

ANDRÉ FELIPE FALSARELLA LIMA MACEDO

Uso da Manufatura Aditiva em Ferramentais de Fundição em Areia

André Felipe Falsarella Lima Macedo

Uso da Manufatura Aditiva em Ferramentais de Fundição em Areia

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá - SP
2021

| | |
|-------|---|
| M141u | <p>Macedo, André Felipe Falsarella Lima</p> <p>Uso da manufatura aditiva em ferramentais de fundição em areia / André Felipe Falsarella Lima Macedo – Guaratinguetá, 2020. 44 f : il. Bibliografia: f. 43-44</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Areia de fundição. 2. Moldagem (Fundição). 3. Impressão tridimensional. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.744</p> |
|-------|---|

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

Andre Felipe Falsarella Lima Macedo

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

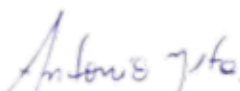
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Me. EVERTON COELHO DE MEDEIROS
UNESP-FEG


Prof. Me. ANTONIO FARIA DOS REIS NETO
UNESP-FEG

Fevereiro de 2021

dedico este trabalho

de modo especial, a meus pais e ao meu irmão
Victor, que, sem o apoio e força dado por eles,
eu não estaria aqui hoje.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Rubens e Angela* e ao meu irmão *Victor*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

“Tudo que temos que decidir é o que fazer
com o tempo que nos é dado.”
(Gandalf; “O Senhor Dos Anéis”)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica sobre a produção e aplicação de modelos fabricados através da manufatura em uma fundição em areia. É descrito o conceito de manufatura aditiva, suas diferentes características e tecnologias e como este processo está relacionado com a indústria de fundição em areia. Através de trabalhos anteriores, os resultados são apresentados por meio de comparações de elementos como desempenho, tempo e custo de produção entre modelos feitos pela manufatura aditiva e modelos convencionais, geralmente de aço, madeira, isopor ou epóxi. Foi avaliado que os modelos 3D apresentam um menor custo e tempo de produção e uma maior produtividade que modelos de epóxi e madeira, além de ser observado que, quanto mais complexa é a peça final, mais vantajosa se torna a utilização da manufatura aditiva. Também são apresentadas comparações entre modelos feitos pelas tecnologias FDM e *InkJet 3D Printing*, com esta se mostrando mais vantajosa por não apresentar defeitos relevantes na peça final, como ocorreu com a peça de FDM, e possuir características como maior taxa de resfriamento, menor volume e massa total, menor tempo de produção e, conseqüentemente, uma maior produtividade. Ao final, são dadas sugestões para que se consiga transformar esta pesquisa teórica em um trabalho empírico.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva. Fundição em areia. Impressão 3D. Custo de produção. Tempo de produção.

ABSTRACT

This work presents a bibliographic research about the manufacturing and the application of models produced by additive manufacturing in a sand-casting factory. It is presented the concept of additive manufacturing, its different characteristics and technologies and how this process is related to the sand-casting industry. Through former studies, the results are shown by way of comparison, of elements such as performance, time and cost of manufacturing, between models made by additive manufacturing and conventional models, generally made of steel, wood, Styrofoam or epoxy. It was evaluated that the 3D models showed a lower cost and time of manufacturing, a higher productivity than models made of epoxy and wood, in addition to being noted that the more complex the final part, the more advantageous it is to use additive manufacturing. It was also presented comparisons between models made by the technologies FDM and InkJet 3D Printing, with the latter being more advantageous by not having relevant defects in the final part, like it happened with the FDM part, and by having traits such as a higher cooling rate, lower total volume and weight, lower time of manufacturing and, therefore, a higher productivity. Finally, suggestions are given in order to transform this theoretical research in an empirical work.

KEYWORDS: Additive Manufacturing. Sand-casting. 3D Printing. Manufacturing cost. Manufacturing time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Etapas de Impressão por Manufatura Aditiva | 19 |
| Figura 2 – Modelagem por Fusão e Deposição | 20 |
| Figura 3 – Seção de uma peça feita por FDM | 21 |
| Figura 4 – Suporte de porta de fogões à lenha em 3D..... | 26 |
| Figura 5 – Impulsor em CAD | 27 |
| Figura 6 – Representação tridimensional do impulsor | 28 |
| Figura 7 – Processo de <i>slicing</i> | 29 |
| Figura 8 – Impulsor impresso através da manufatura aditiva..... | 29 |
| Figura 9 – Produto feito a partir do modelo de ABS..... | 30 |
| Figura 10 – Item feito através de um modelo de madeira | 30 |
| Figura 11 – Modelo feito por modelagem por fusão e deposição | 31 |
| Figura 12 – Molde final para fundição em areia | 32 |
| Figura 13 – Taxa de resfriamento dos moldes | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Tipos de Manufatura Aditiva | 19 |
| Tabela 1 – Comparativo entre matérias-primas | 22 |
| Tabela 2 – Dimensões dos modelos após pós-processamento..... | 33 |
| Tabela 3 – Dimensões após 100 ciclos | 33 |
| Tabela 4 – Dimensões após 200 ciclos | 34 |
| Tabela 5 – Dimensões das peças finais com modelos nos ciclos iniciais..... | 35 |
| Tabela 6 – Dimensões das peças finais com modelos nos ciclos finais | 35 |
| Tabela 7 – Dados de custo de fabricação..... | 36 |
| Tabela 8 – Rugosidade superficial dos dois moldes | 40 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 15 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 16 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral..... | 16 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos..... | 16 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA..... | 16 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 | DEFINIÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA | 17 |
| 2.1.1 | Etapas de Impressão | 17 |
| 2.1.2 | Diferentes tipos de MA | 19 |
| 2.1.3 | Modelagem por Fusão e Deposição | 20 |
| 2.1.4 | Matéria-prima utilizada na Manufatura Aditiva | 23 |
| 2.2 | RELAÇÃO ENTRE A FUNDIÇÃO EM AREIA E MODELOS POR MA..... | 23 |
| 2.2.1 | Processo de Fundição em areia | 23 |
| 2.2.2 | Modelos em Manufatura Aditiva | 24 |
| 3 | METODOLOGIA | 25 |
| 3.1 | CONFECÇÃO DE MODELOS POR MANUFATURA ADITIVA | 25 |
| 3.1.1 | Suporte de porta de fogão à lenha..... | 25 |
| 3.1.2 | Impulsor de um compressor centrífugo..... | 27 |
| 3.1.3 | Fundição de uma liga de alumínio em um molde de areia..... | 31 |
| 3.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 32 |
| 4 | RESULTADO E DISCUSSÕES | 33 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 42 |
| | REFERÊNCIAS | 44 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O impacto causado pela consolidação da chamada Indústria 4.0 se baseia na combinação de diversas tecnologias, fazendo com que as empresas tenham que reinventar a maneira com que gerenciam seus negócios e processos. As quatro principais mudanças causadas por esta nova revolução industrial seriam produtos mais inteligentes e produtivos, transformação das expectativas dos clientes, novos jeitos de consolidar parcerias e mutação do modelo convencional para o modelo digital (COELHO, 2016).

A partir desse novo cenário, surgiram novos meios de produção como a manufatura aditiva (ou prototipagem rápida), que corresponde ao processo de criação de um objeto a partir da sobreposição de camadas de material uma à outra, tendo como base um desenho digital em três dimensões (3D). Esta técnica engloba um grupo de tecnologias que seguem sempre o mesmo conceito, mas cada tipo de impressão 3D tem suas características específicas de fabricação do produto final (ALBUQUERQUE, 2017).

Grandes investimentos feitos por países como Alemanha, EUA e Singapura garantem cada vez mais a expansão da manufatura aditiva, ocasionando o surgimento de novas áreas de aplicação para a prototipagem rápida, como é o caso do setor de fundição (FORD, 2014). A explicação para a escolha desta tecnologia pode estar em vantagens como produtos finais com geometrias mais complexas, menor desperdício de material, baixo custo de produção unitário e produção rápida a partir de um projeto digital, possibilitando a prototipagem rápida (ALBUQUERQUE, 2017).

A modelagem de deposição fundida, ou FDM (*Fused Deposition Modeling*) é uma das principais técnicas que surgiram a partir da manufatura aditiva. Foi inventada por Scott Crump, cofundador da empresa Stratasys e patenteada por ele em 1989. Neste método, o filamento é aquecido até o seu ponto de fusão e, em seguida, é extrudado, produzindo o objetivo final camada por camada. Utiliza como matéria-prima termoplásticos como o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e PLA (ácido poliláctico).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho e custo de fabricação de modelos confeccionados através da manufatura aditiva em uma fundição em areia com o intuito de considerar a substituição de modelos convencionais (aço, alumínio, madeira ou isopor, epóxi) por modelos 3D (ABS ou PLA).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Entender as diferentes características de maquinários e filamentos responsáveis pela realização da manufatura aditiva;
- Realizar pesquisa bibliográfica através de artigos científicos, dissertações, teses e trabalhos que aplicaram os conhecimentos da manufatura aditiva;
- Analisar e descrever os resultados encontrados em trabalhos anteriores, possivelmente, dando novas visões sobre os mesmos;
- Dar sugestões para trabalhos futuros com o intuito de aplicar os conhecimentos adquiridos neste documento, transformando esta pesquisa teórica em um trabalho empírico.

1.3 JUSTIFICATIVA

A justificativa deste trabalho está na possibilidade de que, se propriamente implementada, a manufatura aditiva pode causar impactos como diminuição no tempo e custo de produção de modelos, redução do desperdício de material, flexibilidade para realizar mudanças no design e medidas da peça desejada sem onerar bruscamente o orçamento econômico, além da fabricação de peças com geometrias mais complexas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA

Manufatura Aditiva (MA) pode ser definida como um conjunto de tecnologias em que objetos são impressos tridimensionalmente, onde o material é depositado de camada em camada a partir de dados digitais (geralmente dados CAD) (DALZUCHIO, 2017; ALBUQUERQUE, 2017).

Tradicionalmente, quando falamos da produção de peças tridimensionais, logo vem à mente processos como usinagem, moldagem, entre outros, em que é utilizada a manufatura subtrativa, consistida na retirada do material sobressalente para que se chegue no produto final. Entretanto, a MA se difere destes processos pois se chega ao produto desejado através da deposição de materiais dentro da impressora, que, dependendo do tipo de equipamento e material utilizado, podem ser criados diversos tipos de objetos, desde itens sem encaixes até formas complexas que podem fazer parte de um conjunto de peças (FRANCO, 2019).

Cada vez mais os termos Manufatura Aditiva e Impressão 3D tem ganhado destaque devido ao fato de apresentar diversas vantagens, não só para a Indústria, mas também para o público em geral. (FRANCO, 2019). Alguns destes pontos podem ser a capacidade de produzir peças complexas, menor desperdício de material, flexibilidade no design, produtos com maior customização, entre outros (ALBUQUERQUE, 2017).

2.1.1 Etapas de Impressão

O processo de impressão por manufatura aditiva é dividido em oito etapas essenciais (GIBSON *et al.*, 2010). Estes passos serão descritos a seguir:

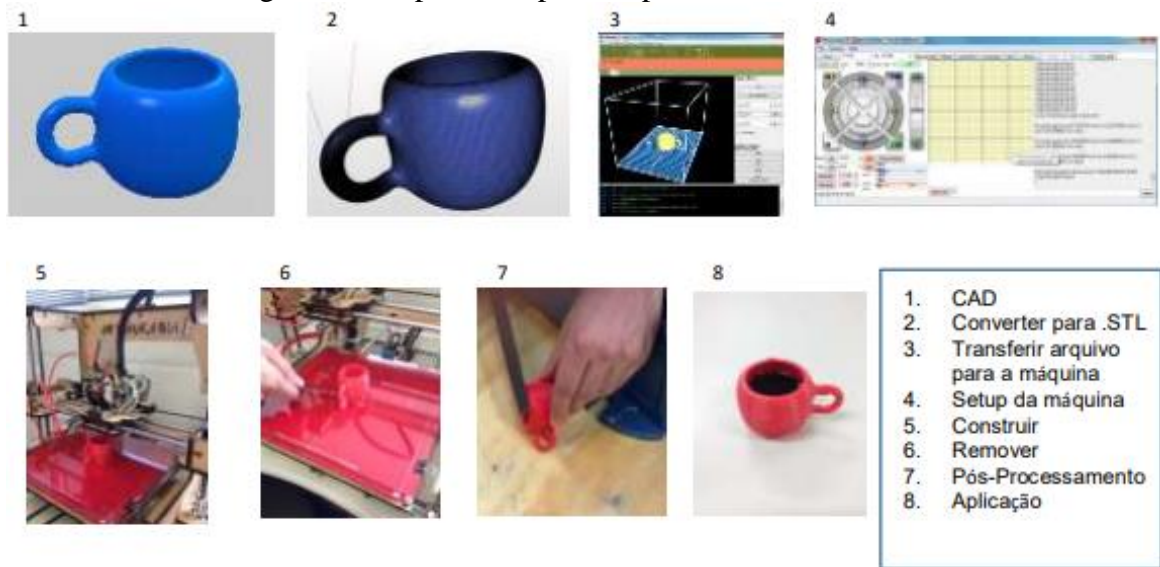
1. **MODELAGEM CAD:** primeiramente, devemos definir a geometria externa da peça a ser produzida utilizando um *software*. Para tal, o mais utilizado são os *softwares* CAD, mas também podem ser usados equipamentos como *scanners* a laser;
2. **CONVERSÃO EM .STL:** com o desenho pronto, devemos trocar a extensão do arquivo para a extensão *.STL* (*Surface Tessellation Language*), formato aceito por praticamente todos os equipamentos de MA. Este formato representa a peça apenas com informação de geometria, onde as faces do modelo são retratadas

em faces triangulares. Caso ocorram erros durante a conversão, existem *softwares* que podem ser usados como complemento para corrigir as falhas;

3. TRANSFERÊNCIA DO DESENHO PARA A MÁQUINA: nesta etapa, devemos realizar diversas ações que nos certifiquem que o processo será realizado da maneira correta. Entre elas estão, quantidades de peças a serem impressas, verificação do local de impressão e separação da peça para o caso de o tamanho da peça ser elevado ao ponto de seja necessário imprimir em partes separadas. Esta segmentação pode ser feita através de *softwares* de manipulação de arquivos .STL;
4. CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA: definição de parâmetros como espessura das camadas, tempo de produção, entre outros critérios que podem ser exigidos com o intuito de garantir uma boa impressão;
5. PRODUÇÃO DO PRODUTO: em maior parte, a construção do produto é feita praticamente de maneira automatizada, sendo que a intervenção manual só seja necessária nos momentos iniciais de impressão e em eventuais problemas;
6. REMOÇÃO: com a impressão finalizada, a peça é então retirada da máquina. Caso seja necessário, é retirado o excesso de material, resultando em uma superfície mais limpa. O material de suporte também é retirado nesta etapa, caso tenha sido utilizado;
7. PÓS-PROCESSAMENTO: nesta etapa, a peça pode passar por processos como pintura, polimento e revestimento, garantindo diferentes características físicas e estéticas ao produto;
8. APLICAÇÃO: com o pós-processamento finalizado, a peça já está pronta para o uso. Vale ressaltar que, para casos de alto desempenho, o produto final feito pela MA pode não ter a mesma performance que um feito pelos métodos tradicionais devido a possibilidade de ocorrer anisotropia nas propriedades mecânicas devido a presença de pequenas bolhas e vazios no interior do objeto.

A Figura 1 mostra um resumo ilustrativo das oito etapas descritas acima:

Figura 1 – Etapas de impressão por Manufatura Aditiva



Fonte: Giordano *et al.* (2016).

2.1.2 Diferentes tipos de MA

A MA apresenta diferentes tipos de tecnologia que variam dependendo, principalmente, dos materiais utilizados e qual será a aplicação do produto final. Estas tecnologias podem ser classificadas de acordo com o estado da matéria-prima, podendo ser líquido, pó ou filamentos. A Tabela 1 traz um resumo com as principais tecnologias e suas características (CIOCA, 2019).

Quadro 1 - Tipos de Manufatura Aditiva

| Processo | Estado | Técnica de criação de camadas | Tipo de mudança de fase | Material |
|----------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| Estereolitografia | Solução resina | Cura camada líquida | Fotopolimerização | Fotopolímeros (epóxis e resinas) |
| Modelamento multi jet / Poly jet | Solução resina | Cura camada líquida | Solidificação por resfriamento | Polímeros (ABS, policarbonato) |
| FDM | Filamento | Extrusão de polímeros fundidos | Solidificação por resfriamento | Polímeros (ABS, policarbonato) |
| 3D Print | Pó | Aglutinação de partículas | Sem mudança de fase | Cerâmicos, polímeros, pó metálico e areia |
| SLS / SLM | Pó | Camada de pó | Sinterização / Fusão | Polímeros, metais, cerâmicos |
| EBM | Pó | Camada de pó | Fusão | Titânio e ligas de titânio |

Fonte: Adaptado de Cioca (2019).

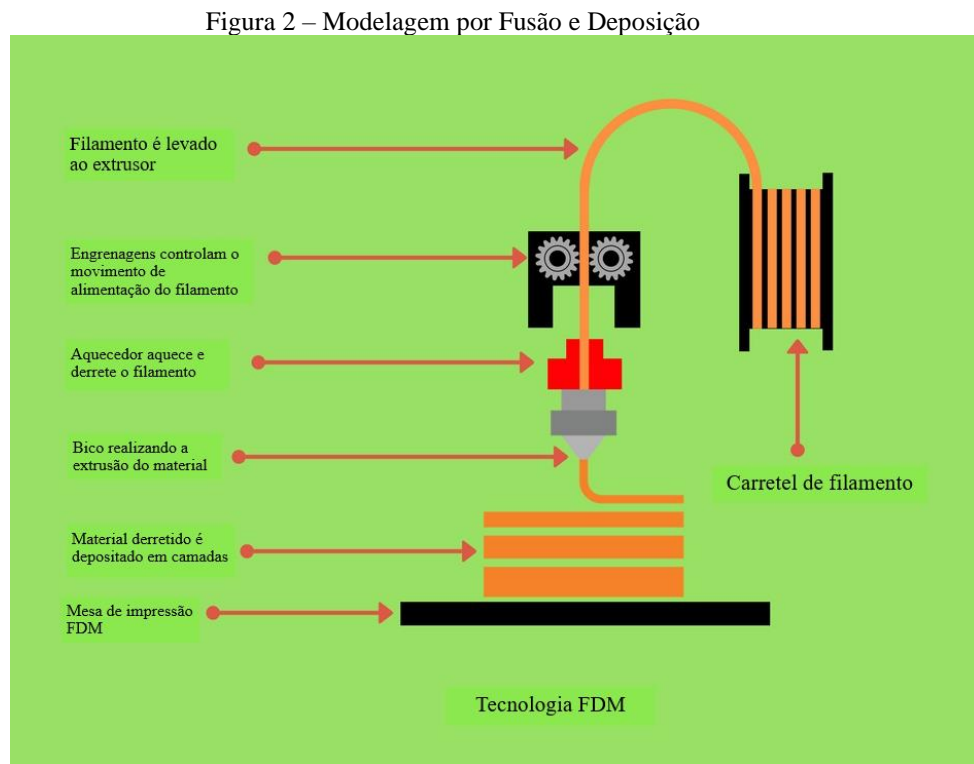
Para este trabalho, o foco será dado à tecnologia FDM, *Fused Deposition Method*, ou modelagem por fusão e deposição.

2.1.3 Modelagem por Fusão e Deposição

A modelagem por fusão e deposição consiste em utilizar, geralmente, filamentos plásticos que, após serem derretidos e passarem por um bico, são depositados em camadas. O bico se movimenta, no plano, nos eixos X e Y e, após a primeira camada ser depositada, a mesa se move no eixo Z, respeitando a variação de altura proporcional a espessura da camada que acaba de ser depositada, para a formação das próximas camadas (VOLPATO, 2007; SWIFT, 2013).

Existe também um segundo bico que tem como função depositar material que constroem características na peça como saliências, beiradas e partes que não estariam ligadas à peça e, por isso, ficariam suspensas no espaço. Este material, por ser mais frágil que o material principal, pode ser retirado manualmente ou solubilizado em uma solução líquida aquecida. Este segundo bico age simultaneamente ao primeiro bico mencionado anteriormente (VOLPATO, 2007; SWIFT, 2013).

A Figura 2 ilustra o processo:

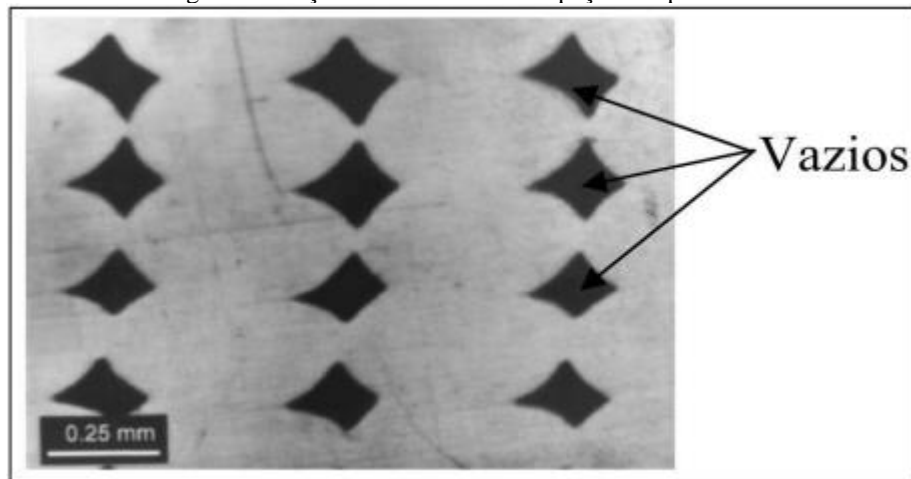


Fonte: Adaptado de MANUFACTUR3DMAG (2018).

Os parâmetros de impressão que podem ser controlados durante o processo de modelagem por fusão e deposição são: espessura da faixa impressa, os vazios entre filamentos

que surgem durante a deposição das camadas, que pode ser visto na Figura 3, e a espessura do filamento utilizado. Além destes parâmetros citados, a FDM também pode sofrer influências das propriedades físicas e do acabamento utilizado após a impressão do produto. Outro ponto que vale ser destacado é que quanto menos espessa a camada, melhor será seu acabamento superficial (ALBUQUERQUE, 2017; GIBSON et. al., 2010).

Figura 3 – Seção transversal de uma peça feita por FDM



Fonte: Krestscek (2009).

Entretanto, apesar de todos os pontos positivos que esta tecnologia apresenta, ainda existem alguns defeitos que devem ser levados em conta previamente à impressão para que sejam tomadas medidas preventivas com o intuito de reduzir os possíveis erros. Alguns destes efeitos serão descritos brevemente a seguir (FOGGIATTO, 2005):

- **EFEITO ESCADA:** este defeito ocasiona o surgimento de pequenos degraus em superfícies curvas ou inclinadas. Pode ser minimizado se estas superfícies forem colocadas de maneira que estes degraus não possam aparecer e recomenda-se, também, a escolha correta do sentido de produção da peça;
- **TRIANGULARIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES:** este defeito surge durante o processo de conversão de CAD 3D em .STL, onde há a triangularização das superfícies da peça. Neste caso, o defeito causa a transformação das superfícies curvas em uma malha de elementos triangulares. É recomendado utilizar propriedades que amplificam a quantidade de triângulos presentes no desenho, minimizando os efeitos causados;
- **ANORMALIDADE NAS SUPERFÍCIES INFERIORES E SUPERIORES:** efeito causado devido ao contato da peça com a plataforma de espuma,

ocasionando a aparição de marcas superficiais. Já nas superfícies superiores, podem surgir rugosidades em função dos filetes extrudados apresentarem formas arredondadas. Para as superfícies inferiores, recomenda-se a utilização de camadas de apoio para evitar o surgimento dessas marcas;

- **DEPOSIÇÃO RESIDUAL DE MATERIAL:** neste caso, o fluxo de material não cesse junto com o movimento do cabeçote extrusor devido a presença de uma pressão residual, ocasionando imperfeições durante a construção da camada;
- **COSTURA NAS PAREDES DA PEÇA:** se iniciarmos a deposição sempre do mesmo ponto, corremos o risco do surgimento de efeitos similares a costuras verticais nas paredes da peça. Recomenda-se utilizar propriedades construtivas que atribuem a esta costura posições mais adequadas.

2.1.4 Matéria-prima utilizada na Manufatura Aditiva

Nesta seção será feito um breve resumo sobre as duas principais matérias-primas utilizadas na FDM, que são os termoplásticos PLA (Poli ácido láctico) e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). Por serem ambos termoplásticos, apresentam características como maleáveis quando aquecidos e sólidos quando esfriados. O Quadro 1 traz um comparativo entre estes dois materiais:

Tabela 1 – Comparativo entre matérias-primas

| Propriedades | ABS | PLA |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Resistência à Tração | 14,7 [MPa] | 24,8 [MPa] |
| Módulo de Elasticidade | 1335,9 [MPa] | 1896,0 [MPa] |
| Alongamento | 7,08% | 3,690% |
| Densidade | 1,04 [g/cm ³] | 1,24 [g/cm ³] |
| Ponto de Fusão | 220 [°C] | 185 [°C] |
| Dureza | 74 [Shore D] | 85 [Shore D] |
| Temperatura de transição Vítre | 100 [°C] | 60 [°C] |
| Preço da bobina (1kg, 1.75mm, Preta) | R\$ 64,90 | R\$ 94,90 |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

2.2 RELAÇÃO ENTRE A FUNDIÇÃO EM AREIA E MODELOS POR MA

2.2.1 Processo de Fundição em areia

No processo de fundição em areia, no molde a ser vazado, é criada uma cavidade utilizando o modelo, geralmente de aço, alumínio, madeira ou isopor, da peça a ser feita. Este modelo deve apresentar características maiores que a da peça final devido ao fato de que,

durante a solidificação do metal, ocorre a contração de volume. Além dos modelos, são utilizados ferramentais chamados de machos, geralmente de areia, que tem como função canais que impeçam que o metal preencha aquela área do molde (ALBUQUERQUE, 2017).

Além dos machos, o molde também pode apresentar insumos como copos e tubos refratários, luvas de grafite e resfriadores.

Os copos e tubos tem como função suportar altas temperaturas durante o vazamento e canalizar o aço para dentro do molde.

Já as luvas, por apresentarem características isolantes e exotérmicas, faz com que o aço permaneça em estado líquido por mais tempo. O metal durante a solidificação tende a se contrair, então as luvas são utilizadas para preencher os vazios do fundido, chamados de rechupe.

Os resfriadores têm funções opostas às luvas, pois eles aceleram a solidificação do metal naquela área. São utilizados em fundos de moldes e em locais que não é possível utilizar as luvas.

Defeitos em peças de fundição são entendidos como qualquer desvio presente no item final em relação à qualidade especificada antes da fabricação da peça. Esta definição pode abranger aspectos relativos ao estado interno e da superfície da peça, presença de vazios, precisão dimensional e acabamento superficial. As origens destes defeitos podem estar conectadas aos moldes de areia (erosão, movimentação do molde, etc.), à alimentação do metal líquido (características dos massalotes, das ligas e dos canais de alimentação escolhidos) e à composição química dos elementos utilizados e a sua reação com o oxigênio (DAGNESE, 2008).

2.2.2 Modelos em Manufatura Aditiva

Os desenhos dos modelos que serão feitos por manufatura aditiva devem ter a peça orientada na câmara de construção para que haja uma redução do material de suporte a ser utilizado, ter uma boa relação entre peso e volume, além de possuir estruturas de suporte para entalhes e pedaços sobressalentes (SWIFT, 2013).

Entretanto, deve-se levar em conta também limitações como a anisotropia do material devido à deposição em faixas, dificuldade da formação de características como ângulos agudos e cantos vivos devido a pressão de contato nos filamentos que saem do bico extrusor e uma resistência à tração menor quando comparado à moldagem do mesmo termoplástico por injeção (SWIFT, 2013).

Para que haja um ajuste adequado de um componente de fundição, elementos como linha de partição, concentração de massa, contração de metal e espessura da parede devem ser levados em conta (RAVI, 2004).

Dentre estes itens citados acima, um dos principais é a linha de partição, pois é por ela que será criada a cavidade do molde. O posicionamento da linha de partição depende das demandas do cliente, ponderações econômicas e particularizações de qualidade (RAVI, 2004).

O desenho da linha de partição começa escolhendo a melhor direção de partição para que o impacto da utilização de machos seja menor, garantindo um menor custo de produção e uma maior produtividade, devido a necessidade pequena de ferramentaria (RAVI, 2004).

3 METODOLOGIA

Nesta seção, será realizada uma revisão dos métodos utilizados por trabalhos anteriores que obtiveram sucesso em utilizar a manufatura aditiva para a produção de modelos para ser aplicados em uma fundição.

Para isso, foi elaborada uma pesquisa bibliográfica a partir de materiais construídos anteriormente através da utilização de documentos impressos em livros, artigos científicos, dissertações e teses. Emprega-se também dados ou categorias teóricas já discutidas e registradas por outros pesquisadores.

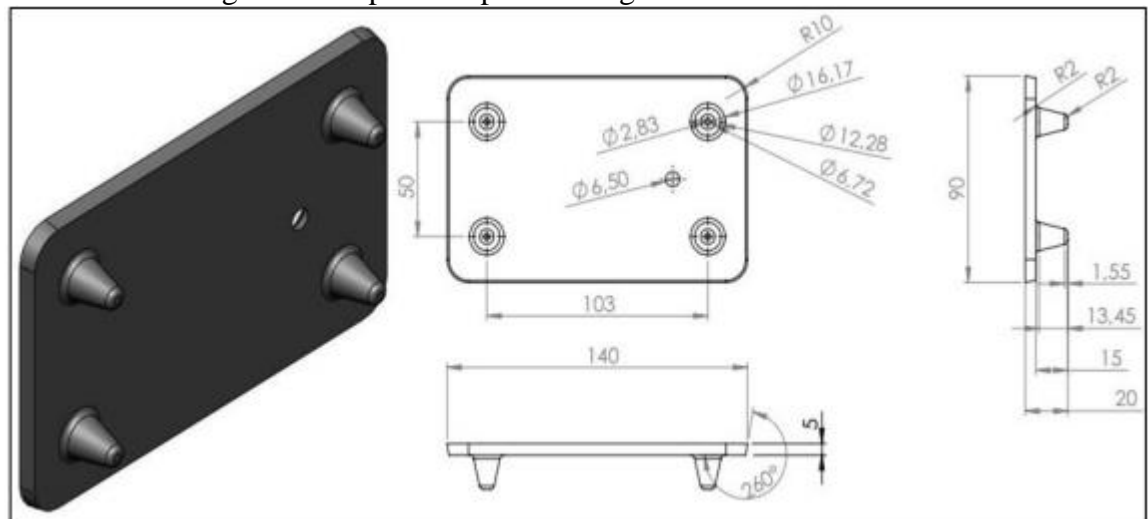
3.1 CONFECÇÃO E APLICAÇÃO DE MODELOS POR MANUFATURA ADITIVA

3.1.1 Suporte de porta de fogão à lenha

Em uma dissertação realizada por Bruno Souza Albuquerque em 2017, o equipamento utilizado foi a impressora Core A1™, com dimensões de 300mm de largura, 200mm de profundidade e 250mm de altura. A peça a ser produzida por manufatura aditiva foi um suporte que é parafusado à porta de fogões à lenha.

Segundo Albuquerque (2017), os motivos que o levaram à escolha deste objeto foram a geometria simples e plana da peça, fazendo com que o tempo de impressão seja baixo e o processo de medição seja facilitado, além de não causar grandes riscos ao operador e nem prejuízos à empresa de fundição caso haja alguma falha durante o processo. A peça está representada em 3D na Figura 4.

Figura 4 – Suporte de porta de fogões à lenha em 3D



Fonte: Albuquerque (2017).

Finalizada a impressão de um modelo de PLA e um modelo de ABS, as peças prosseguiram para os testes de campo. Para isso, os itens foram fixados a uma caixa de madeira e levados a um equipamento soprador de machos e moldes de areia, onde é realizado o processo de injeção, compactação e secagem da areia a verde na caixa por meio de ar comprimido. Para Albuquerque, a finalidade deste passo foi, por ser um processo severo, ponderar mais rapidamente o desgaste dos utensílios produzidos pela manufatura aditiva.

Com o equipamento soprador programado de maneira a conformar as características da caixa de madeira utilizada, os modelos passaram por 200 ciclos de produção, realizando medições após os primeiros 100 ciclos e ao final dos 200 ciclos.

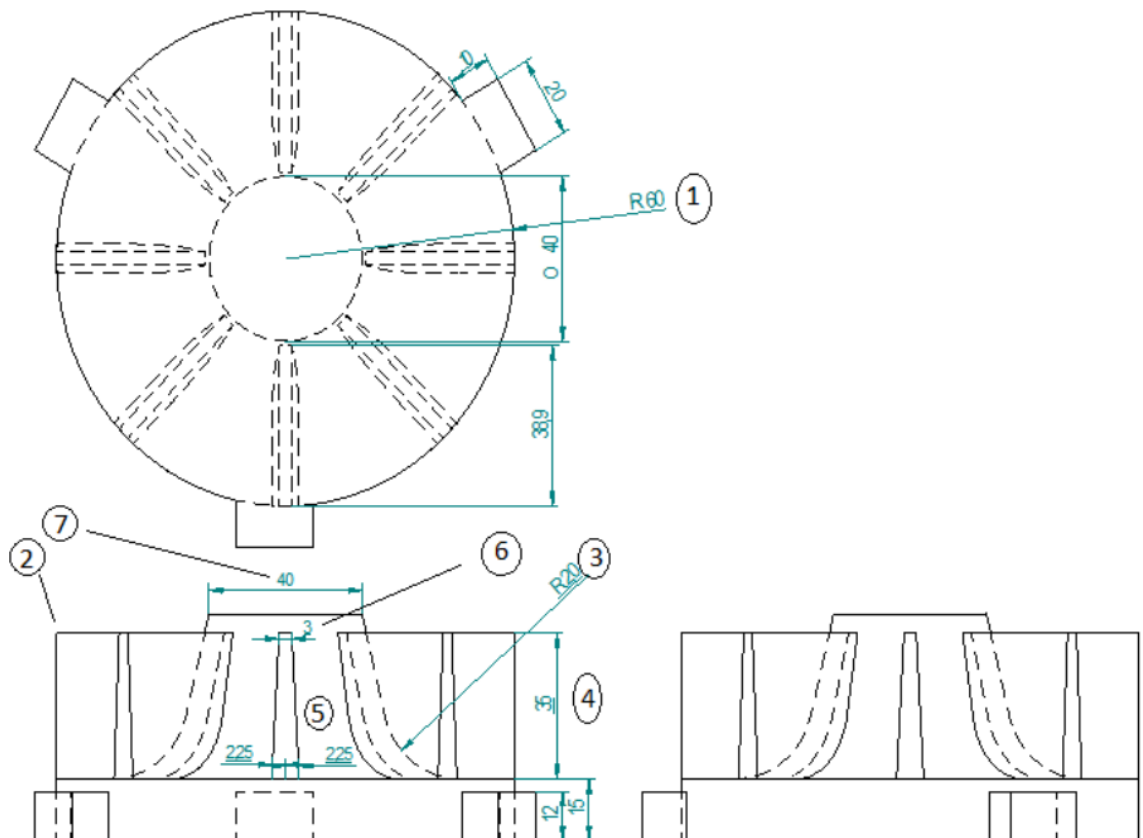
Em relação aos custos de fabricação, Albuquerque (2017) diz que a empresa utiliza um modelo feito em resina epóxi Araldite® e que o tempo de vida destes itens é estimado em 6000 moldes, sendo influenciados pela maneira que são manuseados e armazenados. Além disso, ele contou com o auxílio do modelador da empresa para estimar os valores de produção de modelos e moldes. Com a estimativa dos custos e frequência de reparos em mãos, foi possível realizar a comparação dos valores de construção de moldes utilizando métodos convencionais e moldes produzidos através da manufatura aditiva.

3.1.2 Impulsor de um compressor centrífugo

Em um artigo científico construído em 2014, por Sagar M Baligheid *et al.*, foram realizadas comparações entre modelos feitos a partir da manufatura aditiva e modelos de madeira em relação às precisões dimensionais, qualidade de superfície e custo de investimento na produção de moldes de areia.

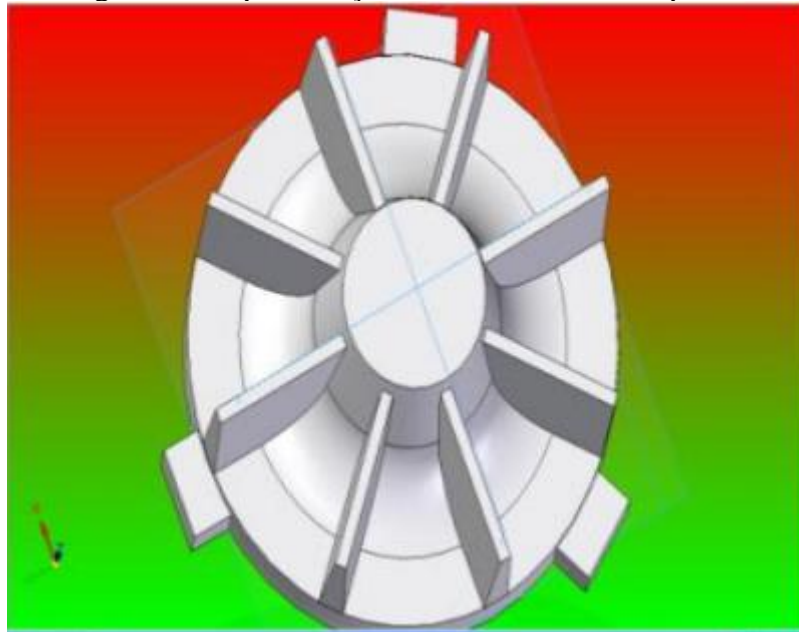
Primeiramente, o impulsor foi modelado utilizando o *software* pro/ENGINEER®, que posteriormente viria a se chamar PTC Creo®. Para Baligheid *et al.* (2014), *softwares* que utilizam a modelagem de sólidos conseguem desenvolver objetos tridimensionais com uma precisão maior que *softwares* como o Auto CAD, que utilizam a modelagem por *wire-frame*. O impulsor é representado pelas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Impulsor em CAD



Fonte: Baligheid *et al.* (2014).

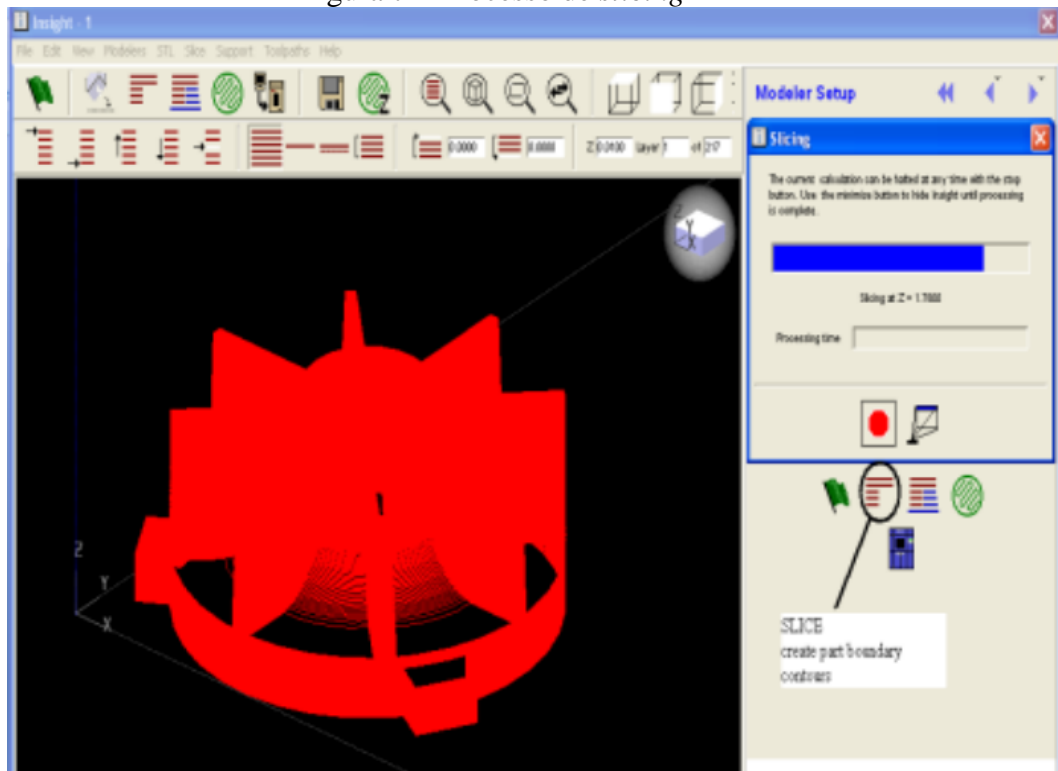
Figura 6 – Representação tridimensional do impulsor



Fonte: Adaptado de Baligheid *et al.* (2014).

Finalizado o desenho, o arquivo foi convertido para o formato STL que foi adotado como o formato padrão da indústria de prototipagem rápida.

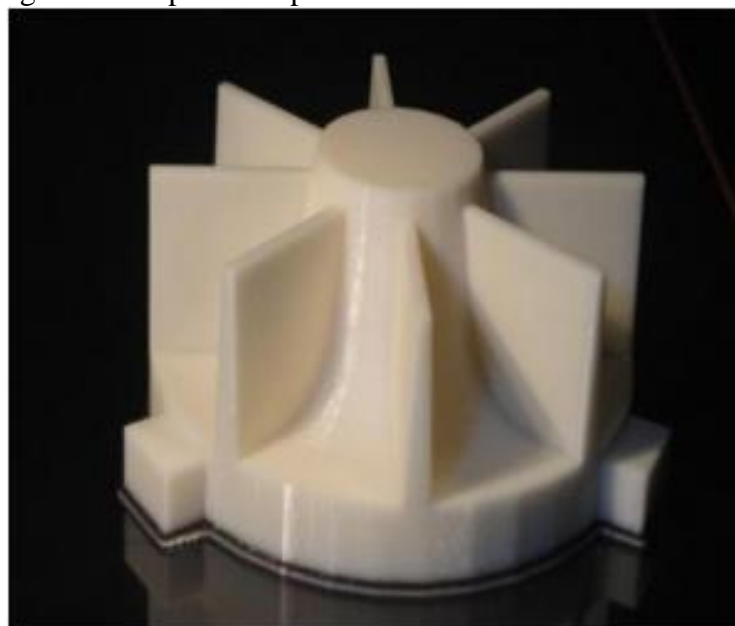
Posteriormente, a ilustração passou pelo processo de *slicing*, processo em que um *software* fatia a peça em diversas camadas para que sejam definidas as coordenadas que serão seguidas pela impressora 3D. Diversos programas estão disponíveis e a maioria deles permite ao usuário modificar características como o tamanho e orientação do modelo. Para Baligheid *et al.* (2014), a orientação de construção escolhida para o objeto pode impactar, parcialmente, o tempo de produção do item, pois ao colocar a menor dimensão na direção do plano Z, isso faz com que haja uma redução no número de camadas e, conseqüentemente, um menor tempo de impressão. O *software* utilizado para este caso foi o Insight®. Este processo está representando pela Figura 7.

Figura 7 – Processo de *slicing*

Fonte: Baligheid *et al.* (2014).

Após o processo de *slicing*, o item foi impresso utilizando o método de impressão FDM, tendo como matéria-prima o ABS. A Figura 8 ilustra o impulsor impresso.

Figura 8 – Impulsor impresso através da manufatura aditiva



Fonte: Baligheid *et al.* (2014).

Para a realização das comparações, foram feitos moldes utilizando o modelo de ABS e modelo de material. Os moldes passaram, então, por processos de fundição, tendo como material de preenchimento o alumínio líquido. A Figura 9 mostra o produto final feito através do modelo de ABS e a Figura 10 o item produzido a partir de um modelo de madeira.

Figura 9 – Produto feito a partir do modelo de ABS



Fonte: Baligheid *et al.* (2014).

Figura 10 – Item feito através de um modelo de madeira



Fonte: Baligheid *et al.* (2014).

3.1.3 Fundição de uma liga de alumínio em um molde de areia

Em um trabalho realizado em 2019 por P. Rodríguez-González *et al.*, foram realizados testes comparando o tempo de manufatura, taxa de resfriamento, desvio dimensional, qualidade e porosidade superficial e defeitos entre a técnica de fundição em areia (utilizando a tecnologia FDM para a construção do molde) e tecnologia de manufatura aditiva *InkJet 3D Printing*. Entretanto, para este trabalho, foi dado um foco maior às partes relacionadas a fundição de areia utilizando a modelagem por fusão e deposição (FDM).

Segundo Rodríguez-González *et al.* (2019), para que fosse possível construir o molde de areia, foi necessário desenvolver um modelo constituído de diversas partes produzidos por FDM. Este modelo constituía da peça final desejada, além de todo o sistema de alimentação do molde por onde passará a liga de alumínio escolhida. Também foram confeccionadas duas caixas de madeira que possuem a função de conter a areia compactada e alinhar as duas metades do molde.

Com estes itens produzidos, cada metade do modelo foi colocada em sua devida posição e passou pelo processo de compactação de areia. Finalizado este processo, os modelos foram removidos e as duas metades foram unidas obtendo o molde final.

A Figura 11 ilustra o modelo feito por FDM e a Figura 12 representa o molde de areia finalizado.

Figura 11 – Modelo feito por modelagem por fusão e deposição



Fonte: Rodríguez-González *et al.* (2019)

Figura 12 – Molde final para fundição em areia



Fonte: Rodríguez-González *et al.* (2019).

Este molde, ainda segundo Rodríguez-González *et al.* (2019), continha uma bacia de vazamento, um gito de descida afunilado que terminava na base do gito, ou poço. Os canais de distribuição alimentavam o molde horizontalmente e eram conectados por dois canais de ataque verticais. Outra característica dos canais era que a sua seção transversal diminuía linearmente garantindo um fluxo de metal líquido uniforme. Além disso, foi colocado um massalote para prover uma quantidade extra de metal fundido devido ao possível encolhimento do metal durante a solidificação, além de evitar porosidades no material final. O volume final do molde totalizou em 1073 cm^3 , pesando aproximadamente 25kg.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos trabalhos explicitados na Metodologia, esta seção tem o intuito de mostrar o que pôde ser descoberto a partir da aplicação dos modelos produzidos através da manufatura aditiva em relação ao seu desempenho, tempo e custo de produção e compará-los com métodos convencionais de manufatura de modelos, como é o caso do trabalho realizado por Albuquerque (2017) e Baligheid *et al.* (2014), ou até mesmo realizar um contraste entre tecnologias de manufatura aditiva, como ocorre no artigo de Rodríguez-González *et al.* (2019), em que se utiliza a tecnologia FDM, foco deste trabalho, e a tecnologia *InkJet 3D Printing*, que, para efeitos de entendimento do leitor, será feita uma breve descrição desta tecnologia mais à frente.

Em Albuquerque (2017), são fornecidos quadros que mostram o dimensionamento dos modelos utilizados em três etapas do teste: após passarem pelo pós-processamento, depois de 100 ciclos e ao final dos 200 ciclos. Estas dimensões são ilustradas nos Quadros 2, 3 e 4. Vale ressaltar que, para os testes, foram utilizados um modelo de PLA e um modelo de ABS.

Tabela 2 – Dimensões dos modelos após pós-processamento

| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Medida 5 | Média | Desvio Padrão |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|---------------|
| PLA | | | | | | | |
| Espessura (mm) | 5,00 | 4,98 | 5,10 | 5,06 | 5,08 | 5,04 | 0,022 |
| Rugosidade Superficial (µm) | 9,25 | 8,95 | 9,46 | 4,29 | 3,44 | 7,09 | 2,9539 |
| Massa (g) | 52,31 | | | | | | |
| ABS | | | | | | | |
| Espessura (mm) | 5,36 | 5,34 | 5,44 | 5,40 | 5,46 | 5,40 | 0,0509 |
| Rugosidade Superficial (µm) | 9,70 | 8,77 | 6,22 | 4,25 | 5,24 | 6,83 | 2,3214 |
| Massa (g) | 30,35 | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

Tabela 3 – Dimensões após 100 ciclos

| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Medida 5 | Média | Desvio Padrão |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|---------------|
| PLA | | | | | | | |
| Espessura (mm) | 5,04 | 5,02 | 5,00 | 5,08 | 5,00 | 5,03 | 0,0335 |
| Rugosidade Superficial (µm) | 12,06 | 10,41 | 12,67 | 12,52 | 12,12 | 11,95 | 0,9021 |
| ABS | | | | | | | |
| Espessura (mm) | 5,26 | 5,14 | 5,20 | 5,18 | 5,28 | 5,21 | 0,0576 |
| Rugosidade Superficial (µm) | 9,85 | 11,00 | 12,31 | 11,54 | 12,65 | 11,47 | 1,1122 |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

Tabela 4 – Dimensões após 200 ciclos

| | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 | Medida 5 | Média | Desvio Padrão |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|-------|---------------|
| PLA | | | | | | | |
| Espessura (mm) | 5,18 | 5,14 | 5,16 | 4,68 | 4,76 | 4,98 | 0,2430 |
| Rugosidade Superficial (μm) | 11,41 | 10,52 | 8,76 | 10,92 | 11,20 | 10,56 | 1,0610 |
| ABS | | | | | | | |
| Espessura (mm) | 4,96 | 5,30 | 5,12 | 4,90 | 5,12 | 5,08 | 0,1568 |
| Rugosidade Superficial (μm) | 11,53 | 9,43 | 10,04 | 10,14 | 9,25 | 10,08 | 0,8970 |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

Ao analisar as médias dos três quadros, pode-se perceber que para o modelo de PLA, houve uma diminuição na espessura de 0,01mm nos primeiros 100 ciclos e ao final dos 200 ciclos, houve uma outra redução de 0,05mm. Já para o modelo de ABS, o decréscimo foi de 0,19mm após 100 ciclos e 0,13mm no término dos 200 ciclos.

Já para a rugosidade superficial, ambos modelos apresentam o mesmo comportamento: há um aumento nos primeiros 100 ciclos, de 7,09mm para 11,95mm para o PLA e de 6,83mm para 11,47mm para o ABS, e há um decaimento ao final dos testes, em que o modelo de PLA apresenta uma rugosidade superficial de 10,56mm e o modelo de ABS 10,08mm.

Analisando os valores de desvio padrão, é possível perceber que, para ambos materiais, há um aumento do desvio da espessura ao final dos testes de campo em relação ao início, enquanto que o desvio da rugosidade superficial se mostra menor em relação aos valores do Quadro 2.

Assim, pudemos analisar que o desgaste do modelo de PLA nos testes de campo foi menor quando comparado ao modelo ABS. Segundo Albuquerque (2017), para que se possa afirmar com certeza que o desgaste superficial ocorre de uma maneira linear, devem ser escolhidas mais características para serem analisadas e comparadas, pois quanto maior a base de dados, melhor será a análise realizada, garantindo afirmações mais seguras.

Em relação ao desempenho dos moldes feitos a partir dos modelos de manufatura aditiva, foram manufaturadas oito peças através da fundição em areia. Quatro delas utilizando os modelos nos inícios dos ciclos e quatro ao final dos ciclos. As dimensões são mostradas nas Quadros 5 e 6. Os itens “Média 1” a “Média 5” são médias dos valores de duas peças.

Tabela 5 – Dimensões das peças finais com modelos nos ciclos iniciais

| | Média 1 | Média 2 | Média 3 | Média 4 | Média 5 | Média Final | Desvio Padrão |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------------|
| PLA | | | | | | | |
| Comprimento (mm) | 138,00 | 137,80 | 138,64 | 137,94 | 137,66 | 138,01 | 0,3770 |
| Largura (mm) | 88,70 | 88,68 | 88,70 | 89,00 | 88,68 | 88,75 | 0,1390 |
| Espessura (mm) | 5,00 | 5,28 | 5,30 | 5,26 | 5,32 | 5,23 | 0,1316 |
| Massa (g) | 472,42 | | | | | | |
| ABS | | | | | | | |
| Comprimento (mm) | 139,00 | 138,84 | 138,58 | 138,60 | 139,20 | 138,84 | 0,2647 |
| Largura (mm) | 89,20 | 88,82 | 89,16 | 89,16 | 90,02 | 89,27 | 0,4456 |
| Espessura (mm) | 5,38 | 5,40 | 5,52 | 5,54 | 5,50 | 5,47 | 0,0729 |
| Massa (g) | 495,12 | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

Tabela 6 – Dimensões das peças finais com modelos nos ciclos finais

| | Média 1 | Média 2 | Média 3 | Média 4 | Média 5 | Média Final | Desvio Padrão |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------------|
| PLA | | | | | | | |
| Comprimento (mm) | 138,52 | 138,66 | 138,40 | 138,18 | 138,38 | 138,43 | 0,1781 |
| Largura (mm) | 89,00 | 89,00 | 89,64 | 89,42 | 89,00 | 89,21 | 0,3005 |
| Espessura (mm) | 5,44 | 5,40 | 5,38 | 5,38 | 5,44 | 5,41 | 0,0303 |
| Massa (g) | 466,03 | | | | | | |
| ABS | | | | | | | |
| Comprimento (mm) | 139,00 | 139,22 | 138,76 | 138,90 | 139,00 | 138,98 | 0,1682 |
| Largura (mm) | 89,30 | 89,10 | 88,74 | 89,40 | 89,32 | 89,17 | 0,2656 |
| Espessura (mm) | 5,14 | 5,20 | 5,40 | 5,44 | 5,36 | 5,31 | 0,1308 |
| Massa (g) | 503,08 | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

Percebe-se que o desgaste dos modelos ao longo dos testes não causa um grande impacto nas dimensões da peça, exceto pela massa da peça final, em que é possível observar uma pequena diminuição para o modelo PLA e um baixo aumento para o modelo ABS.

Além disso, Albuquerque (2017) também traz alguns comentários acerca dos defeitos encontrados nas peças e nos modelos. Segundo ele, devido ao fato de os moldes apresentarem dimensões pequenas para os padrões da empresa onde os testes foram realizados, houve dificuldades no vazamento do metal líquido, principalmente na hora de se colocar a quantidade correta do metal e de se adaptar um reservatório que fosse compatível com as dimensões dos canais de alimentação dos modelos. Estes defeitos podem ter sido a causa das mudanças nas massas das peças descritas anteriormente. Além disso, os modelos, por não serem confeccionados com 100% de preenchimento, apresentaram entradas de ar que não resistiriam à pressão do soprador e, por isso, tiveram que ser preenchidos com massa plástica para que os testes pudessem ser realizados.

Entretanto, mesmo com estes defeitos presentes, Albuquerque (2017) afirma que os resultados se mostraram de maneira satisfatória e que os moldes de areia feitos a partir dos modelos de manufatura aditiva tiveram um bom desempenho e que não apresentaram grandes diferenças em relação aos moldes de modelos convencionais.

Por fim, Albuquerque (2017) também traz uma estimativa em relação ao custo de fabricação. Para isso, as comparações foram feitas para a produção de caixa de machos com 6 modelos. Foram considerados os materiais epóxi, utilizado pela fábrica em questão, e PLA, pois apresentou um melhor desempenho que o ABS. Os dados são ilustrados no Quadro 7.

Tabela 7 – Dados de custo de fabricação

| Material | Custo de produção (em 2017) | Vida útil (em moldes) | Unidade monetária por molde (em 2017) |
|----------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Epóxi | R\$ 1.200,00 | 10000 | R\$ 0,12 |
| PLA | R\$ 420,00 | 2700 | R\$ 0,15 |

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2017).

O custo da fabricação utilizando os modelos de PLA apresentou um valor um pouco maior que o convencional, algo que pode ser atrelado à simplicidade da peça escolhida para a realização dos testes, pois a vantagem de utilizar a manufatura aditiva é diretamente proporcional à complexidade da peça (ALBUQUERQUE, 2017).

Passando agora para a pesquisa realizada por Baligheid *et al.* (2014). Foram realizadas comparações entre os modelos feitos em ABS e modelos convencionais de madeiras em relação a sua precisão dimensional, custo e tempo de fabricação.

Utilizando as medidas e os pontos de 1 a 7 presentes na Figura 5 como base de comparação e os dados fornecidos por Baligheid *et al.* (2014), alguns comentários podem ser feitos acerca das precisões dimensionais dos objetos testados.

Para o modelo convencional de madeira:

- O modelo apresentou, em média, um valor de variação dimensional de, aproximadamente, 0,025mm em relação ao modelo de ABS;
- A peça final fundida com alumínio a partir do modelo de madeira apresentou como variação dimensional, em média, 0,051mm;
- A taxa de encolhimento na solidificação do metal foi de 1,45%;
- Microestrutura mais densa e frágil que o modelo de ABS;
- Não apresentava estrutura porosa e não foi necessário aplicar revestimentos na superfície do objeto;

- Apresentava uma rugosidade superficial de 0,61mm para o modelo e 6,7 μ m para a peça final.

Para o modelo de ABS:

- A peça final apresentou como variação dimensional, em média, 0,045mm;
- A taxa de encolhimento do metal foi de 1,38%;
- Microestrutura não é tão densa e nem tão frágil quanto a de madeira;
- Não apresentou estruturas porosas e possuía um bom acabamento superficial;
- A rugosidade superficial do modelo era de 0,71mm e da peça final 4,7 μ m.

Em relação ao tempo de produção, segundo Baligheid *et al.* (2014), para construir um modelo de madeira de um impulsor como o da Figura 9 foram necessárias 22 horas, enquanto que o modelo manufaturado por FDM levaram apenas 6h15min, ou seja, é possível fabricar praticamente quatro modelos através da manufatura em um mesmo espaço de tempo que um modelo de madeira é feito.

O custo de produção, em 2014, para o modelo de madeira era de 300 INR (equivalente a R\$11,30 em junho de 2014. Fonte: Banco Central do Brasil), podendo ser produzidos entre 40 e 60 peças fundidas. Já o modelo de ABS custava 600 INR (equivalente a R\$22,60 em junho de 2014. Fonte: Banco Central do Brasil), produzindo entre 130 e 150 peças fundidas. Assim como no trabalho de Albuquerque (2017), pode-se ver que a unidade monetária por peça produzida seria, em 2014, entre R\$0,28 e R\$0,19 para o modelo de madeira e entre R\$0,17 e R\$0,15 para o modelo de ABS.

É possível afirmar, então, que, nesta pesquisa, o modelo feito através da manufatura aditiva se mostra mais vantajoso que o modelo de madeira por possuir uma maior precisão dimensional, maior qualidade superficial, possível produzir um maior número de moldes a partir de um mesmo modelo e, principalmente, apresentou um menor tempo e custo de fabricação.

Antes de entrar na discussão dos resultados encontrados na pesquisa realizada por Rodríguez-González *et al.* (2019), deve ser feita uma breve descrição de uma das tecnologias utilizadas nesse estudo, a chamada *InkJet 3D Printing*. Nesta tecnologia, um foto-polímero liquefeito é aquecido até aproximadamente 73 graus Celsius, e, então, jateado sobre uma superfície e, logo em seguida, é curado utilizando luz ultra-violeta. A maioria das impressoras que utilizam esta técnica apresentam dois cabeçotes de impressão, um para o material do suporte e outro para o modelo em si. Cabeçotes adicionais podem ser incorporados à impressora caso deseje-se um maior rendimento de material ou para imprimir materiais extras.

Cada cabeço apresenta diversos bicos que são alinhados linearmente. A peça final é criada a partir do empilhamento de finas camadas do material que foi curado anteriormente, enquanto a mesa de construção se move para baixo enquanto o material é manufaturado (J. MULLER *et al.*, 2015).

Retornando ao trabalho de Rodríguez-González *et al.* (2019), os resultados foram obtidos a partir da comparação entre um molde de fundição em areia feito a partir de um modelo impresso por FDM e um molde de cerâmica produzido utilizando a tecnologia *InkJet 3D Printing* (3DP).

Em relação ao peso e volume total, o molde de areia apresentou um volume total de 1073 cm³ e, por contar com uma grande caixa para que o molde fosse contido, um peso de aproximadamente 25kg. Já para o molde feito por *3D Printing* apresentou um volume e peso no valor de 449cm³ e 0,55kg, respectivamente. Vale ressaltar também, que o rendimento metálico no molde por *3D Printing* se mostrou 29% melhor que o molde de areia (49,7% contra apenas 20,8%).

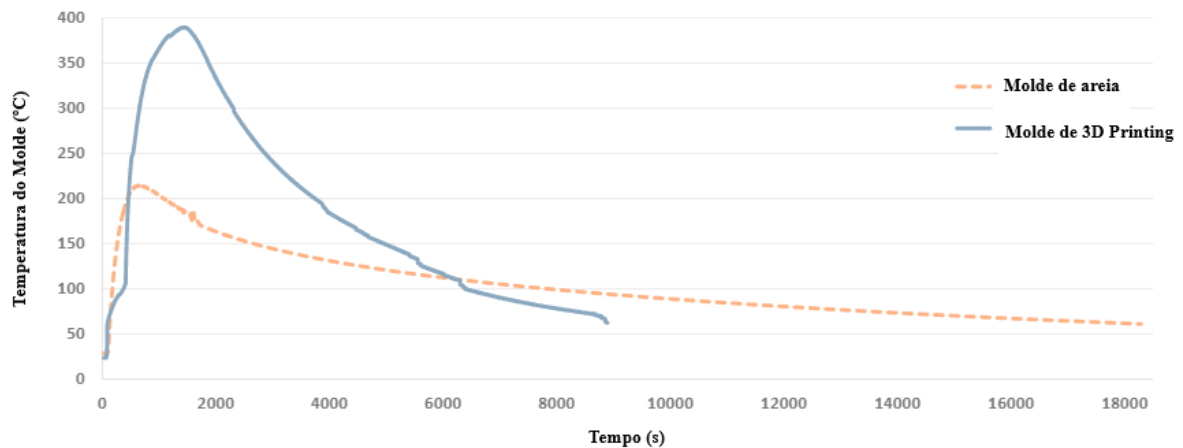
Segundo Rodríguez-González *et al.* (2019), pelo fato de os dois moldes apresentarem diferentes volumes, espessuras e taxas de transmissão de calor, foram registrados comportamentos bem diferentes em relação ao tempo de vazamento e de solidificação de cada peça. Para o molde de areia, levaram 5,24 segundos para que houvesse o preenchimento completo e mais 541 segundos para o processo de solidificação, enquanto que no molde de 3DP, foram 2,24 segundos de preenchimento e 378 segundos de solidificação. Para Rodríguez-González *et al.* (2019), menos tempo de solidificação resultam em estruturas com dendritos menores e com menos porosidades.

Sobre o tempo de produção, Rodríguez-González *et al.* (2019) diz que para o processo de desenvolvimento do modelo por FDM foram 20 horas de trabalho; para as caixas de madeira e suavização da superfície do modelo levaram 4 horas; 3 horas para compactação e vazamento do metal fundido; por fim, o processo de resfriamento, desmoldagem e retirada do massalote e dos canais de ataque levaram mais 3 horas. Portanto, o processo de fundição em areia utilizando modelo de FDM levou, desde o desenvolvimento do modelo até o produto final, aproximadamente 30 horas de trabalho.

Já para o molde feito por 3DP, foram 3 horas para desenvolvimento e impressão do item, 4 horas de limpeza, pós-processamento e vazamento do alumínio líquido e mais 3 horas para o processo de resfriamento, desmoldagem e retirada do massalote e canais de ataque, totalizando 10 horas de trabalho, ou seja, um tempo de manufatura três vezes menor que o tempo do molde de areia.

A Figura 13 mostra a taxa de resfriamento dos dois moldes e, através dela, podemos ver que, por apresentar uma inclinação menor, o molde de areia apresenta um tempo de resfriamento maior e uma menor dissipação de calor que o molde de 3DP. Isso se deve, segundo Rodríguez-González et al. (2019), da fusão entre o molde apresentar uma maior espessura e uma menor condutividade de calor. Apresentar um tempo de resfriamento grande afeta negativamente, principalmente, a produtividade e as propriedades da peça final.

Figura 13 – Taxa de resfriamento dos moldes



Fonte: Adaptado de Rodríguez-González *et al.* (2019).

No que diz respeito a precisão dimensional, foi demonstrado, na pesquisa, que o molde por 3DP apresenta uma precisão maior que o molde de areia, possibilitando a manufatura de produtos finais mais fiéis aos desenhos iniciais do que as peças finais produzidas por fundição em areia a partir de um modelo feito por FDM. Além disso, a precisão do molde é grandemente influenciada pelo modelo, pois a presença deste é indispensável para a confecção de moldes de areia, além de ser um processo que utiliza trabalho manual, aumentando a chances de ocorrer erros dimensionais.

Através do Quadro 8 é possível verificar os valores da rugosidade superficial. Nela, podemos ver que a média dos valores na direção da construção de camada é maior para a fundição em areia do que a 3DP (3,70 μ m contra 3,67 μ m), mas para a direção contrária à construção das camadas, o resultado é inverso, com a fundição em areia apresentando valor de 4,53 μ m contra 7,07 μ m da 3DP. Estes resultados podem ser explicados, segundo Rodríguez-González et al. (2019), pelo fato do tipo de areia utilizada no molde de fundição em areia e pela presença do Efeito Escada no item produzido por 3DP.

Tabela 8 – Rugosidade superficial dos dois moldes

| | Ra₁ | Ra₂ | Ra₃ | Ra₄ | Ra₅ | Média |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Na direção das camadas de construção | | | | | | |
| Ink Jet 3D Printing (µm) | 3,91 | 2,51 | 4,56 | 2,58 | 4,75 | 3,67 |
| Molde de areia (µm) | 4,19 | 3,66 | 3,68 | 3,58 | 3,37 | 3,70 |
| Na direção contrária das camadas de construção | | | | | | |
| Ink Jet 3D Printing (µm) | 7,00 | 5,69 | 8,90 | 5,00 | 8,73 | 7,07 |
| Molde de areia (µm) | 5,36 | 4,86 | 4,78 | 3,94 | 3,74 | 4,53 |

Fonte: Adaptado de Rodríguez-González et al. (2019).

Quanto aos defeitos, segundo Rodríguez-González *et al.* (2019), só foram presenciados no molde de fundição em areia. Entre eles estão:

- Deslocamento da linha de partição devido a posição incorreta das duas metades do molde;
- Inclusão de areia devido à uma compactação desigual da areia;
- Defeito relacionado à uma fundição incompleta, associado a uma fluidez metálica insuficiente ou a presença de escória na superfície;
- Presença de marcas de fluxo na superfície que podem ter surgido a partir do aparecimento de películas de óxido.

Assim, ao analisar os três trabalhos citados nesta seção, percebe-se que, quando comparados aos modelos convencionais, modelos produzidos por manufatura aditiva utilizando a tecnologia FDM se mostram muito vantajosos, tanto na parte de tempo de produção quanto na parte econômica. Entretanto, dentro das tecnologias de manufatura aditiva, existem técnicas, como a *InkJet 3D Printing*, que se mostram mais vantajosas que a técnica por FDM, garantindo moldes mais leves, com uma taxa de resfriamento maior, garantindo uma maior produtividade e peças finais com melhores propriedades.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos, devem ser escolhidos e desenvolvidos modelos adequados para serem produzidos por manufatura aditiva utilizando a tecnologia de modelagem por fusão e deposição para que seja possível realizar os testes de campo e obter os dados necessários para realizar comparações, entre os modelos 3D e modelos convencionais, de características como tempo de produção, desempenho e investimento necessário para utilização desta tecnologia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A impressão de modelos utilizando a manufatura aditiva é algo que necessita de um alto tempo de impressão, uma grande precisão dimensional, equipamentos que utilizam alguma das diferentes tecnologias e/ou matérias-primas difundidas, mas que ainda se mantém como um procedimento acessível e prático, necessitando de, basicamente, uma impressora 3D, matéria-prima de impressão e conhecimentos de CAD. Entretanto, mesmo sendo algo simples, é capaz de produzir itens com geometrias altamente complexas, o que dá, a esta maneira de confeccionar peças, uma grande vantagem sobre os métodos convencionais da confecção de modelos e moldes para fundição, pois, como pudemos ver neste trabalho, quanto mais intrincada é a geometria da peça a ser produzida, mais vantajosa é a manufatura aditiva.

Ainda em relação aos modelos para fundição em areia, foi possível verificar as diferentes vantagens da utilização dos modelos 3D no lugar dos modelos convencionais. Através dos testes feitos por Albuquerque (2017), analisou-se que os modelos produzidos por FDM, em específico os feitos por PLA, garantiram peças finais com uma maior qualidade, com uma maior resistência à abrasão e aos desgastes, além de serem manufaturadas em um processo seguro, limpo e de fácil automação. Já em Baligheid *et al.* (2014), foi visto que, quando comparados aos modelos de madeira, os modelos de ABS apresentavam diversas vantagens como tempo de produção praticamente quatro vezes menor, metade do custo de produção, com uma produtividade bem maior, além da possibilidade da confecção de peças mais complexas.

Entretanto, através de Rodríguez-González *et al.* (2019), apurou-se que existem, dentro da manufatura aditiva, tecnologias que apresentam vantagens sobre as outras, como é o caso da *InkJet 3D Printing*. Esta tecnologia, para este caso, se mostrou superior ao molde de areia pois apresentou características como menor volume e peso do molde, maior taxa de resfriamento, garantindo uma maior produtividade da peça, menor tempo de produção, além de não apresentar os mesmos defeitos que surgiram durante a moldagem e do vazamento do metal líquido para produção da peça utilizando um molde de areia feito a partir de um modelo confeccionado por FDM.

Assim, é possível afirmar que os objetivos de comparar o desempenho, tempo e custo de produção entre modelos feitos por manufatura aditiva e modelos convencionais foi atendido através de uma pesquisa bibliográfica.

Para trabalhos futuros, para que seja possível transformar esta pesquisa teórica em uma pesquisa empírica deve-se realizar:

- Escolha dos modelos convencionais a serem comparados;
- Design e desenvolvimento dos modelos a serem produzidos por manufatura aditiva em *software* CAD;
- Impressão dos modelos por FDM;
- Realização de testes de campo, a fim de obter uma ampla base de dados para realização de comparações;
- Avaliar os resultados obtidos em relação ao desempenho, tempo e custo de produção dos modelos 3D e compará-los com os modelos convencionais.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Bruno Souza. **Estudo da fabricação de ferramental de fundição por manufatura aditiva**. 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9214/1/PB_DAMEC_2017_2_02.pdf. Acesso em: 15 out. 2020.
- BALIGIDAD, Sagar M. *et al.* Sand casting: conventional and rapid prototyping manufacturing approaches. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, Bangalore, p. 1-5, June. 2014. Disponível em: http://scholar.google.com.br/scholar_url?url=https://www.academia.edu/download/42138684/SAND_CASTING-_CONVENTIONAL_AND_RAPID_PROTOTYPING_MANUFACTURING_APPROACHE_S.pdf&hl=pt-BR&sa=X&ei=VGRTYOeqJ5D_mAH__IEg&scisig=AAGBfm2pXCNR6te1vNKIGFRyJ2EpvsI3Gw&nossl=1&oi=scholar. Acesso em: 15 jan. 2021.
- CIOCA, Vitor Valentim. **Manufatura aditiva: rugosidade superficial de peças em aço maraging 300 pós-processadas por fresamento**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2019;
- COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%c3%a0%20Industria%204.0.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- DAGNESE, Juliana. **Análise de defeitos em peças de ferro fundido cinzento utilizando-se da análise morfológica e correlação com a literatura**. 2008. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213171/000747386.pdf?sequence=1>. Acesso em: 04 fev. 2021.
- DALZOCHIO, João Eduardo Bugno. **Análise de fatores de forma aplicados a manufatura aditiva**. 2017. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9227/1/PB_DAMEC_2017_2_15.pdf. Acesso em: 15 out. 2020.
- FOGGIATO, José Aguiomar. **Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos**. 2005. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102754#:~:text=em%20Engenharia%20Mec%C3%A2nica-,Utiliza%C3%A7%C3%A3o%20do%20processo%20de%20modelagem%20por%20fus%C3%A3o%20e%20deposi%C3%A7%C3%A3o%20\(FDM,insertos%20para%20inje%C3%A7%C3%A3o%20de%20termopl%C3%A1sticos&text=Resumo%3A,no%20material%20especificado%20no%20projeto](https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102754#:~:text=em%20Engenharia%20Mec%C3%A2nica-,Utiliza%C3%A7%C3%A3o%20do%20processo%20de%20modelagem%20por%20fus%C3%A3o%20e%20deposi%C3%A7%C3%A3o%20(FDM,insertos%20para%20inje%C3%A7%C3%A3o%20de%20termopl%C3%A1sticos&text=Resumo%3A,no%20material%20especificado%20no%20projeto). Acesso em: 25 jan. 2021.

FORD, Sharon L. N. Additive manufacturing technology: potential implications for U.S. manufacturing competitiveness. **Journal of International Commerce and Economics**. Washington, p. 17-18, Sept. 2014.

FRANCO, Denise. **Impactos da manufatura aditiva no modelo de negócio**. 2019. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em:
<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/12207/Defesa%20vers%C3%A3o%20final-c%20folha%20de%20aprovacao.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Acesso em: 28 jan. 2021.

GIBSON, I. *et al.* **Additive manufacturing technologies**: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer Science, 2010.

GIORDANO, Caio Mezzeti *et al.* Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 499-523, jun. 2016. Disponível em:
<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1963#:~:text=Neste%20cen%C3%A1rio%2C%20este%20artigo%20visa,dos%20processos%20produtivos%20de%20empresas>. Acesso em: 04 fev. 2021.

KRETSCHKEK, David; FOGGIATO, José A.; VOLPATO, Neri. Infiltração de peças fabricadas por tecnologia FDM com resinas poliméricas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, 2009.

MANUFACTUR3D. **How FDM/FFF 3D printing technology works?** 2018. Disponível em:
<https://manufactur3dmag.com/working-fdm-fff-3d-printing-technology/>. Acesso em: 02 fev. 2021;

MUELLER, J. *et al.* Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design. **Materials and Design**, Zurique, p. 1-2, July. 2015. Disponível em:
http://scholar.google.com.br/scholar_url?url=https://www.academia.edu/download/51373309/Mueller_MechanicalPropertiesOfParts.pdf&hl=pt-BR&sa=X&ei=42tTYKncIpGpmwGmjYgg&scisig=AAGBfm09fSiaBAgi371QJFK8IXltp4uT5Q&nossl=1&oi=scholar. Acesso em: 22 jan. 2021.

RAVI, B. **Metal casting**: computer-aided design and analysis. 4th ed. New Delhi: PHI, 4th print, 2008.

RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P. *et al.* Comparative study of aluminum alloy casting obtained by sand casting method and additive manufacturing technology. *In*: MANUFACTURING ENGINEERING SOCIETY INTERNATIONAL CONFERENCE, 8., 2019, Madri. **Anais [...]**. Madri: Elsevier B.V., 2019. p. 1-8. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311485>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SOARES, G. A. **Fundição**: mercado processos e metalurgia. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/SR-1, 2000.

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. **Manufacturing process selection handbook**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

VOLPATO, Neri *et al.* **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2006.