

Manufatura Aditiva e o uso do conceito de ferramental rápido na produção de peças fundidas

Caio Henrique Alves Maciel (Universidade Federal de Minas Gerais) caiomaciel08@gmail.com
Breno Ferreira Lizardo (Universidade Federal de Minas Gerais) bflizardo@gmail.com
Paulo Henrique R. G. Reis (Universidade Federal de Minas Gerais) paulohrodriguesgr@hotmail.com
Paulo Eustáquio de Faria (Universidade Federal de Minas Gerais) paulofaria@ufmg.br
Juan Carlos Campos Rubio (Universidade Federal de Minas Gerais) juan@ufmg.br

Resumo:

A utilização da prototipagem rápida (RP) como alternativa para auxílio na confecção de modelos e/ou moldes de fundição, possibilita reduzir e/ou suprimir etapas dispendiosas no processo. Este estudo tem como objetivo avaliar a produção de moldes para fundição por meio de Impressão Tridimensional (3DP) a base de pó cerâmico e aglutinante polimérico. O teste realizado caracteriza-se por utilizar uma peça de geometria complexa e o uso de um metal fundido de baixo ponto de fusão. As etapas necessárias para confecção do molde são discriminadas e junto aos parâmetros de fabricação. Os resultados revelam que a espessura da parede tem papel preponderante na qualidade final do produto, assim como a correta escolha dos ângulos de saída do modelo. Finalmente, pode-se afirmar que a utilização da manufatura aditiva na construção de ferramental rápido para fundição reduz significativamente o tempo do processo e consequentemente o custo do mesmo, em especial para a confecção de peças protótipos e/ou personalizadas.

Palavras chave: Ferramental Rápido, Manufatura Aditiva, Fundição de Alumínio.

Additive Manufacturing and the use of Rapid Tooling concept in the production of cast parts

Abstract

The Rapid Prototype use as an alternative to support in the manufacturing of mold and model for casting can reduce and eliminate costly steps of process. This study aims to evaluate the production of casting molds through Three Dimensional Printing (3DP) using ceramic powder and polymer binder. The test performed is characterized by using a part that has a complex geometry and a molten alloy with a low melting temperature. The steps required for mold manufacturing are detailed, as well as manufacturing parameters. The results reveal that wall thickness has a predominant role in the product quality, as well as the proper choice of output angles of the model. Finally, it can be stated that the use of additive manufacturing in the rapid tooling manufacturing for casting significantly reduces the life cycle times of products obtained by casting, especially for prototypes and/or custom parts.

Key-words: Rapid Tooling, Plaster Mold Casting, Investment Casting, Aluminium Casting Processes

1. Introdução

Segundo Neto et. al. (2006), o desenvolvimento do Ferramental Rápido (RT), que utiliza como

material resinas poliméricas capazes de criar peças com boas propriedades mecânicas, boa precisão dimensional e acabamento, possibilitou a integração deste com outros processos de fabricação, como por exemplo a conformação, injeção, fundição entre outros.

Na fundição, inicialmente existe a possibilidade de substituir os tradicionais modelos em madeira por outros fabricados em material polimérico com o auxílio de processos de Prototipagem Rápida (RP), reduzindo tempo e custos associados a esta etapa. Da mesma forma, pode-se pensar na alternativa de confecção do molde para vazamento de metal diretamente pela RP. Assim, etapas dispendiosas podem ser reduzidas e suprimidas, desde o desenvolvimento do modelo até a produção do molde, dando origem a uma nova rota de fabricação, como mostrado na Figura 1.

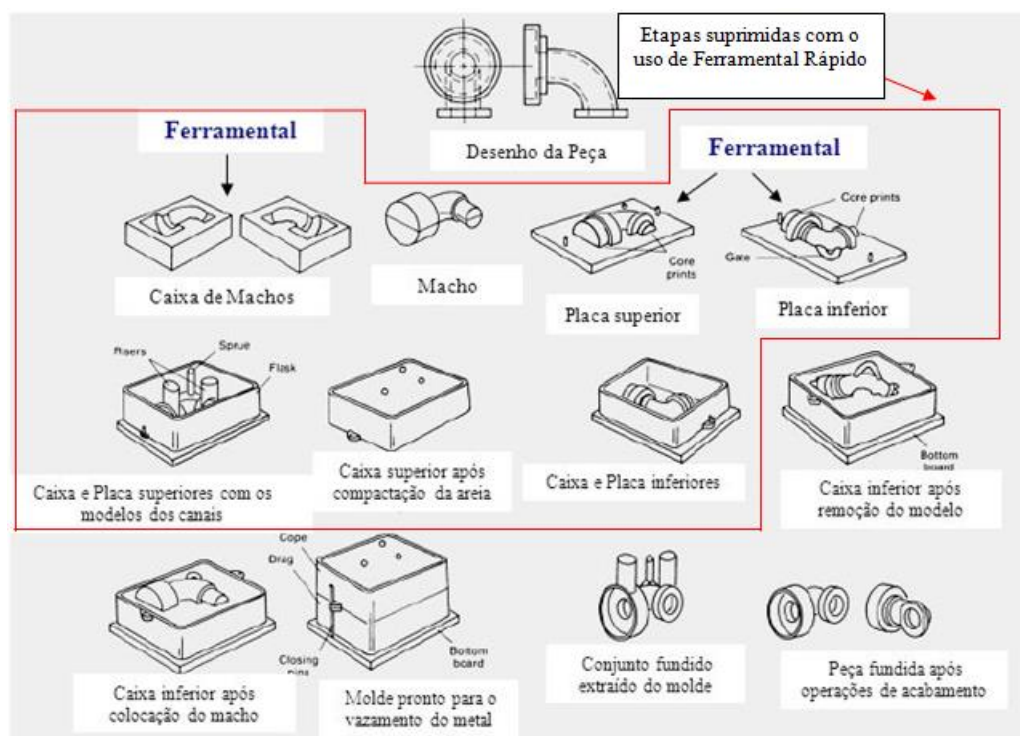


Figura 1. Processo de fundição em moldes de areia (Kalpakjian et. al., 2006)

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é validar o uso da Prototipagem Rápida na produção de peças fundidas, utilizando uma máquina modelo Zprinter 650 que funciona pelo princípio de Impressão Tridimensional (3DP), desenvolvida pela Z Corp.

O presente trabalho se justifica porque poucas pesquisas têm sido desenvolvidas na integração do Ferramental Rápido com outros processos de fabricação, como a fundição ou a conformação mecânica por exemplo. Segundo Lencina et. al., o uso dessa tecnologia nos processos de fundição ainda é bem restrito, se limitando a poucos campos de aplicação e com poucas publicações de artigos. Uma vez que a área de fundição é muito extensa, existem várias possibilidades de aplicação da RT neste processo, possibilitando o desenvolvimento de novos produtos e novas rotas de fabricação.

2. Revisão bibliográfica

A Prototipagem rápida (RP) pode ser definida como um processo de fabricação de manufatura por camada, em que a adição de material se dá na forma de camadas planas sucessivas. Existem diversos processos disponíveis no mercado, que utilizam diferentes insumos e tecnologias. Uma das formas de classificar estes processos é pelo estado inicial da matéria prima utilizada para a

fabricação das peças, que pode ser sólido, líquido e pó.

Já a fundição, é basicamente um processo de fabricação por conformação na qual ocorre o vazamento de metal líquido em uma cavidade de um molde seguido de sua solidificação. As peças oriundas do processo apresentam propriedades, como forma, dimensões, acabamento e tolerâncias, definidas. Operações posteriores de acabamento ou tratamento térmico podem ser necessárias caso as propriedades finais definidas da peça não sejam alcançadas ao final da etapa de desmoldagem.

Volpato et al. (2007) explicam que dentre os diversos processos de RP, se destaca a Impressão Tridimensional (3DP) da empresa Z Corp, na qual o material utilizado para fabricar a peça encontra-se na forma de pó. A fabricação se inicia com o fatiamento do modelo em 3D no Computer Aided Design (CAD), resultando em camadas 2D. Um rolo espalha e nivela o material e a cabeça de impressão deposita o aglutinante de modo a agregar o material, como mostra a Figura 2. Neste processo não é necessário o uso de suporte, pois o próprio material de construção depositado ao redor da peça é utilizado como suporte natural. Após o término da fabricação do protótipo, o material sobressalente pode ser utilizado novamente.

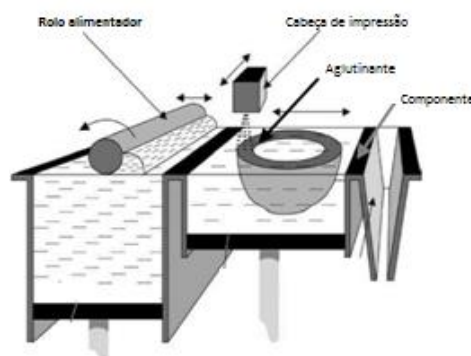


Figura 2. Princípio de funcionamento do processo de Prototipagem Rápida 3DP (Upcraft, 2003)

Diversos materiais podem ser utilizados neste processo, como cerâmicas, metal, polímero, gesso e material à base de amido. Para cada material deve ser desenvolvido um aglutinante específico. Após a construção da peça, se faz necessária uma etapa de pós processamento, para aumentar a resistência ou o acabamento superficial, variando conforme o material utilizado, (VOLPATO et al., 2007).

Kai et al. (2003) cita que devido à variedade de materiais disponíveis, os protótipos construídos neste processo são direcionados para verificação de projeto, comunicação e padrão para aplicações em fundição. Um dos materiais disponíveis é feito à base de gesso e cerâmica o qual é utilizado no processo ZCast, que objetiva a fabricação de moldes para a fundição de metais com baixo ponto de fusão, como o alumínio (www.zcorp.com).

Alguns pontos positivos do processo são a alta velocidade, a ausência de laser e de estruturas de suporte, o fato de não haver desperdício de material e a possibilidade de se obter peças coloridas. Já os pontos negativos são a limitação na funcionalidade das peças obtidas, a necessidade de pós processamento e o acabamento superficial.

Já os processos de fundição, tem-se o a fundição em moldes de gesso. Este processo é indicado para produzir peças com superfícies lisas vazadas por ligas metálicas não ferrosas e é utilizado predominantemente para ligas de alumínio, em peças de 10 a 50kg. Os resultados são fundidos com alto nível de detalhe e maior rigor dimensional quando comparado com os processos tradicionais de moldação em areia, e até mesmo Shell Moulding ou vazamento por gravidade em moldes permanentes (FERREIRA, 1999).

A fabricação do molde se inicia com a formação de uma pasta de gesso e água depositada sobre um modelo, normalmente permanente, posicionado no interior da caixa de moldação. Em seguida, é realizado a cura do molde para eliminar a umidade, a uma temperatura acima de 160°C. O vazamento de metal pode ser realizado em condições de vácuo ou assistido por pressão para assegurar o enchimento completo do interior do molde.

Compostos químicos como Di-Hidrato de Sulfato de Cálcio ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), Hemi-hidrato de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O}$) e sulfato de cálcio anidro (CaSO_4) podem ser adicionados a pasta a fim de se obter outras propriedades desejadas. Durante a etapa de moldagem pode ser aplicado vibração na caixa de moldação para acomodar o gesso aos detalhes dos modelos e liberar eventuais bolhas que possam ser formadas próximo a superfície que irá se formar a “pele” da peça vazada. Além disso, também pode ser aplicada na superfície do molde óleo ou cera para facilitar a desmoldagem.

O tempo para manuseio da pasta de gesso varia entre 10 a 20 minutos e o modelo deve ser extraído cuidadosamente para se preservar os detalhes geométricos a serem reproduzidos. É necessário realizar a secagem do molde por um período de até 72 horas não ultrapassando a temperatura de 380°, pois podem ocorrer variações volumétricas da estrutura do gesso (FERREIRA, 1999).

Devido as características isolantes do gesso, a solidificação lenta da liga vazada pode ocasionar contrações em seções isoladas ou grãos grosseiros na estrutura, tornando necessário incorporar arrefecedores na mistura da pasta de gesso.

Qiang et al. (2003) estudou a influência de diversos parâmetros de enchimento no processo de fundição em moldes de gesso assistidos por pressão utilizando liga de alumínio A357, dentre eles a temperatura de vazamento e velocidade de enchimento. Foi realizada uma análise de Taguchi para investigar entre a resistência a fadiga e parâmetros de enchimento. Os resultados indicaram que a velocidade de enchimento foi o fator mais significativo dentre os parâmetros estudados.

Algumas das vantagens do processo são a capacidade de reprodução de formas complexas, possibilidade de vazar seções com baixa espessura e peças com boa precisão dimensional e bom acabamento superficial. Já as desvantagens, são citadas a baixa produção devido aos processos de execução lenta, baixa permeabilidade do material de moldação, perdas nas propriedades metalúrgicas devido ao processo de solidificação lento e materiais de moldação não recicláveis (FERREIRA, 1999).

Para a fundição das ligas metálicas, existem diversas tecnologias associadas aos fornos de fusão. Dentre os que apresentam capacidade de fundição em pequena escala estão os fornos de resistência elétrica, constituídos por uma ou mais resistências que por meio do Efeito Joule aquecem e transmitem o calor gerado por condução e/ou radiação ao material a ser fundido.

3. Metodologia

Para justificar a automação do processo de fundição com a utilização de Ferramental Rápido, se faz necessário utilizar um modelo que apresente características geométricas complexas, para viabilizar o uso dos sistemas CAD e de Prototipagem rápida.

O modelo utilizado para este trabalho será um jacaré de plástico, que por meio de um estudo de Engenharia Reversa realizado por Martins et al. (2015) no Laboratório de Estudos de Processos Avançados de Manufatura, escaneou o mesmo por um método de digitalização por contato. Como explicou Martins et al. (2015), o jacaré de plástico apresenta características de geometria complexa, o que possibilita a avaliação da capacidade de reprodução do objeto pelo método de aquisição. A digitalização foi feita com o uso de uma máquina Roland Modela MDX-20, que

utiliza uma sonda controlada via CNC e possibilita digitalizações de componentes pequenos e superfícies irregulares. Na Figura 3 é possível ver o processo de digitalização realizado e a Figura 4 o resultado após um tempo de operação de aproximadamente 50 horas.

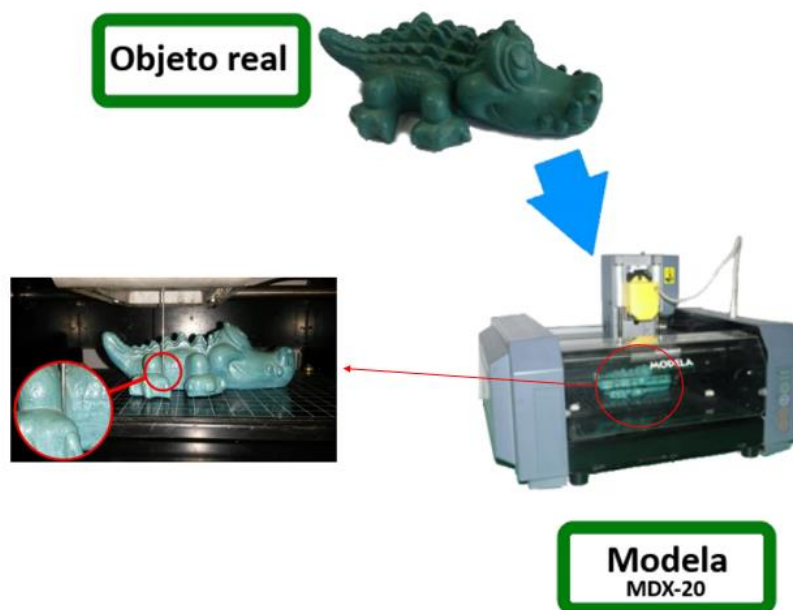


Figura 3. Objeto e processo de digitalização realizado (Martins et al., 2015)

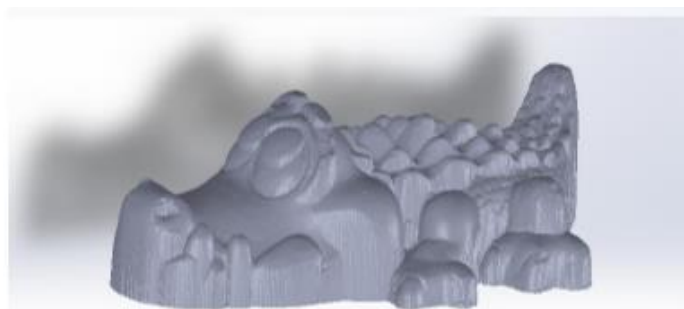


Figura 4. Modelo tridimensional obtido no processo de digitalização (Martins et al., 2015)

O arquivo STL gerado foi importado no software Meshmixer para criação do molde de fundição em 3D. Este software, gratuito e disponibilizado pela Autodesk, possibilita trabalhar de forma livre em malhas 3D pelo princípio CAD, com vários recursos disponíveis para a edição, como ferramentas para esculpir e para combinar objetos 3D. Além disso, há recursos específicos para impressões em 3D, como funções para análise de superfície, ferramentas para criar partes ocas em peças e economizar material na etapa de prototipagem, estrutura de suportes para impressão em 3D, entre outros. Os formatos compatíveis com o Meshmixer são STL, OBJ e PLY, e o mesmo é integrado a outros softwares, como o SolidWorks e Inventor, possibilitando exportar modelos em 3D facilmente para estes formatos.

Decidiu-se que o modelo seria reduzido em 30% e consequentemente o molde também. No estudo de Gill et al. (2011), em que diversos testes de fundição foram realizados com moldes de gesso em diferentes espessuras, a espessura ideal alcançada foi de 10mm.

Utilizando as ferramentas do software foi criado um paralelepípedo sólido que resultará no molde de fundição. As dimensões utilizadas garantiram que nenhuma seção do molde apresentasse menos de 3mm de espessura, desse modo este parâmetro passa a ser também

avaliado neste estudo.

O paralelepípedo foi posicionado sobre o jacaré, de modo que a base inferior do jacaré esteja exatamente sobre uma face do mesmo. Em seguida, foi utilizada a ferramenta de interseção, e o volume equivalente ao jacaré foi subtraído do paralelepípedo. Foi feita a redução de 30% e gerado um arquivo em STL para ser exportado para o software ZPrint, como sequência a etapa de prototipagem. Na Figura 5 pode-se visualizar a modelagem do molde utilizando o software Meshmixer.

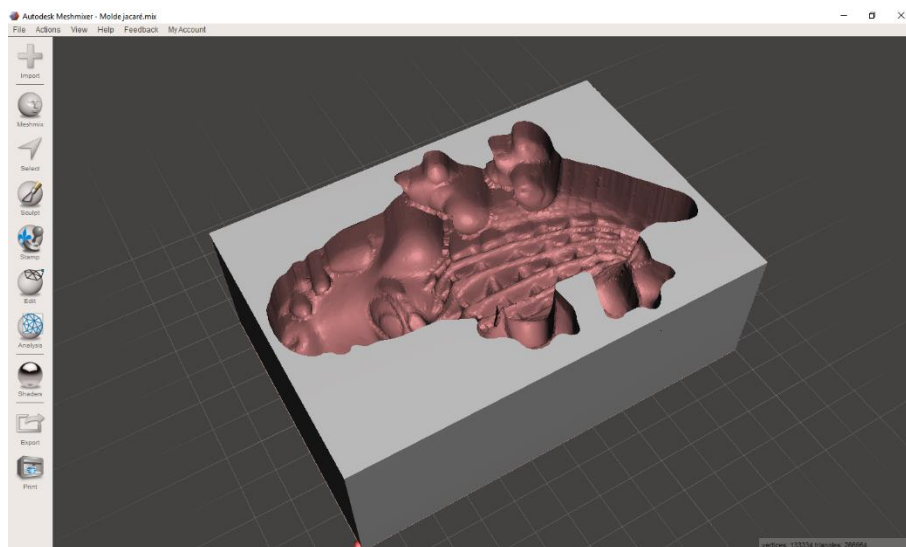


Figura 5. Molde de fundição modelado utilizando o software Meshmixer

O Software ZPrint, disponibilizado pela empresa Z Corporation, é uma interface entre os equipamentos de prototipagem da marca e os usuários, possibilitando configurar os parâmetros e dar início ao processo de prototipagem. O software é compatível com diversos formatos e aplicações, e é capaz de importar dados de coloração e textura das peças, importar mais de um objeto em 3D e posicioná-las lado a lado para otimizar o uso da máquina na etapa de impressão, visualização prévia da área de impressão e visualização das camadas construídas em tempo real, assim como a estimativa do tempo necessário para de impressão.

O posicionamento do molde dentro da cama de impressão levou em conta o movimento das cabeças de impressão, que imprime sempre da esquerda para a direita, e também a movimentação do eixo de impressão, de modo que o mesmo se movesse o mínimo para imprimir uma camada, sem a necessidade de movimentação sobre toda a área de impressão. O posicionamento do molde na área de impressão pode ser visto na Figura 6. A espessura da camada foi definida para 0,1mm, e o tempo necessário para a impressão foi de aproximadamente 2,0 horas.

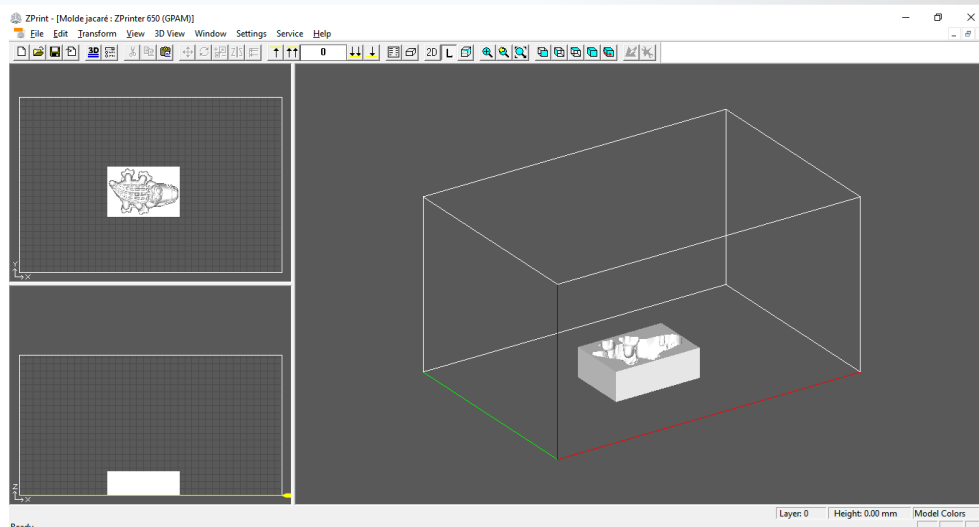


Figura 6. Molde de fundição modelado utilizando o software Meshmixer

Como uma das características do processo 3DP da ZPrinter é o protótipo apresentar fragilidade ao final da etapa de impressão, se faz necessário uma etapa de pós processamento com a infiltração de resina em todo objeto. Devido ao risco desta resina gerar gases e bolhas durante a etapa de vazamento e interferir nos resultados, foi optado por não realizar a etapa de pós processamento no molde prototipado. O resultado desta etapa pode ser visto abaixo, na Figura 7.

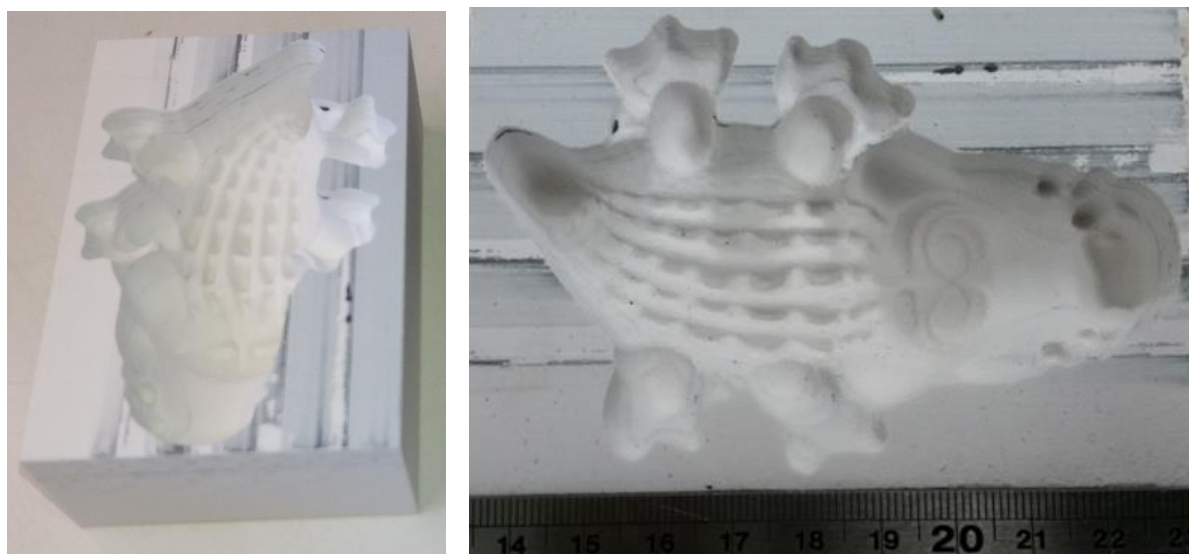


Figura 7. Molde prototipado pela impressora ZPrinter

O molde foi então posicionado em um vasilhame de plástico preenchido com areia, como mostra a Figura 8, para auxiliar na dissipação de calor do molde.

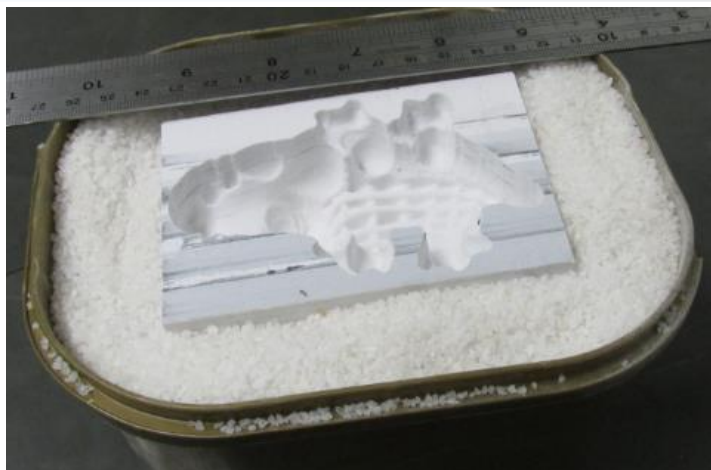


Figura 8. Posicionamento do molde no vasilhame de plástico preenchido com areia

A etapa de vazamento da liga no molde se iniciou com a deposição de alumínio na forma sólida no interior do cadinho e o aquecimento do mesmo, por meio do forno de resistência elétrica. Como a resistência elétrica utilizada no forno foi de 2000W, o tempo necessário para fundir o alumínio foi de 5 horas. Na Figura 9, é possível ver o processo de fusão do alumínio e na Figura 10 a etapa de vazamento.



Figura 9. Etapa de fundição de Alumínio



Figura 10. Alumínio fundido sendo vazado no molde de gesso

Após a etapa de vazamento, o molde foi deixado para resfriar ao natural durante um período de 24h, seguido da etapa de desmoldagem. O resultado do processo de fundição pode ser visto na Figura 11.



Figura 11. Etapa de arrefecimento e desmoldagem, resultando na peça fundida

Como forma de comparar qualitativamente o resultado da aplicação do Ferramental Rápido às etapas de fundição, foram impressos dois modelos do jacaré, na mesma escala, utilizando duas técnicas diferentes de prototipagem para comparar com o resultado obtido na fundição.

Uma impressão foi realizada pelo mesmo processo de prototipagem do molde, 3DP da ZPrinter e a outra impressão foi realizada pela prototipadora Rapman 3, desenvolvida pela empresa BFB, que funciona pelo princípio de FDM, na qual um fio de plástico é aquecido e fundido localmente para a construção da camada.

4. Resultados

Durante a etapa de vazamento, visto na Figura 8, o vazamento do alumínio no molde de gesso se deu de forma abrupta. Isso, tendo em vista que não foi possível inserir uma ferramenta no interior do cadinho para retirar a escória formada e outras possíveis impurezas presentes no alumínio fundido. Em uma tentativa de reter a escória na ferramenta, a mesma foi posicionada de modo a reter na superfície a escória formada e permitir a passagem de alumínio “limpo” na parte inferior. Isto acabou retendo o alumínio na ferramenta, e como a mesma estava sendo segurada por uma pessoa, a mínima movimentação permitiu que uma grande quantidade de alumínio vazasse rapidamente no molde.

Uma alternativa que poderia ter sido utilizada para evitar a formação de impurezas seria a utilização de fundentes e purificadores, como bicarbonato de sódio ou cloreto de sódio.

Em seguida, em uma tentativa de retirar o excesso de alumínio vazado, a mesma ferramenta foi passada sobre a superfície, o que acabou prejudicando a formação das patas do lado direito do jacaré e impossibilitando uma etapa de pós processamento para remoção do excesso na superfície inferior do jacaré fundido, Figura 12.



Figura 12. Ferramenta em contato com o alumínio vazado no molde

Como pode ser visto na Figura 13, foram identificadas trincas em três pontos do molde. Isto pode ter acontecido devido ao choque térmico ocorrido entre o molde e o alumínio fundido nos pontos em que a espessura da parede do molde é mais estreita, reforçando a necessidade de uma espessura mínima por volta de 10mm. O preaquecimento do molde seria uma alternativa para evitar a formação de trincas, reduzindo o choque térmico do molde com o alumínio fundido.

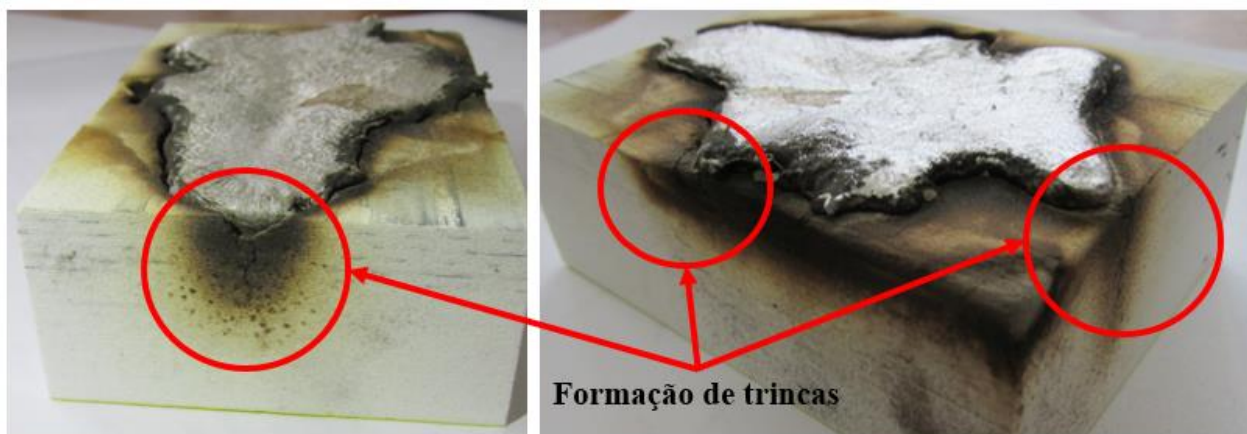


Figura 13. Trincas formadas no molde

Na etapa de desmoldagem, parte do molde ficou aderida entre as patas do lado direito do jacaré, podendo ser atribuído a não utilização de ângulos de saída no molde. Também foi constatado a não reprodução de duas escamas da parte superior do jacaré, como mostra a Figura 14.

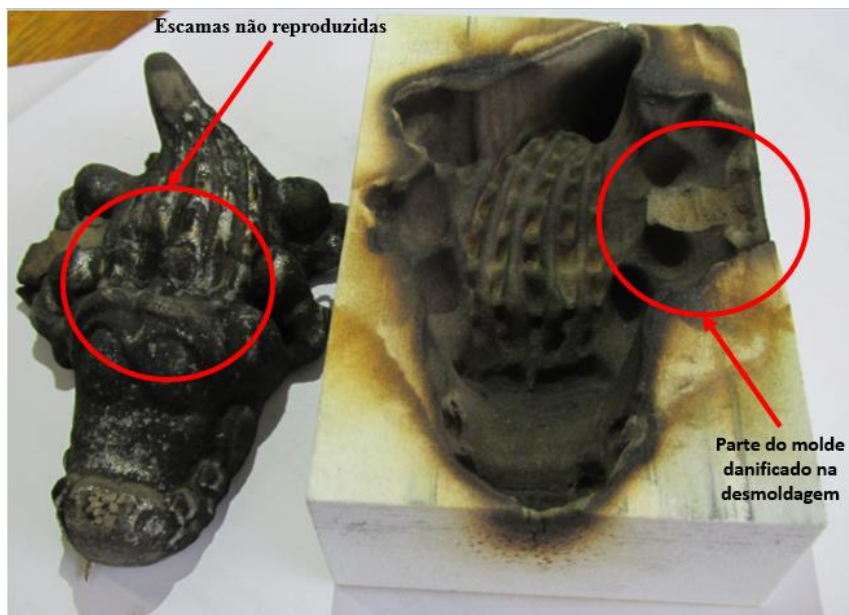


Figura 14. Durante a desmoldagem, parte do molde se aderiu a peça fundida, danificando o molde utilizado.

O jacaré apresentou coloração escura, característica de oxidação do alumínio. Ao comparar o resultado da fundição com os dois modelos prototipados e com o objeto original, Figura 15, foi possível perceber a qualidade da reprodução do objeto. Pequenos detalhes, como uma falha na sobancelha do “jacaré original” utilizado como objeto, foram reproduzidos com alta qualidade na peça fundida. Mesmo as patas danificadas devido a passagem da ferramenta para retirar o excesso de alumínio vazado apresentaram uma boa qualidade.



Figura 15. Jacaré fundido posicionado lado a lado com os modelos prototipados e o jacaré original

5. Considerações finais

Após a realização deste estudo, ficou claro o potencial da utilização do conceito de Ferramental Rápido nos processos de fundição.

Várias etapas do processo de produção foram reduzidas com o uso da prototipagem rápida, o que mostra eficácia do processo, possibilitando a redução de tempo e custo do processo.

Apesar dos problemas ocorridos na etapa de vazamento, o resultado da fundição foi satisfatório.

Por meio da comparação entre os dois modelos prototipados e o objeto original foi possível constatar a boa capacidade do conjunto molde e liga de alumínio, na reprodução da cavidade interna do molde, apresentando um fundido de alta qualidade.

Referências

FERREIRA, José M. G. de Carvalho. *Tecnologia da fundição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999. 544p. (Manuais universitários) ISBN 9723108372

GILL, Simranpreet Singh; KAPLAS, Munish. *Efficacy of powder-based three-dimensional printing (3DP) technologies for rapid casting of light alloys*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 52, n. 1-4, p. 53-64, 2011.

KAI, C.C, Fai, L. K. and Sing, L.C. *Rapid Prototyping: Principles and Applications (2th edition)*, manufacturing World Scientific Pub Co, March, 2003, 448p.

LENCINA, D. *Avaliação do Uso de Modelos Produzidos por Estereolitografia na Fundição em Moldes de Areia Aglomerada por Resinas do Tipo Caixa Fria Fenólico-Uretano*. Disponível em: http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/avaliacao_modelos_produzidos_estereolitografia.pdf. Acesso em 07/09/2015.

MARTINS, A. M., Lizardo, B. F., Martins, F.M., Rubio, J.C.C. *Estudo Comparativo de Técnicas de Digitalização 3D Visando Manufatura Aditiva*. V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Ponta Grossa, PR, Brasil, 2015.

NETO, Rui Lemos Lino, F. Jorge, Rocha, A Barata da. *Utilização da Prototipagem Rápida no Apoio Ao Desenvolvimento de Produtos Forjados e Fundidos*. XXVI Senafor 12p, 2006.

UPCRAFT, S., Fletcher, R. *The Rapid prototyping technologies*. Assembly Automation, Vol. 23 No. 4, pp. 318-30, 2003.

VOLPATO, Neri. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Blucher, 2007. xxi, 266p. ISBN 8521203888 (broch.).

QIANG, L. I. et al. *Influence of filling parameters on fatigue properties of A357 alloy produced by counter pressure plaster mold casting*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 23, n. 5, p. 1281-1285, 2013.

www.zcorp.com, Z Corporation (Acesso em 08 de junho de 2016).