

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME KOCH
LUCAS VINICIUS HOFFLING RIBAS PINTO

FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

CURITIBA
2015

GUILHERME KOCH
LUCAS VINICIUS HOFFLING RIBAS PINTO

FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

Trabalho apresentado para a disciplina de Tecnologia em Processos de Fundição do curso de Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ramon Cortes Paredes

CURITIBA

2015

RESUMO

A proposta desse trabalho é discutir de forma dinâmica, organizada e clara o processo de fundição por cera perdida. A ideia é dissertar sobre a inteiridade do processo, sua história, desde o seu início, quase 6 mil anos atrás até os dias de hoje; como funciona e como é feita cada etapa, incluindo um projeto de uma peça fabricada pelo processo, fixando o porquê da escolha da cera perdida para a produção de tal peça; discutir sobre as vantagens e desvantagens que o processo oferece, quais tipos de peças se beneficiam, quais peças não são próprias, quais tipos de metais podem ser utilizados, qual a composição da cera utilizada, entre outras informações.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 HISTÓRIA	7
2.1 INÍCIO	7
2.2 RELAÇÃO COM A ARTE	7
2.2.1 MESOPOTÂMIA	8
2.2.2 EGITO	9
2.3 IDADE MÉDIA	10
2.4 RENASCIMENTO	11
2.5 MODERNIDADE	12
3 MATERIAIS	13
3.1 CERAS	13
4 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO	15
5 PROCESSO	16
5.1 MATRIZ	16
5.2 FABRICAÇÃO DO MODELO	16
5.3 MOLDAÇÃO	17
5.4 DECERAGEM	19
5.5 CALCINAÇÃO	20
5.6 VAZAMENTO DO METAL	21
5.7 DESMOLDAGEM	21
5.8 REBARBAGEM	22
5.9 JATEAMENTO	23
5.10 ACABAMENTO	23
6 VANTAGENS E DESVANTAGENS	25

6.1 VANTAGENS	25
6.2 DESVANTAGENS	25
7 PARÂMETROS DE PRODUÇÃO	27
8 PROJETO	30
9 CONCLUSÃO	33
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

Há mais de 6 milênios, a humanidade tem trabalhado com metais fundidos. Inicialmente, o trabalho com esses metais líquidos tratava-se de uma questão de sobrevivência. Com o passar dos anos, em confluência com o desenvolvimento da humanidade, também desenvolveu-se o trabalho com metais fundidos. Com base nisso, um dos primeiros processos de fundição que foi explorado pelo homem, foi a fundição por Cera Perdida, também tratada como Microfusão. Assim como ainda pode ser observado, esse processo foi e é bastante explorado para produção de arte, por causa da alta capacidade de captar detalhes de um molde, com bastante precisão. Característica tal do processo, que chamou atenção da metalurgia, a qual usufrui intensamente da Microfusão para produção de peças com necessidade de alto detalhamento, precisão dimensional e qualidade superficial.

Seguindo esse viés da metalurgia, que necessita das vantagens do processo de fundição por Cera perdida para a produção de peças, este trabalho abordará a rica história desse processo, bem como, todo processo de fabricação de peças, destacando características vantajosas e pontos falhos. Finalizando com um projeto de fundição de uma peça, para exemplificar todas as teorias citadas no decorrer do texto.

2 HISTÓRIA

A história da cera perdida extremamente rica e cheia de cultura, graças à importante relação que tem com a arte, que sempre andou lado a lado com esse inovador processo de fundição.

2.1 INÍCIO

Um dos grandes avanços históricos da humanidade, que ocorreu aproximadamente 6 mil anos atrás, foi a descoberta de que metais poderiam ser derretidos e moldados em diferentes formas. Os primeiros indícios de fundição vêm do Oriente, com evidências de fundição de cobre na Síria, Irã, Palestina e até Tailândia.

A fundição, então, ocorria em moldes simples de pedra ou argila, e era usado para fabricar ferramentas simples, para uso cotidiano. O processo foi evoluindo conforme a necessidades da criação de ferramentas mais elaboradas aumentava. No meio de todo esse avanço e constantes inovações, surgiu a ideia de usar um modelo esculpido em cera de abelha, cercá-lo com argila, esquentá-lo até que a argila endurecesse e a cera derretesse. O resultado foi a possibilidade da criação de objetos e ferramentas muito mais complexos, graças à maior liberdade de forma que a escultura em cera permitia, se comparada com os rudimentares moldes de pedra utilizados anteriormente.

2.2 RELAÇÃO COM A ARTE

Desde sua origem, a fundição de metais sempre andou de mãos dadas com a arte. Há séculos estátuas, esculturas, figuras religiosas, jóias, entre outros adornos vêm sido produzidas a partir de metais derretidos, através da fundição, especialmente com o processo de cera perdida.

As grandes vantagens, assim como os motivos que tornam o método da cera perdida tão bom na criação de tais obras de arte, são a precisão e qualidade

que o processo oferece, possibilitando a reprodução de formas muito mais complexas do que os outros processos de fundição.

O resultado dessa mistura de metalurgia e arte são peças bem trabalhadas, valiosas, duradouras e cheias de história. Muitas dessas obras de arte serviram e ainda servem como uma janela para o passado, uma possibilidade de entender como funcionava o mundo alguns séculos atrás, e hoje fazem parte de museus em todos os continentes.

2.2.1 MESOPOTÂMIA

Os mesopotâmicos apresentaram extrema habilidade na arte da metalurgia, exibindo grandes avanços no processo de cera perdida.

Um dos exemplo mais antigos da utilização da fundição por cera perdida na Mesopotâmia é um pequeno burro selvagem feito de eletro (Figura 1), uma liga natural de ouro e prata, que fazia parte da carruagem da Rainha Puabi, datado em aproximadamente 2600 B.C.

Figura 1 – Burro selvagem feito de eletro



Outro exemplo da habilidade dos mesopotâmicos é essa miniatura de um rei Sumério dirigindo uma biga sendo liderada por 4 burros selvagens (Figura 2), de aproximadamente 2850 B.C. feita totalmente em cobre.

Figura 2 – Biga do rei Sumério feita em cobre



2.2.2 EGITO

A tecnologia de fundição não era tão avançada no Egito quanto na Mesopotâmia, mas a partir de cerca de 1500 B.C., com um repentino avanço nas técnicas do processo, possivelmente com a ajuda de imigrantes vindos de outras partes do oriente, a prática da fundição por cera perdida foi ficando cada vez mais evidente, com a produção de grandes anéis de sinete de ouro e pequenas estatuetas.

Um exemplo da utilização da cera perdida no Egito é essa pequena figura de Amenophis III (Figura 3), com aproximadamente 5 centímetros de altura, inteiramente sólida, feita de ouro.

Figura 3 – figura de Amenophis III feita em ouro

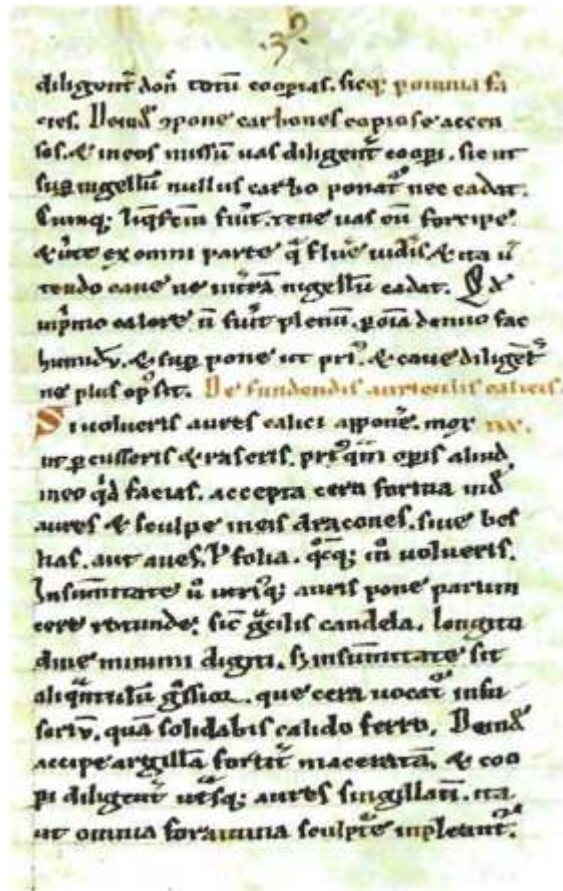


2.3 IDADE MÉDIA

Na Idade Média, alguns séculos após sua descoberta, a prática da fundição por cera perdida ganha ainda mais destaque entre os processos de fundição. Grande parte dessa popularidade se deve a força que a igreja possuía nessa época. Objetos como jóias, cálices, entre outros ornamentos metálicos eram muito populares em igrejas, portanto sempre havia espaço para metalúrgicos na comunidade. A grande demanda por profissionais da área trouxe competição, e com isso, uma definitiva evolução na fundição.

No século 12, um específico e rico estilo envolvendo ornamentos de metal se desenvolveu nos mosteiros, e com isso veio a primeira descrição detalhada do processo de fundição por cera perdida, escrita por um monge alemão sob o pseudônimo de Teófilo, um habilidoso metalúrgico da época. Seu manuscrito (Figura 4) foi escrito entre os anos de 1110 e 1140.

Figura 4 - Página do Manifesto de Teófilo



2.4 RENASCIMENTO

O Renascimento, no final do século 14, trouxe de volta a prática da criação de esculturas feitas de mármore, pedra, ou muitas vezes metais em escala real. Essas esculturas - a maioria representando figuras humanas, mas ocasionalmente também representando animais e monstros ou figuras grotescas - eram na maior parte das vezes feitas de bronze (ouro também era usado, mas não era muito comum), mas todas feitas pelo processo de cera perdida.

Grandes escultores da época, como Donatello, começaram a produzir estatuetas de bronze, que rapidamente se tornaram itens muito procurados por colecionadores da época. Outros passaram a usar tais objetos como presentes diplomáticos.

Já no final do período, outra obra tratando do assunto foi publicada por Benvunuto Cellini, em Florença, 1568. O autor faz várias referências às várias modificações do processo desde sua criação e sua evolução pela idade média.

Uma das grandes obras de Cellini, foi a escultura de bronze Perseu com a Cabeça da Medusa, feita em 1545 (Figura 5).

Figura 5 – Perseu com a Cabeça de Medusa



2.5 MODERNIDADE

A grande transformação de um processo manual para um processo mecanizado e automático veio somente no início do século 20, e foi surpreendente no setor odontológico. Em 1907, W. H. Taggart, um dentista de Chicago conseguiu com sucesso introduzir ouro num implante, com a ajuda de um dispositivo de gás comprimido para forçar o ouro a entrar na cavidade deixada pela cera.

3 MATERIAIS

O processo de fundição por cera perdida pode ser utilizado com quase todos os materiais ferrosos e não ferrosos. No caso de ferrosos, é mais comum a utilização de aços carbono, aços de ferramenta, ligas de aço, assim como ligas aço inoxidáveis dos tipos 15-5PH e 17-4PH. Para o caso de não ferrosos, a maior parte de materiais de alumínio, cobre e magnésio podem ser fundidos, sendo alumínio o mais comum.

É comum, também, que empresas que trabalham na área atualmente forneçam uma lista de metais e ligas que podem ser fundidas em suas máquinas e aparelhos.

A empresa americana Thompson Investment Casting, por exemplo, consegue fundir aços inoxidáveis, como os de cromo e níquel, aços baixo carbono, aços para ferramentas, cobre e ligas de cobre. Outros metais e ligas podem ser também utilizados, mas apenas mediante solicitação.

Outra empresa, a Signicast, trabalha com baixas ligas e aços carbono, como o 8620 e o 4140, aços inoxidáveis das séries 300 e 400, do tipo 17-4PH, aços de ferramentas, ligas de níquel, ligas de cobalto, e alumínio. A empresa não trabalha, entretanto, com latão, bronze, ou titânio.

3.1 CERAS

A cera é um dos mais antigos materiais termoplásticos conhecidos pelo homem. Inicialmente era utilizada a cera de abelha, mas atualmente, o termo “cera” se aplica a qualquer substância que tenha propriedades de cera.

Misturas modernas de cera de fundição são compostos complexos contendo inúmeros componentes, tais como:

- Ceras naturais de éster
- Cera de hidrocarboneto
- Cera sintética
- Resinas naturais e sintéticas
- Água

Os primeiros três itens, assim como algumas das resinas são compostos alifáticos. Já outros tipos de resinas, são compostos aromáticos.

O comprimento e a complexidade das cadeias carbônicas influencia fundamentalmente as propriedades da cera resultante. Assim, várias variantes são formuladas para atender diferentes requisitos de fundição e propriedades, tais como dureza, ponto de fusão, viscosidade, expansão, etc.

A complexa composição de produtos de cera atual se manifesta num comportamento físico diferente do comportamento de outras substâncias. Diferentemente de outros compostos químicos homogêneos, a cera não derrete imediatamente no aquecimento, mas passa por diferentes estados intermediários (Figura 4).

Figura 6 – Estados intermediários por quais a cera passa (Sólido, Plástico, Semi-Plástico, Semi-Líquido, Líquido)



4 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO

Devido às suas grandes vantagens sobre outros processos, a fundição por cera perdida tem um lugar bem definido na indústria.

Um dos destaques vai para as indústrias de equipamentos aeroespaciais e de geração de eletricidade. O processo permite a criação de lâminas de turbina com formas bastante complexas, assim como sistemas de refrigeração.

O processo também é muito utilizado para a fabricação de equipamentos militares, incluindo a produção de armas de fogo e peças.

Outros setores muito beneficiados pelo uso da cera perdida incluem os setores agrícola e industrial (assim como outros setores que utilizam equipamentos pesados), o setor de transportes, como a indústria automotiva – uma ampla variedade de peças podem ser fabricadas com facilidade pelo processo – e a indústria de veículos marinhos – especialmente na fabricação de propulsores de barcos. A área de saúde também é bastante beneficiada, visto que a cera perdida garante a fabricação de diversos dispositivos médicos em larga escala, por um custo relativamente barato. Além de todos esses setores da indústria beneficiados, podemos também voltar aos primórdios do uso da cera perdida, já que a produção de ferramentas e equipamentos de construção ainda é feita pelo mesmo processo (obviamente com mudanças e aprimorações desde seu início, como já foi visto).

5 PROCESSO

O processo de fundição por Cera Perdida, também conhecido como Microfusão, consiste basicamente na obtenção de um molde refratário, o qual terá metal líquido vazado no seu interior, sendo esse molde obtido a partir de um modelo em cera, o qual é fabricado em uma matriz. Após a confecção do molde, a cera do modelo é derretida e então torna-se possível o vazamento de metal líquido no interior do molde. Após a solidificação do metal, retira-se a peça do molde, para que seja realizado o acabamento e, assim, seja obtida a peça da forma requerida. Esse processo pode ser dividido em dez etapas, sendo elas: matriz, fabricação do(s) modelo(s), moldação, deceragem, calcinação, vazamento do metal, desmoldagem, rebarbagem, jateamento e acabamento.

5.1 MATRIZ

Para a obtenção do modelo, o qual servirá de base para obtenção do molde de material refratário de granulometria fina é necessária a fabricação de uma matriz, a qual é uma “caixa” metálica, com o formato do objeto no seu interior, que será responsável por dar à cera a forma da peça a ser obtida no final do processo de fundição.

Essa matriz, por sua vez, é fabricada por usinagem, o que conferirá ótima qualidade superficial e ótima tolerância dimensional ao modelo e conseqüentemente à peça fabricada. Para que essa qualidade seja atingida, é importantíssimo que no projeto dessa matriz leve-se em conta a contração da cera durante o resfriamento e também do metal futuramente. No entanto, outra consequência da obtenção do modelo de forma tão refinada é o encarecimento do processo de fundição em comparação com outros, como por exemplo, o processo de fundição por areia verde, que apesar de não garantir as mesmas tolerâncias dimensionais e qualidade superficial da Microfusão, tem um preço consideravelmente menor.

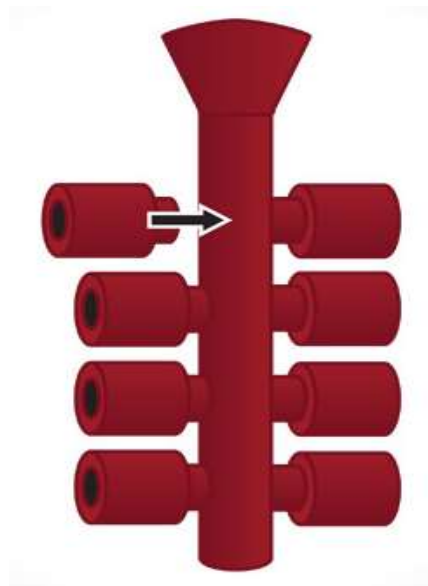
5.2 FABRICAÇÃO DO MODELO

O modelo é uma representação em escala de 1:1 da peça real a ser produzida no final do processo de fundição. No caso do processo de fundição por Cera Perdida, o material com qual produz-se esse modelo é a cera, a qual é

injetada, no estado líquido, no interior da matriz e, ao solidificar-se toma a forma do interior da matriz, ou seja, o formato da peça.

Pelo fato de a Microfusão ser um processo que possibilita grande produtividade, os modelos são produzidos em grandes quantidades e posteriormente ligados a uma “árvore de modelos” ou “cacho de modelos”, que nada mais é do que um eixo central de cera no qual os modelos, do mesmo material, serão conectados ao redor, como mostra a figura 7.

Figura 7 – Árvore de Modelos



Esse modelo em cera tem como características principais: captar os detalhes das peças, elevado rigor dimensional, bom acabamento superficial e dimensões pequenas devido a limitações do processo.

5.3 MOLDAÇÃO

A moldação consiste na obtenção de um molde, o qual será posteriormente preenchido com metal líquido. O molde no processo de fundição por Cera Perdida é feito de material cerâmico refratário de baixa granulometria, sendo a composição desse material variável de produtor para produtor.

O processo para confecção do molde pode ser realizado de mais de uma forma, pois antigamente ele era realizado manualmente, no entanto já é possível encontrar esse processo de forma totalmente automatizada. De uma forma ou de

outra, a obtenção do molde ocorre da seguinte forma: primeiramente o “cacho de moldes” é imerso em uma lama refratária (revestimento primário), como pode ser visto na figura 8, posteriormente sofre um banho de uma camada de pó refratário para constituição de um corpo em casca cerâmica auto resistente. Esse processo pode ser repetido algumas vezes, para que todo “cacho de moldes” seja uniformemente coberto pelo material refratário.

Figura 8 – Banho de lama refratária

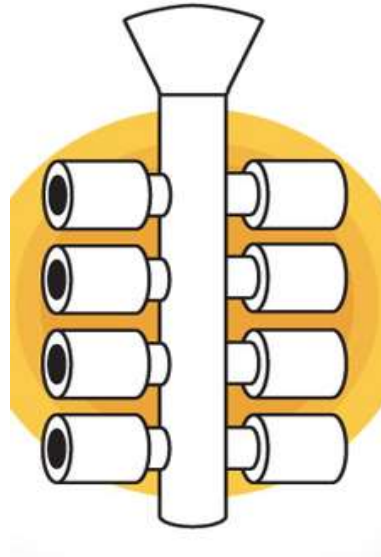


Esse material refratário é um cerâmico, ele deve ter essa característica, pois deve resistir a altas temperaturas. Outra peculiaridade, já citada, de grande importância, é o grau de refino dos grãos do molde, pois ele também será responsável pela boa qualidade superficial da peça.

Além de todos os benefícios que um molde bem feito pode trazer para a peça, como a boa qualidade superficial, ele é também limitante do tamanho das peças que podem ser produzidas pelo processo de fundição por Cera Perdida, pois eles não são resistentes a grandes massas de metal no seu interior, pois eles rachariam. Isso impossibilita que grandes peças possam ser produzidas utilizando-se desse processo.

Uma figura esquemática de molde ao fim desta etapa pode ser visto na figura 9.

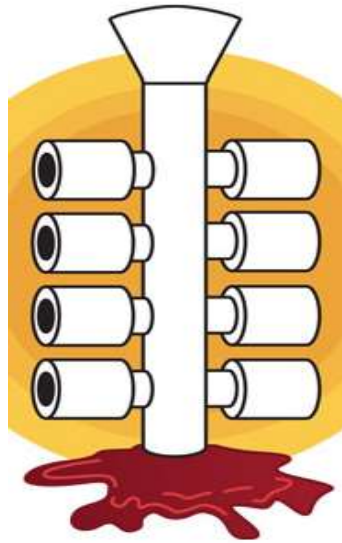
Figura 9 – Molde com modelo no interior



5.4 DECERAGEM

Deceragem é uma etapa simples, que consiste, basicamente, na retirada do modelo de cera do interior do molde. Isso se dá pelo derretimento do modelo no interior de um forno, cuja temperatura depende da composição química da cera utilizada para fabricar o modelo. Normalmente, coloca-se vários “cachos” simultaneamente dentro do forno, todos com a cavidade, por onde será vazado o metal posteriormente, virada para baixo (como observado na figura 4), para que a cera possa deixar o molde naturalmente pela ação da gravidade. Essa etapa é uma das responsáveis para que o nome do processo de fundição por Microfusão tenha ficado conhecido no Brasil por Cera Perdida.

Figura 10 - Deceragem



5.5 CALCINAÇÃO

O termo “calcinar” tem origem no latim e significa: submeter à temperatura muito elevada (BUENO, 1996, p. 114). O significado do verbete resume bem o que ocorre nesta etapa, o molde é levado novamente a um forno, no entanto, com um objetivo diferente: elevar a temperatura do molde para que em seguida o metal líquido seja vazado no interior do molde. Esse processo é realizado com a finalidade de evitar que a peça sofra com bolhas de gases no seu interior, pois ao elevar a temperatura do molde e do seu interior os gases tendem a escapar do molde, viabilizando, assim, uma peça de melhor qualidade. Além disso, colabora com a prevenção de trincas no molde, pois evita um maior gradiente térmico no momento em que o metal é vazado na casca de material cerâmico.

Figura 11 - Calcinação



5.6 VAZAMENTO DO METAL

Diferentemente de outros processos de fundição, como a areia verde, que o vazamento de metal líquido é realizado em canais de vazamento, que alimentam o molde a partir da parte inferior, para evitar turbulência e espaços no interior do molde sem serem preenchidos, no processo de fundição por Cera Perdida, o vazamento é realizado a partir da parte superior do molde.

Para que não haja problemas da ocorrência de bolhas de gases durante o vazamento, existe a etapa de calcinação, no entanto, para evitar turbulência e partes do molde sem serem preenchidas, é necessário tomar alguns cuidados com o projeto em si da peça a ser fundida, como por exemplo, a substituição de cantos vivos por raios suaves. Eles, além de colaborar para não ocorrência dos problemas acima citados, irão colaborar para que a solidificação da peça ocorra de forma otimizada, evitando tensões residuais.

Figura 12 - Vazamento



5.7 DESMOLDAGEM

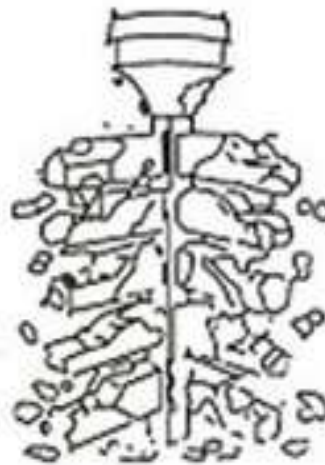
A desmoldagem é a retirada da peça, neste caso do “cacho de peças”, do interior do molde. Esse processo, no entanto, não é possível de ser realizado sem que o molde seja descartado, pois mesmo que o projeto da peça leve em conta ângulos para retirada da peça do molde, no caso da Microfusão, principalmente na

produção de maior quantidade de peças, ou seja, quando há “árvore de peças”, não é possível retirar a peça do molde sem “quebrar” o molde.

Esse processo de desmoldagem se dá normalmente de duas formas, uma em que necessitasse de mão-de-obra e outra utilizando-se uma máquina. A primeira forma consiste na retirada da casca de cerâmica ao redor da peça por choques mecânicos de um operário utilizando-se de algum objeto para realizar impacto, já a segunda forma consiste na utilização de uma máquina que gera vibrações e dessa forma desintegra o molde. Essas duas opções são possíveis pelo fato de os moldes serem de material cerâmico, pois esse tipo de material, apesar de ser resistente à altas temperaturas e ter alto ponto de fusão, possui baixa tenacidade.

A segunda forma de desmoldagem é recomendada caso haja disponibilidade financeira para adquirir o maquinário necessário, pois a retirada através de choques mecânicos, quando mal realizada, pode causar danos na superfície da peça, o que tornaria vã toda a preocupação desde o início do projeto com a qualidade superficial da peça.

Figura 13 - Desmoldagem



5.8 REBARBAGEM

A rebarbagem é necessária em caso de produção de peças quando se utiliza “cacho de peças”, pois, nesse caso, as peças fundidas acabam conectadas no eixo central, assim como inicialmente foi feito com os modelos. Por isso, é

necessário desprender a peça desse eixo central, o que é feito por um operário capacitado, o qual utiliza os equipamentos necessários como esmeril ou lixadeira.

Devido a essa etapa, é necessário atentar-se na elaboração do projeto de fundição da peça para que a parte da peça que está conectada com o eixo central não seja uma parte que necessite de tolerância dimensional, rugosidade e qualidade superficial em geral de grande importância.

Figura 14 - Rebarbagem



5.9 JATEAMENTO

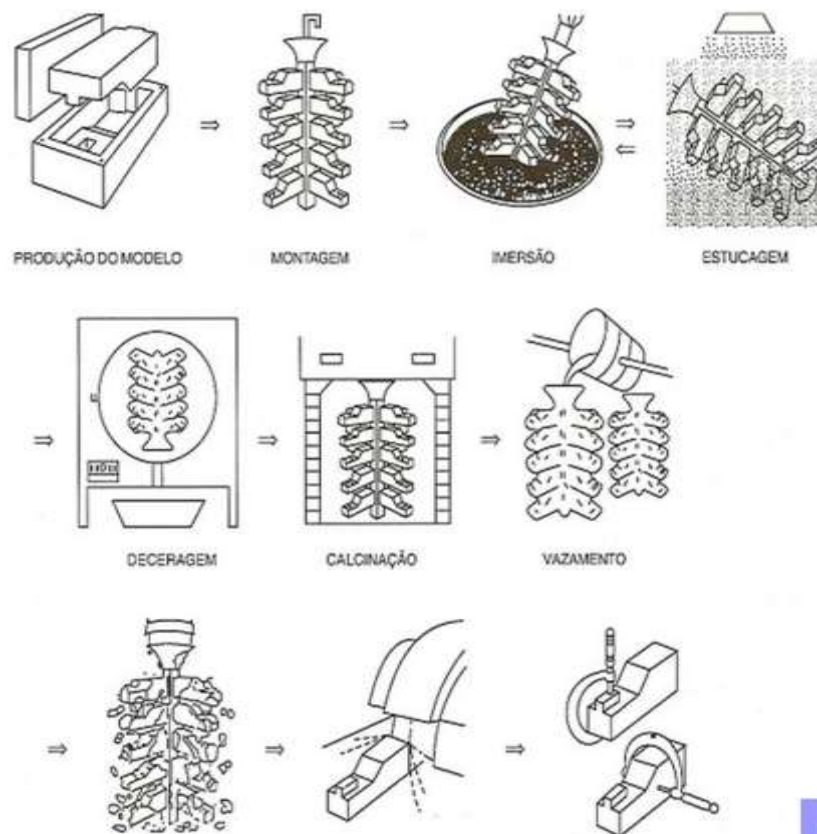
O jateamento é uma etapa simples, a qual tem como finalidade simplesmente limpar a peça, ou seja, retirar qualquer resíduo de material cerâmico que tenha sobrado na superfície da peça. Isso é feito através de jatos de abrasivo metálico, não-metálico ou esfera de vidro, de forma que não danifiquem a peça.

5.10 ACABAMENTO

O acabamento é uma etapa que normalmente quer-se evitar em qualquer processo de fundição, pois é uma etapa normalmente realizada por usinagem, o que encarece muito a fabricação de peças. No caso da fundição por Microfusão, essa não é uma etapa frequentemente realizada, pois a finalidade dela em geral é conferir boa qualidade superficial e tolerâncias dimensionais, o que é possível de se obter com esse processo de fundição em si.

A situação favorável do acabamento em peças fabricadas por esse processo de fundição é o polimento nas regiões da peça onde foi necessária a rebarbagem, para recuperar parcialmente a qualidade superficial da peça.

Figura 15 – Visão geral do processo



6 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As vantagens e desvantagens do processo de fundição por Cera Perdida irão basicamente definir se uma peça deve ou não ser fabricada por esse processo, seguindo as orientações cabíveis para elaboração de um projeto de fundição de uma peça.

6.1 VANTAGENS

- Flexibilidade da forma: há possibilidade de produzir peças de diversos formatos;
- Tolerâncias dimensionais estreitas: devido o molde ser produzido utilizando-se de uma matriz metálica feita por usinagem e o material refratário ser de baixa granulometria, é possível produzir peças com tolerâncias dimensionais estreitas;
- Produção em larga escala: várias peças podem ser produzidas simultaneamente, devido aos “cachos de modelos”;
- Elevado rigor dimensional: característica possibilitada pelos mesmos motivos de as tolerâncias dimensionais poderem ser estreitas;
- Bom acabamento superficial: característica possibilitada pelos mesmos motivos de as tolerâncias dimensionais poderem ser estreitas;
- Grande variedade de materiais utilizados;
- Peças sem linha de partição: o molde para fundição não tem partição, portanto a peça não tem linha de partição;
- Espessuras mínimas inferiores às obtidas por Shell Molding e Areia Verde.

6.2 DESVANTAGENS

- Peças produzidas de pequenas e médias dimensões: como explicado no processo, o molde não suporta grandes massas de metal no seu interior, portanto as peças têm dimensões pequenas, que tem massas entre 1g e 10 kg, no entanto há a possibilidade de se produzir peças com até 150kg.

- Processo lento: o processo de fundição por Cera Perdida é dividido em várias etapas, algumas delas complexas, portanto trata-se de um processo lento;
- Complexa e custosa fabricação dos modelos: a complexidade e custo desse processo estão localizados, principalmente, na fabricação do molde, pois necessita de usinagem, para respeitar as estreitas tolerâncias, sejam elas dimensionais, superficiais, entre outras.

7 PARÂMETROS DE PRODUÇÃO

Todo processo de fundição tem a possibilidade de atingir uma precisão máxima no que se refere às dimensões, qualidade superficial, paralelismo, linearidade, circularidade e furos, por exemplo. Isso, pois não é possível atingir medidas absolutas por meio de processos de fundição em geral, por isso, para cada medida exista uma tolerância.

Esses tipos de tolerâncias são geralmente estabelecidos pelo Memorando Técnico do VDG (German Association of Foundry Specialists, em tradução livre “Associação Alemã de Especialistas em Fundição”). A seleção de grau de exatidão deve ser definida de acordo com o tipo de material adotado para o projeto e aplicação do produto acabado. Assim, são aplicados três graus de exatidão:

- Precisão nível D1: válida para todas as dimensões que não exigem tolerância, que demonstram alto grau de complexidade.
- Precisão nível D2: válida para todas as dimensões que receberam tolerância.
- Precisão nível D3: somente deve ser selecionada em dimensões isoladas e deve ser previamente combinada com o fabricante, pois o atendimento a tais tolerâncias exige adequações significativas no ferramental e no processo produtivo.

No que se refere a tolerâncias angulares, elas podem ocorrer de ambos os lados de uma peça, no entanto Memorando VDG não possui uma especificação de sinais para fazer essa diferenciação. O respectivo valor de tolerância da tabela em milímetros por 100 milímetros aplica-se ao braço mais curto do ângulo na peça de trabalho e deve ser arredondado para a próxima dezena completa.

Tabela 1 – Tolerâncias angulares

Accuracy level	Range of nominal sizes ¹							
	up to 30 mm		30 up to 100 mm		100 up to 200 mm		over 200 mm	
	Permissible misalignment							
	Angular minutes	mm per 100 mm	Angular minutes	mm per 100 mm	Angular minutes	mm per 100 mm	Angular minutes	mm per 100 mm
1	30 [±]	0.87	30 [±]	0.87	30 [±]	0.87	20 [±]	0.58
2	30 [±]	0.87	20 [±]	0.58	15 [±]	0.44	15 [±]	0.44
3	20 [±]	0.58	15 [±]	0.44	10 [±]	0.29	10 [±]	0.29

Fonte: Investment Casting Foundry Technology – Zollern

Abaixo, encontra-se a tabela da Zollern Investment Casting referente a tolerâncias de linearidade, nivelamento e paralelismo, as quais dependem não somente da capacidade do processo de fundição em si de transmitir essas tolerâncias às peças, bem como, do material utilizado e das dimensões das peças.

Tabela 2 – Tolerâncias lineares

Range of nominal size	D ₁		D ₂		D ₃		A ₁		A ₂		A ₃	
	Zone	GTA	Zone	GTA	Zone	GTA	Zone	GTA	Zone	GTA	Zone	GTA
up to 6	0.3	14	0.24	13.5	0.2	13	0.3	14	0.24	13.5	0.2	13
6 up to 10	0.36		0.28		0.22		0.36		0.28			
10 up to 18	0.44		0.34		0.28		0.44		0.34			
18 up to 30	0.52		0.4		0.34		0.52		0.40			
30 up to 50	0.8	14.5	0.62	14	0.5	13.5	0.8	14.5	0.62	14	0.5	13.5
50 up to 80	0.9		0.74		0.6		0.9		0.74			
80 up to 120	1.1		0.88		0.7		1.1		0.88			
120 up to 180	1.6	15	1.3	14.5	1.0	14	1.6	15	1.3	14.5	1.0	14
180 up to 250	2.4	15.5	1.9	15	1.5	14.5	1.9	15.5	1.5	14.5	1.2	14.5
250 up to 315	2.6		2.2		1.6		2.6		2.2			
315 up to 400	3.6	16	2.8	15.5			2.8	16	2.4	15	1.7	14.5
400 up to 500	4.0		3.2				3.2		4.4		3.4	
500 up to 630	5.4		4.4				5.0		5.0		4.0	
630 up to 800	6.2	16.5	5.0				5.6	16	4.6			
800 up to 1000	7.2								6.6			
1000 up to 1250												

Fonte: Investment Casting Foundry Technology – Zollern

A tabela 3 informa a qualidade superficial das peças segundo a norma DIN ISSO 1302.

Tabela 3 – Tolerâncias de qualidade superficial

		CLA [μinch]	R _a ^q [μm]	R _z ^q [μm]	R _q ^q [μm]
Machining	N 1	1	0.025	0.22–0.30	0.24–0.40
	N 2	2	0.050	0.15–0.60	0.49–0.90
	N 3	4	0.1	0.8–1.1	0.85–1.45
	N 4	8	0.2	1.0–1.8	1.10–2.40
	N 5	16	0.4	1.6–2.8	1.75–3.60
	N 6	32	0.8	3.0–4.8	3.2–6.0

Investment casting	N 7	63	1.6	5.9–8.0	6.3–10.0
	N 8	125	3.2	12–16	13.0–19.5
	N 9	250	6.3	23–32	25–38
Sand casting	N 10	500	12.5	46–57	48–68
	N 11	1000	25	90–110	95–130
	N 12	2000	50	180–220	190–250

Fonte: Investment Casting Foundry Technology – Zollern

Quanto a tolerância dimensional da espessura das paredes da peça, ela depende do tamanho das paredes do molde, da área superficial ininterrupta, da contração térmica e da pressão metalostática do metal líquido. Por essa razão, a tolerância dimensional das paredes não depende da precisão do processo de fundição. Ela é, na verdade, restringida pela geometria da peça, pelo molde e pelo metal utilizado.

Tabela 4 – Tolerâncias de espessura de parede

Smallest lateral length of a surface (Fig. 3) mm	Material group D Fe, Ni, Co, Cu based on alloys mm	Material group A Al and Mg based on alloys mm
< 50	± 0.25	± 0.25
50 up to 100	± 0.30	± 0.30
100 up to 180	± 0.40	± 0.40
180 up to 315	± 0.50	± 0.50
> 315	± 0.60	± 0.60

Fonte: Investment Casting Foundry Technology – Zollern

8 PROJETO

Rotores são ótimos exemplos de peças feitas pelo processo da cera perdida. Há diversas razões pelas quais esse processo é o melhor para produzi-los, mas antes de falar sobre elas, vamos primeiro entender o que é um rotor.

Um rotor é a parte de um mecanismo que tem a função de girar, provocar movimentos de rotação. Rotores são usados em diversas áreas da engenharia. Estão presentes em bombas de água, motores elétricos, veículos como helicópteros, turbinas, assim como diversas outras máquinas e tecnologias.

Por serem peças de giro, estão sempre sujeitos a grande desgaste, o que leva a necessidade de características e qualidades muito específicas. É aí que entra o processo de microfusão, que oferece a peça todas as qualidades e detalhes necessários para um bom funcionamento e uma longa vida útil.

No caso de um rotor para bomba de água, a cera perdida permite a reprodução de pequenos detalhes essenciais para o desempenho hidráulico, aumentando a eficiência e reduzindo o consumo de energia.

A rugosidade também é melhorada. Essa qualidade, juntamente com a admissão de tolerâncias mais estreitas nos eixos de rotação, permite à peça um giro muito mais suave e preciso. A necessidade de usinagem também passa a ser pequena ou inexistente, o que causa um barateamento na produção da peça. Essa economia, combinada com os custos mais baixos já oferecidos pelo processo da cera perdida, em comparação com outros processos de fundição, como o de pressão, juntamente com a facilidade de produzir os rotores em grande número e de forma bastante dinâmica, resultam numa produção extremamente viável e economicamente vantajosa para empresas que produzem a peça.

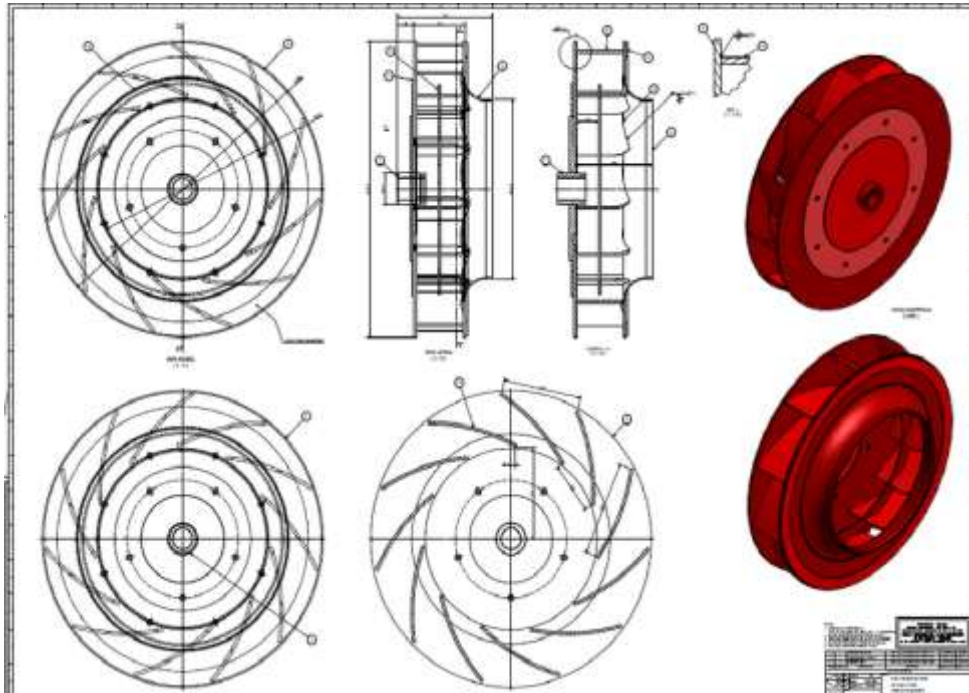
A versatilidade desse processo de fundição também permite a utilização de praticamente qualquer liga metálica para a produção da peça. Como rotores são usados em diversas máquinas e, portanto, submetidos a inúmeras situações diferentes, essa diversidade de materiais garante que o rotor vai ser feito do melhor tipo de material possível para cada situação que a peça possa enfrentar, resultando num prolongamento de sua vida útil.

Esses são apenas alguns dos motivos que fazem o processo de fundição por cera perdida ser excelente para a produção de peças como rotores, um testemunho para a qualidade e importância do processo.

Figura 16 – Etapas da fabricação de um rotor



Figura 17 – Desenho mecânico de um rotor



9 CONCLUSÃO

A riquíssima história do processo de fundição por Cera perdida está intimamente conectada com a história da arte. Diferente de outros conhecidos processos de fundição, como areia verde, por exemplo, a Microfusão confere às peças tamanha precisão, que foi utilizada desde os primórdios como forma de propagar a arte.

Essa precisão, tanto de tolerâncias dimensionais, qualidade superficial como rugosidade, é que abrem as portas do mercado para o processo de fundição por Cera Perdida. Sua utilização é vantajosa perante diversos outros processos de fundição, seja pela melhor tolerância dimensional que a areia verde ou pela razoável diferença de custo com a fundição sob pressão.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ZOLLERN. Investment Casting Foundry Technology . Disponível em: <<http://www.zollern.com.br/>>. Acesso em: 01Jun. 2015.

FREQUENTLY ASKED QUESTIONS. 2014. Disponível em: <<http://www.signicast.com/getting-started/faqs/>>. Acesso em: 02 jun. 2015.

INNOVATIVE Precision Investment Castings: FREQUENTLY ASKED QUESTIONS. 2015. Disponível em: <<http://www.thompsoninvestmentcastings.com/casting-material-faq.html>>. Acesso em: 30 maio 2015.

INVESTMENT Casting. 2012. Disponível em: <<http://www.aerometals.com/investment-casting/applications>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

VERRAN, Guilherme O.. **Processo de Fundição de Precisão**. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/verran/materiais/Aula_14__Processo_de_Fundicao_de_Precisao_Microfusao_.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2015.

INOVANDO NA FUNDIÇÃO DOS SEUS ROTORES. Disponível em: <<http://www.imbil.com.br/Imbil/Portugues/Upload/links/Microfusao.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

PEÇAS Microfundidas em Aço Inoxidável na Indústria Alimentícia. 2013. Disponível em: <<http://fundimazza.com.br/biblioteca/category/literaturas/>>. Acesso em: 02 jun. 2015.