B97 com e sem aditivos, comparadas as da B140

Outras maneiras de melhorar as qualidades e desempenho da cera incluem a mistura entre diferentes ceras e mudanças nos parâmetros de injeção na matriz.

O projeto e geometria do modelo devem incluir canais de alimentação e possíveis canais auxiliares para evitar falhas na peça final. O posicionamento e dimensões desses canais variam de acordo com a geometria da peça e as propriedades da cera utilizada.

Após a produção dos modelos utilizando a matriz, no caso de peças menores é construída uma árvore de modelos, podendo assim continuar o processo de fabricação. A Figura 7 ilustra a confecção de uma árvore de modelos. Nela pode ser observado um canal central em forma de cone, por onde o metal líquido será vazado para atingir os modelos.



Figura 7 - Confecção de árvore de modelos

3.2.1 RapidFreezePrototyping (RFP)

Mesmo com misturas de ceras e aditivos, o uso de cera para a produção de modelos ainda possui alguns dificuldades: retração térmica do modelo, fratura do molde de cerâmica durante a deceragem, entre outros.

Sendo assim, foi desenvolvido um outro método de produção de modelos. Denominado RapidFreezePrototyping, o processo consiste em produzir modelos de gelo, a partir de matrizes de silicone. O modelo é então passado por uma solução refrigerada de silicato de etilo e materiais cerâmicos, e a formação da casca cerâmica ocorre de maneira similar. Depois, o conjunto é deixado à temperatura ambiente para o modelo derreter. O molde cerâmico resultante segue os mesmo processos restantes da fundição de precisão.

Além de atenuar os problemas dos moldes de cera citados, o uso de modelos de gelo tem ainda a vantagem de poder produzir modelos diretamente a partir de modelos tridimensionais de programas CAD, depositando água camada por camada (MING, et. al, 2004).

3.3 REVESTIMENTO CERÂMICO

A próxima etapa da fundição é constituir o revestimento de material cerâmico. O modelo ou árvore de modelos é primeiramente limpa e seca para eliminar qualquer contaminante da superfície do modelo, garantindo aderência do revestimento cerâmico à cera.

O modelo é então mergulhado numa espécie de lama cerâmica e passado por um banho de areia cerâmica. Estes passos podem ser repetidos diversas vezes, até que se forme uma camada com espessura adequada às dimensões do molde e à liga metálica utilizada. A Figura 8 mostra o revestimento do modelo com mistura cerâmica sendo feito de forma manual.



Figura 8 - Modelo sendo mergulhado em mistura cerâmica

Para garantir sucesso na produção da peça, o molde cerâmico (resultado dos processos de revestimento cerâmico e deceragem) deve atingir certos requerimentos:

1. Resistência mecânica para não fragmentar durante o manuseio deceragem e suportar o peso do metal líquido,
2. Alta resistência ao choque térmico, presente na fase de vazamento do metal líquido para dentro do molde,
3. Alta estabilidade química, para evitar reações com o metal líquido, o que comprometeria a peça,
4. Permeabilidade suficiente, para auxiliar que os gases escapem durante o vazamento e solidificação do metal,
5. Condutividade térmica adequada à microestrutura desejada do metal.

Para atingir tais requisitos, é importante adequar a composição da mistura cerâmica. Seus componentes principais são areia de sílica, silicatos de alumínio, e zircônia, além de aglomerantes como sílica coloidal e outros ingredientes para dar fluidez (no caso da mistura onde se mergulha os modelos).

Outro fator a ser considerado na escolha da composição e espessura do revestimento é a composição da liga metálica a ser utilizada. Ligas de alumínio, por exemplo, possuem baixa densidade e baixa temperatura de vazamento (devido ao seu baixo ponto de fusão se comparado a outros metais), portanto não exige uma parede muito espessa do revestimento. Já no caso de superligas, o principal problema é alta reatividade dos componentes dessas ligas com os materiais cerâmicos do revestimento. Apesar de existirem pesquisas recentes a respeito, essa continua a ser a maior barreira para a produção de peças de superligas por fundição de precisão.

3.4 DECERAGEM

Nesta etapa da fundição é almejada a retirada da cera (ou material constituinte do modelo) do conjunto modelo-revestimento, tendo como produto final uma casca de material cerâmico que será o molde para vazamento do metal líquido. A cera é coletada e posteriormente tratada para remover impurezas, podendo assim ser reutilizada na fabricação de mais modelos.

O método mais comum utilizado para a retirada da cera é o aquecimento em autoclaves, fazendo com que a cera derretida deixe o molde por ação da gravidade. Uma autoclave industrial é uma câmara na qual é injetado vapor de água a altas temperaturas, como o exemplo da Figura 9. Modelos menores são utilizados regularmente para esterilização de equipamentos médicos. O método tem dois principais problemas: a cera nem sempre é completamente retirada do molde, e a cera coletada contém impurezas provenientes do vapor da autoclave.



Figura 9 - Autoclave para deceragem

Outro método que foi testado no passado era o forno de combustão. Consistia em elevar uma câmara a altas temperaturas através da combustão de gases para fundir a cera, e em sequência injetar um gás inerte como dióxido de carbono para extinguir as chamas. Apesar de ter algumas vantagens em relação ao aquecimento em autoclave, o método tinha custo mais elevado e por isso não teve popularidade.

Hoje, tem aumentado o número de indústrias que utilizam um terceiro método. Tendo em vista as desvantagens do método com autoclaves e as propriedades físico-químicas das ceras utilizadas, constatou-se possível utilizar micro-ondas na deceragem. Apesar de substituir uma autoclave por um forno de micro-ondas industrial requer um investimento considerável, à longo prazo o processo é mais interessante por economizar tempo e energia, além de ter menor impacto ambiental.

3.5 VAZAMENTO DO METAL E SOLIDIFICAÇÃO

Após a deceragem, o molde cerâmico é aquecido a temperaturas que variam entre 870°C e 1100°C. Além de remover umidade ou cera residual, esse aquecimento, também conhecido como calcinação, induz a formação de correntes de convecção de dentro para fora do molde, o que evita a presença de gases no momento do vazamento e conseqüentemente a formação de bolhas e poros no produto final. A Figura 10 ilustra a calcinação de alguns moldes.



Figura 10 - Calcinação de moldes

A liga metálica em estado líquido é então vazada para dentro do molde. Devido à temperatura do metal e do molde, normalmente a ação da gravidade e o posicionamento dos canais auxiliares e de alimentação é suficiente para garantir o preenchimento de todo o molde. No entanto, em alguns casos onde se encontram paredes muito finas ou regiões de difícil acesso na peça são utilizados outros métodos para o vazamento do metal, como centrifugação ou pressão. A Figura 11 mostra o vazamento de metal por gravidade.

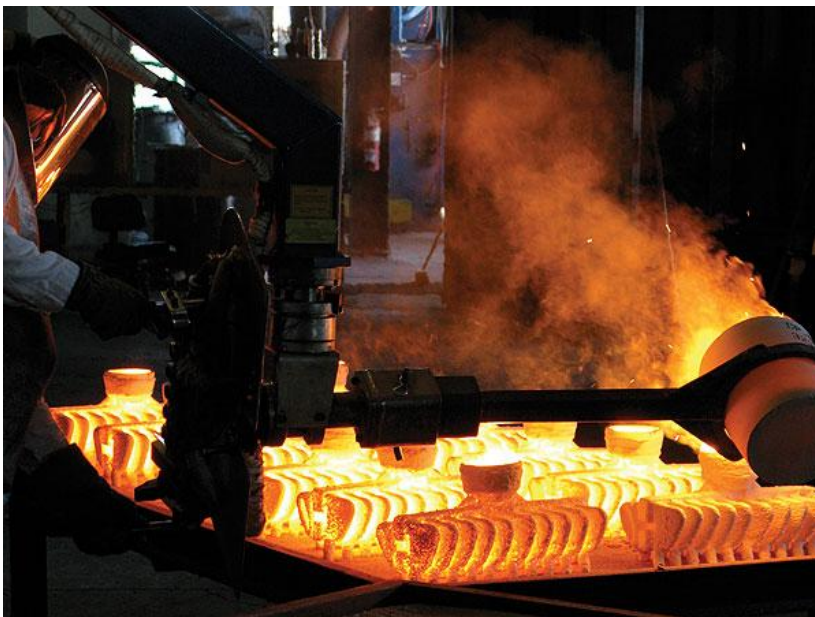


Figura 11 - Vazamento de metal líquido

Parâmetros como temperatura do metal fundido e ângulo de vazamento devem ser dimensionados a fim de obstar erosão e falha do molde, além de garantir regime não turbulento.

Após o vazamento, o metal passa por um processo de solidificação. Aqui é importante notar que existe controle sobre a taxa de resfriamento, uma vez que esta definirá a microestrutura do material, fator de extrema importância que tem influência nas propriedades mecânicas da peça. Por isso, são dimensionados temperatura do metal no vazamento, temperatura do local onde será resfriado, espessura da parede do molde, entre outros.

3.6 DESMOLDAGEM E ACABAMENTO

Feito o resfriamento do metal, o conjunto de metal e molde cerâmico passa pela desmoldagem. Essa etapa consiste em separar a peça da parte cerâmica, e normalmente são utilizados jatos de alta pressão, vibrações mecânicas ou banhos químicos. A Figura 12 mostra uma peça após desmoldagem por vibração mecânica.



Figura 12 - Desmoldagem por vibração

O processo normalmente é longo e de custo considerável. O problema está no fato de, durante as etapas anteriores ao vazamento do metal (incluindo o vazamento) é necessária alta resistência mecânica do molde cerâmico, o que se torna um empecilho durante a desmoldagem. Outro fator a ser considerado é a transformação do dióxido de silício em β -cristobalita. Quando exposto a temperaturas superiores à cerca de 1000°C, o dióxido de silício, componente do molde cerâmico, forma β -cristobalita, o que aumenta a tensão de ruptura do molde (PATTNAIK et. al; 2012). No entanto, moldes com alto teor de dióxido de silício possuem este problema de maneira atenuada na fundição de metais como alumínio e magnésio, por possuírem temperatura de vazamento insuficiente para a formação de grandes quantidades de cristobalita.

Tendo o problema em mente, foram desenvolvidos métodos para facilitar a remoção do molde: adição de sal alcalino na composição do molde e hidratação do molde antes da desmoldagem (BATLLO, 2003).

Depois de retirado o molde cerâmico, as peças passam por acabamento, no qual são retirados os canais de alimentação e auxiliares com ferramentas de corte (que podem ser posteriormente reciclados) e a superfície resultante do corte passa por máquinas de abrasão para dar o acabamento desejado. Aqui nota-se a importância do posicionamento dos canais no projeto de fundição da peça. Uma vez que o processo de microfusão fabrica peças de bom acabamento superficial, é economicamente inviável ter altos custos com usinagem das superfícies após a fundição da peça. Por isso, os canais devem ser posicionados em superfícies que não necessitem de baixíssima rugosidade.

As peças podem ainda passar por tratamentos térmicos e inspeções dimensionais antes de serem enviadas ao consumidor.

3.7 PEÇA MODELO

A turbina de um turbo é um exemplo ideal de uma peça que deve idealmente ser manufaturada através do processo de cera fundida. Ela possui tolerância dimensional extremamente restrita, devido a simetria necessária da peça, sem a qual não é possível manter estabilidade nas velocidades de rotação altíssimas na

qual o turbo funciona (de até 150.000 rpm) sendo que vibrações dificultam a suspensão em óleo, a otimização do fluxo de ar e de peso da turbina, pois as seções extremamente finas possibilitadas pela cera fundida produzem turbinas extremamente leves, e com o perfil complexo necessário para o funcionamento ideal.

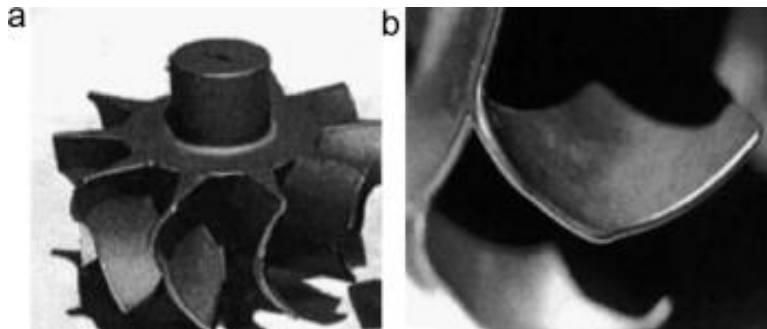


Figura 13 - Turbina com detalhe

4 APLICAÇÕES

O processo de fundição de precisão tem uma enorme gama de aplicações, de forma que atinge quase qualquer setor industrial tecnológico em algum ponto. Nessa seção serão analisadas e ilustradas algumas das aplicações mais notáveis do processo.

Como citado anteriormente, uma das aplicações mais antigas da fundição por cera perdida é a produção de joias e peças de arte em geral. O processo é utilizado até hoje para a fabricação dos mesmos, com algumas diferenças notáveis como: menor temperatura de vazamento devido ao baixo ponto de fusão dos metais como ouro e prata, processos de remoção de molde cerâmico mais cuidadosos para evitar trincas ou riscos, entre outros. A Figura 14 mostra uma árvore pronta para o vazamento da prata, enquanto a Figura 15 compara um modelo de cera com o produto final.



Figura 14 - Árvore de peças de joalheria



Figura 15 - Comparação modelo-peça

A produção de peças de joalheria pelo processo de fundição de precisão se beneficiou com uma tecnologia relativamente recente: a impressão 3D. O modelo de cera na esquerda da Figura 15 foi produzido utilizando essa tecnologia. Como exemplo, a empresa Solidscape produz impressoras 3D específicas para a produção de modelos para a fundição por cera perdida.

Outra aplicação notável da microfusão é na indústria automobilística. A capacidade do processo de produzir peças de geometria complexa tem possibilitado projetos com redução de peso e material utilizado. Além disso, a possibilidade de produzir espaços é ótima para o posicionamento de sensores e outros componentes de sistemas eletrônicos complexos encontrados nos transportes atualmente. Essa vantagem tem sido usada também pela indústria aeroespacial.

A indústria automotiva e de transportes utiliza o processo para produzir diversas peças, entre elas juntas de direção, coletores de escape, bombas de água, etc. A Figura 16 ilustra alguma das peças produzidas.



Figura 16 - Peças automotivas produzidas por microfusão

Por poder produzir peças de geometria complexa, especialmente de pequenas dimensões, e de excelente acabamento superficial, a fundição por precisão tem sido usada para a produção de próteses dentárias. As ligas metálicas utilizadas mais comuns são as de titânio por serem biocompatíveis, ter baixa condutividade térmica e baixa massa específica (ZAVANELLI, et. al, 2003). Devido ao material e as dimensões das peças, o processo, apesar de seguir o mesmo princípio, sofre algumas alterações, existindo até máquinas especializadas para tal no mercado.

A Figura 17 mostra implantes dentários produzidos por fundição por cera perdida, e a Figura 18 mostra uma das máquinas especializadas citadas no parágrafo anterior.



Figura 17 - Implantes dentários produzidos por microfundição



Figura 18 - Máquina de fundição Dentaurum 230

5 ANÁLISE ECONÔMICA

Nesta seção será feita uma breve análise econômica do processo, tendo em vista as vantagens e desvantagens da fundição por cera perdida e como estas afetam o custo da operação. É interessante também traçar uma comparação com outros processos de fundição, como é feito simplificadaamente na tabela da Figura 19.

| <i>Click on process header link to see more information</i> | Die Casting | Investment Casting | Permanent Mold | Sand Casting | No Bake | Shell Casting | Forging | Powdered Metal | Stamping/ Fine Blank |
|---|-------------|--------------------|----------------|--------------|------------|---------------|------------|----------------|-------------------------|
| Surface Finish | Excellent | Excellent | Very Good | Fair | Good | Good | Good | Excellent | Excellent |
| Complexity/ Design Freedom | Very Good | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Fair | Fair | Fair |
| Intricacy | Excellent | Excellent | Very Good | Fair | Very Good | Very Good | Fair | Excellent | Excellent |
| Choice of Material | Narrow | Very Wide | Narrow | Wide | Wide | Wide | Very Wide | Wide | Narrow |
| Finish Allowances | Least | Least | Average | Most | Most | Average | Most | Least | Least |
| Lead Time/ Tooling | Long | Medium | Long | Short | Medium | Long | Long | Long | Long |
| Lead Time/ Production | Average | Short | Average | Average | Average | Average | Long | Average | Average |
| Pattern/ Tooling Cost | High | Medium | Med. High | Low | Medium | High | Med. High | Med. High | Med. High |
| Raw Piece Unit Cost | Low | Med. High | Low Medium | Low | Low Medium | Low Medium | Low | Low | Low |
| Net Shape/ Near Net Shape Capability | High | High | Medium | Low | Low Medium | Medium | Low Medium | High | High |
| Cost Effective Low Volume Production | No | Yes | No | Yes | Marginal | No | No | No | No |

Figura 19 - Tabela de comparação de processos de fundição (METALS MARKETING INC., 2015)

5.1 VANTAGENS DO PROCESSO

5.1.1 Qualidade da Peça

O processo de cera perdida produz peças com excelente qualidade superficial, e sem linhas de separação entre o que seriam as duas metades do molde em outro processo. Ele também pode ser utilizado para peças com seções muito finas, com espessuras de até 0.4mm já tendo sido produzidas; e formatos extremamente complexos, dificilmente produzidos por usinagem. O processo de cera

perdida permite tolerâncias dimensionais extremamente restritas, com valores abaixo de 0.1mm sendo possíveis. Isso reduz eventuais custos em polimento e usinagem, que seriam necessários para outros métodos de fundição. Estas propriedades fazem esse processo ideal na produção de, por exemplo, obras artísticas em bronze.

5.1.2 Variedade de Metais

Quase qualquer liga pode ser utilizada no preenchimento de um molde de cera perdida, desde ligas de ouro ou prata na produção de joias, até titânio para partes de ônibus espaciais e satélites. Em escavações arqueológicas já foram encontradas peças fundidas em cobre, bronze, ligas de metais preciosos. Hoje a maioria das peças produzidas industrialmente é de aço ou alumínio. A Figura 20 ilustra peças de diferentes ligas metálicas produzidas por microfusão.



Figura 20 - Peças de diferentes ligas metálicas

5.1.3 Automação

A maioria do processo de fundição por cera perdida—notavelmente a produção do molde cerâmico e do modelo de cera—pode ser automatizado, reduzindo assim o custo e tempo de produção para lotes maiores.



Figura 21 - Representação de braço mecânico manuseando conjunto de árvores

5.2 DESVANTAGENS

5.2.1 Custo e Tempo de Ciclo

Este é um dos processos de fundição mais caros, com ciclos de produção bastante longos comparado com outros processos. Isto faz com que o custo da produção cresça consideravelmente com o aumento do número de peças. O preço unitário deste processo é maior do que por injeção ou areia verde, mas o equipamento necessário tende a ser mais barato quando comparado ao do primeiro.

5.2.2 Porosidade

Devido a pouca permeabilidade do molde cerâmico, peças produzidas pelo processo de cera perdida frequentemente possuem porosidade e bolhas de gás, o que pode resultar em piores propriedades mecânicas e defeitos de aparência. Esses problemas podem ser amenizados com enchimentos a vácuo ou com o pré-aquecimento do molde, mas com o aumento significativo do custo de produção da peça.

5.2.3 Limitações do Processo

Peças produzidas por cera perdida são tipicamente limitadas a pesos até 30kg e tamanhos relativamente pequenos devido a natureza do molde, mas peças maiores podem ser produzidas excepcionalmente. Furos com diâmetros abaixo de 1,6mm e profundidade acima de 1,5 vezes o diâmetro também não são possíveis no processo convencional.

6 CONCLUSÃO

Desde sua descoberta, o processo de fundição por cera perdida é o principal processo utilizado na criação de estatuetas, joias, e outros itens artísticos e religiosos de metal; e até bustos e outros objetos maiores. Para esses fins, seus defeitos são desconsideráveis em muitas situações, e ele permite a produção de perfis extremamente detalhados, com excelente fidelidade ao modelo e qualidade superficial.

Hoje, ele continua sendo o método de escolha para artistas e escultores, mas acha sua finalidade principal na produção de peças complexas, com detalhes ou componentes difíceis ou impossíveis de produzir por outro método sem usinagem; com tolerância dimensional rígida ou seções estreitas; para retirar a necessidade de usinagem posterior e assim reduzir o custo, devido a excelente qualidade superficial das peças resultantes desse processo; e para o uso de ligas cuja composição impossibilita a aplicação de outros métodos de fundição.

Devido ao alto custo de usinagem em relação à fundição, e a necessidade cada vez maior de precisão nos componentes mecânicos cada vez menores e de geometrias mais complexas, este processo continua sendo a primeira opção em relação à viabilidade econômica das outras alternativas, cujo custo não tem projeção de diminuir. Além disso, a associação da fundição de precisão com novas tecnologias como impressão 3D e RFP demonstra uma constante evolução do processo. Seis mil anos de uso e desenvolvimento e excelentes resultados são convincente prova de que a fundição por cera perdida continuará a ser empregada por um longo período.

REFERÊNCIAS

- THE LIBRARY OF MANUFACTURING. **InvestmentCasting**. Disponível em: <http://thelibraryofmanufacturing.com/investment_casting.html>. Acesso em 1 jun. 15.
- SIAS, F. R. **Lost-waxcasting: Old, New, andInexpensiveMethods**. Woodsmere Press, 2006.
- HUNT, L. B. **The longhistoryoflostwaxcasting**. GOLD Bulletin, v.13, n.2, p.63-79, Jun. 1980. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/BF03215456>> Acesso em 3 jun. 15.
- PHATINAIK, S.; KARUNAKAR, D. P.; JHA, P. K. **Developments in investmentcastingprocess - A review**. JournalofMaterialsProcessing Technology, v.212, n.11, p.2332-2348, Nov. 2012.
- SABAU, A. S.; VISWANATHAN, S. **Material properties for predictingwaxpatternrdimensions in investmentcasting**.Materials Science andEngineering: A., v.362, n.1, p.125-132, Dec. 2003.
- CIREX FOUNDRY. **CIREX: LostWaxInvestmentCasting**. Disponível em: <<http://www.cirexfoundry.com/lost-wax-investment-casting/>>. Acesso em 1 jun. 15.
- POMPEI, M. **Fundição por cera perdida**. Disponível em: <<http://www.joia-e-arte.com.br/cera.htm>>. Acesso em 1 jun. 15.
- CUNHA, E. S.; SILVA, N. R. J. **O processo de fundição por cera perdida na joalheria**. Disponível em: <<http://www.palermo.edu/dyc/congreso-latino/posters/19.pdf>>. Acesso em 1 jun. 15.
- ZAVANELLI, R. A., et. al. **Processo de fundição do titânio e de suas ligas na área de reabilitação oral**. Disponível em: <http://www.dtscience.com/index.php/Prosthodontics_PCL/article/download/357/331>. Acesso em 3 jun. 15.

