

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

BRUNO SOUZA ALBUQUERQUE

ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAL DE FUNDIÇÃO POR MANUFATURA ADITIVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

BRUNO SOUZA ALBUQUERQUE

**ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAL DE FUNDIÇÃO POR
MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudo da Fabricação de Ferramental de Fundição por Manufatura Aditiva

Bruno Souza Albuquerque

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 16/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Bruno Belini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. Dra. Maria Nalu Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

Ao meu avô Oderyr (*in memoriam*), pelo exemplo e pelas lições de vida. Alguém que ainda vive nos corações daqueles que tiveram a honra de conhecê-lo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, por mesmo longe ainda se fazerem presentes e pelo apoio incondicional não só durante os anos de faculdade, mas por toda a vida.

Também sou grato à UTFPR e aos professores, principalmente ao meu orientador pelos conhecimentos a mim passados e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Por fim, porém muito importante, à empresa de fundição Fersul pela grande ajuda, cedendo materiais e pessoal especialmente para me auxiliar na pesquisa.

ΕΠΙΓΡΑΦΕ

Life is too short to be little. (DISRAELI,
Benjamin; 1804 - 1881).

RESUMO

ALBUQUERQUE, Bruno Souza. Estudo da fabricação de ferramental de fundição por manufatura aditiva. 2017. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem teórico-prática da fabricação de modelos (ferramental) para fundição, com foco numa análise de custo e vida útil dos mesmos. Apresenta o conceito de manufatura aditiva, seus principais processos e suas aplicações, bem como sua relação e possível aplicação ao setor de fundição de metais. Compara as vantagens e desvantagens dessa tecnologia em relação aos métodos convencionais de confecção de modelos como a usinagem. Complementado por testes de campo, o estudo verificou, a resistência ao desgaste de modelos confeccionados por manufatura aditiva em condições normais de operação. Traz como resultado do estudo os aspectos necessários a se considerar nos equipamentos de manufatura aditiva para serem usados no setor de fundição, bem como uma comparação de custos de fabricação.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Fundição. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

ALBUQUERQUE, Bruno Souza. Study of the manufacture of foundry tooling by additive manufacture. 2017. 48 f. Completion of Course Work –Mechanical Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This research presents a theoretical-practical approach to the manufacture of models (tooling) for casting, focusing on a cost analysis and their lifespan. It presents the concept of additive manufacturing, its main processes and its applications, as well as their relation and possible application to the sector of metal casting. It compares the advantages and disadvantages of this technology over conventional methods of making models such as machining. Complemented by field tests, the study verified the wear resistance of models made by additive manufacture under normal operating conditions. It brings as a result of the study the aspects necessary to be considered in the additive manufacturing equipment to be used in the foundry sector, as well as a comparison of manufacturing costs.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D printing. Foundry. Economic viability.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Additive Manufacturing – Manufatura Aditiva
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene – Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Computer Aided Design – Desenho assistido por computador
CNC	Computer Numerical Control – Controle Numérico Computadorizado
FDM	Fused Deposition Modeling – Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	Fused Filament Fabrication – Fabricação por Filamento Fundido
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PLA	Poly Lactic Acid – Poli Ácido Láctico
RepRap	Replicating Rapid Prototyper – Prototipagem Rápida Replicável
SLS	Selective Laser Sintering – Sinterização Seletiva a Laser

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de manufatura aditiva.	17
Figura 2 - Classificação geral dos processos de prototipagem rápida.	19
Figura 3 - Representação da tecnologia FDM.	20
Figura 4 - Seção transversal de peça produzida por FDM.	21
Figura 5 - Classificação geral dos processos de fundição.	23
Figura 6 - Representação da peça em estudo.	27
Figura 7 - Sopradora de machos e moldes de areia.	28
Figura 8 - Modelos confeccionados por manufatura aditiva.	31
Figura 9 -Caixa de machos.	34
Figura 10 - Molde de areia.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre AM e métodos tradicionais de manufatura.....	18
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre ABS e PLA.....	22
Tabela 2 - Equipamentos de medição.....	29
Tabela 3 – Dados iniciais dos modelos.....	32
Tabela 4 - Dados dos modelos após lixamento.....	33
Tabela 5 – Medidas após 100 ciclos.....	35
Tabela 6 - Medidas após 200 ciclos.....	35
Tabela 7 - Medidas das peças finais nos primeiros ciclos.....	36
Tabela 8 – Medidas das peças finais nos últimos ciclos.....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 MANUFATURA ADITIVA	15
2.1.1 Definição.....	15
2.1.2 O Processo De Manufatura Aditiva.....	15
2.1.3 Comparação Da AM Com Os Métodos Tradicionais	18
2.1.4 Tecnologias De Manufatura Aditiva	19
2.1.5 Modelagem Por Fusão e Deposição.....	19
2.2 MATÉRIA PRIMA DE MANUFATURA ADITIVA.....	22
2.3 SETOR DE FUNDIÇÃO E PROJETO DE MODELOS.....	22
2.3.1 Fundição.....	22
2.3.2 Fundição Em Areia	23
2.3.3 Projeto De Modelos Por Manufatura Aditiva	24
3 METODOLOGIA.....	27

3.1 CONFECÇÃO DE MODELOS POR AM.....	27
3.2 TESTES DE CAMPO	28
3.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE FABRICAÇÃO	29
4 RESULTADOS.....	31
4.1 MODELOS MANUFATURADOS.....	31
4.2 CONFECÇÃO DE MOLDES DE AREIA.....	33
4.3 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO.....	37
5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* – RP) é um processo de fabricação que atua através da adição de material em camadas planas sucessivas, que parte de um modelo virtual em três dimensões (3D) e a partir disso confecciona uma peça física. Essa tecnologia surgiu como um auxílio ao processo de desenvolvimento do produto (PDP), no qual a confecção de protótipos é essencial para reduzir a possibilidade de falhas e melhorar a qualidade do produto final, essa nova tecnologia apresentava facilidade de automação e diminuição de custos na confecção de protótipos (VOLPATO, 2007).

Entretanto, o processo de RP evoluiu e com o avanço na qualidade dos produtos confeccionados, os usuários dessa tecnologia perceberam que esse termo já não descrevia de forma satisfatória as novas aplicações da prototipagem rápida que estava produzindo objetos mais próximos de produtos finais do que de simples protótipos, assim surgiram novos termos, entre eles a manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) (GIBSON, 2010).

A tecnologia vem crescendo continuamente após a expiração da patente de modelagem por fusão e deposição (*fused deposition modeling* – FDM) em 2005, pois a partir disso foi criado o projeto de prototipagem rápida replicável (*Replicating Rapid Prototyper* - RepRap) que basicamente consiste em imprimir as partes de uma impressora 3D a partir de outra, replicando-a, o que deu um novo impulso à manufatura aditiva (FORD, 2014).

Países como EUA, Alemanha, China e Singapura têm feito grandes investimentos na área, gerando ainda mais expansão da tecnologia, assim surgem novos nichos de aplicação para a AM, como o setor de fundição (FORD, 2014), objeto deste trabalho. Devido à sua versatilidade e relativa facilidade de operação a manufatura aditiva apresenta diversas vantagens em relação aos processos de manufatura convencionais (Torneamento, Fresamento, Estampagem, etc.) como: menor desperdício de material, componente fabricado em um único processo, maior velocidade no desenvolvimento de produtos e a possibilidade de confeccionar formas mais complexas (FORD, 2004; COTTELEER, 2014; VOLPATO, 2007).

A maior parte dos produtos fabricados por fundição são feitos pelo processo de fundição em areia, nesse tipo de processo são usados modelos para formar a cavidade onde será depositado o metal. Em grande parte das peças produzidas são necessários machos para formar cavidades, além disso são necessárias muitas horas de usinagem para fabricar um modelo de geometria complexa, processo que torna-se inviável quando se trata de peças únicas ou até mesmo de pequenos lotes. Nesses casos a manufatura aditiva pode tornar-se interessante para a fundição pois não há ganho significativo de custo conforme a complexidade do modelo, além de ser um processo mais rápido e limpo (WETZEL, 2017; SOARES 2000; SWIFT, 2014).

A justificativa para este estudo está na possibilidade de adoção da Manufatura Aditiva no setor de fundição, promovendo uma fabricação mais limpa, reduzindo o desperdício de material e o tempo gasto na confecção de modelos além de permitir o desenvolvimento de geometrias mais complexas sem grandes alterações no custo de produção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho em relação a custo e vida útil de modelos confeccionados por Manufatura Aditiva para o processo de fundição em areia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- (i) Definir os parâmetros relevantes na escolha do equipamento de Manufatura Aditiva para confecção de modelos de fundição em areia verde;
- (ii) Determinar as adaptações necessárias no projeto de modelos e caixas de macho para Manufatura Aditiva;
- (iii) Confeccionar modelos em Poli Ácido Lático (*Poly Lactic Acid* – PLA) e – Acrilonitrila Butadieno Estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* - ABS);
- (iv) Comprovar a funcionalidade de modelos feitos por manufatura aditiva por meio de testes de campo;
- (v) Fazer uma comparação de custos de fabricação entre manufatura aditiva e os métodos convencionais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Decidiu-se dividir este trabalho da seguinte forma: No capítulo 1 é contextualizado o assunto, ressaltada a sua relevância além de serem apresentados os objetivos da pesquisa, no capítulo 2 apresenta-se uma revisão teórica dos assuntos envolvidos neste estudo, em seguida, no capítulo 3 são definidos parâmetros para estudo e é estabelecida uma metodologia, no capítulo 4 são descritos os testes feitos nos modelos além de serem apresentados e avaliados os dados coletados, e por fim as conclusões e sugestões para estudos futuros são apresentados no capítulo 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MANUFATURA ADITIVA

2.1.1 Definição

Gibson *et. al.* (2010) afirma que o termo “manufatura aditiva” surgiu a fim de se adequar às novas aplicações da impressão 3D, quando deixou-se de usar esses equipamentos apenas para a produção de protótipos e passou-se a produzir peças finais. Usdoe (2012) define manufatura aditiva como um conjunto de tecnologias que criam formas físicas 3D a partir de dados digitais, adicionando material em camadas. Ao contrário dos processos de manufatura tradicionais que envolvem a subtração de material, a manufatura aditiva une os materiais para criar produtos (COTTELEER, 2014).

2.1.2 O Processo De Manufatura Aditiva

A construção de partes por manufatura aditiva segue uma sequência que Gibson (2010) divide em oito etapas básicas, as quais são descritas a seguir:

(i) Modelagem em *software*;

A primeira etapa no desenvolvimento de qualquer produto é o surgimento da ideia da função que o produto deve exercer e como ele deve se parecer, entre as possibilidades existentes o desenho em CAD é o que mais se adequa à manufatura aditiva, pois somente após sermos capazes de representar objetos virtualmente em três dimensões é que surgiram as possibilidades de reproduzir fisicamente esses objetos.

(ii) Conversão em arquivo STL;

Quase toda tecnologia de manufatura aditiva usa o formato .STL, o termo deriva da palavra *Stereolithography* que foi a primeira tecnologia de impressão 3D comercial. O formato STL é uma boa forma de representar a peça apenas com informação de geometria, as faces do modelo são aproximadas por uma série de faces triangulares. Podem ocorrer alguns erros nessa conversão, por isso existem alguns *softwares* de reparação

para arquivos STL que são usados como complemento. Uma vez que o arquivo STL é essencialmente uma descrição da geometria, o mesmo pode ser transferido para o equipamento.

(iii) Transferência para a máquina;

O processo de transferência não é tão simples como aparenta ser, há algumas ações necessárias antes de se construir a peça. Primeiro deve-se verificar se o formato e a escala da peça estão corretos, também é necessário verificar o local onde a peça será construída dentro da máquina, principalmente se o usuário desejar fazer mais de uma peça por vez, por último, deve ser feita a segmentação da peça caso a mesma seja grande e seja necessário imprimir partes separadas. Há vários *softwares* para manipulação de arquivos STL disponíveis na internet.

(iv) Preparação do equipamento;

Todos os tipos de máquinas de AM terão alguns parâmetros que poderão ser alterados conforme a necessidade, além disso, tipos diferentes de materiais exigirão parâmetros diferentes para que se tenha um produto de boa qualidade.

(v) Construção;

Algumas máquinas possuem processos semi automatizado que exigem algumas tomadas de decisão e controles manuais nos primeiros momentos da impressão, após essa etapa inicial o equipamento começa a depositar as camadas de material como descrito anteriormente, sem necessidade de intervenção manual.

(vi) Remoção e limpeza;

Neste estágio a parte deveria estar pronta para uso mas nem sempre acontece, muitas vezes para as aplicações às quais serão sujeitas as partes exigem uma superfície mais limpa (sem excessos de material). Também pode ser necessária a remoção do material de suporte (material que é impresso junto com a peça, servindo como apoio para o material principal), caso tenha sido usado.

(vii) Pós processamento;

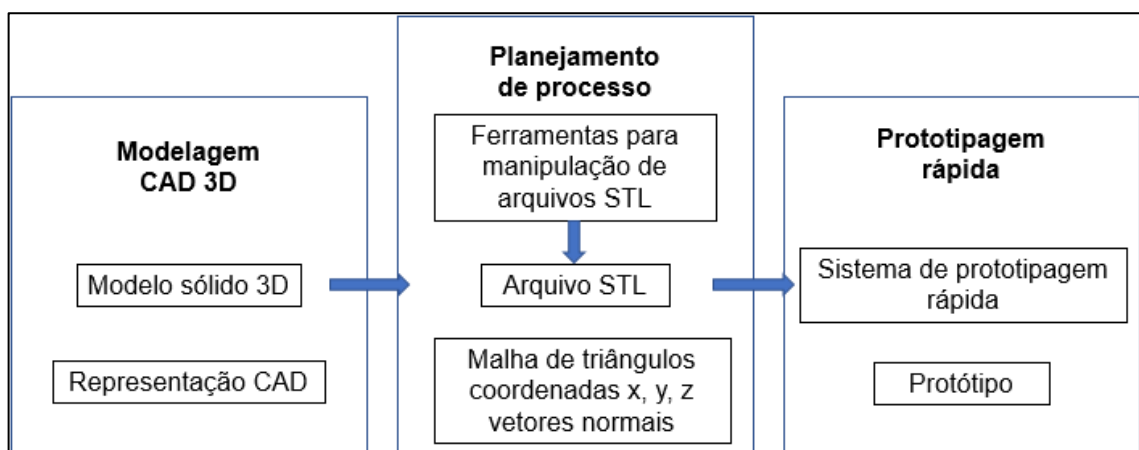
Neste estágio estão inclusas as ações manuais de finalização necessárias para a aplicação da parte. Exemplos de pós processamento são: Polimento e revestimento. Processos diferentes de AM implicarão em diferentes propriedades dos materiais e precisão das partes impressas.

(viii) Aplicação

Após o pós processamento as partes impressas estão prontas para uso. É importante ressaltar que embora as partes sejam semelhantes aquelas feitas pelos processos convencionais de manufatura, elas não se comportarão da mesma forma durante a aplicação pois durante a impressão podem se formar pequenas bolhas e vazios no interior do material gerando anisotropia nas propriedades mecânicas do componente. Porém em casos onde não é necessário alto desempenho a AM pode ser uma boa alternativa aos processos convencionais.

Volpato (2007) faz uma classificação um pouco mais enxuta desse processo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Etapas do processo de manufatura aditiva.



Fonte: VOLPATO *et al.* (2007).

2.1.3 Comparação Da AM Com Os Métodos Tradicionais

O Quadro 1 apresenta as vantagens de cada método, citadas por Cotteleer (2014).

Quadro 1 - Comparação entre AM e métodos tradicionais de manufatura.

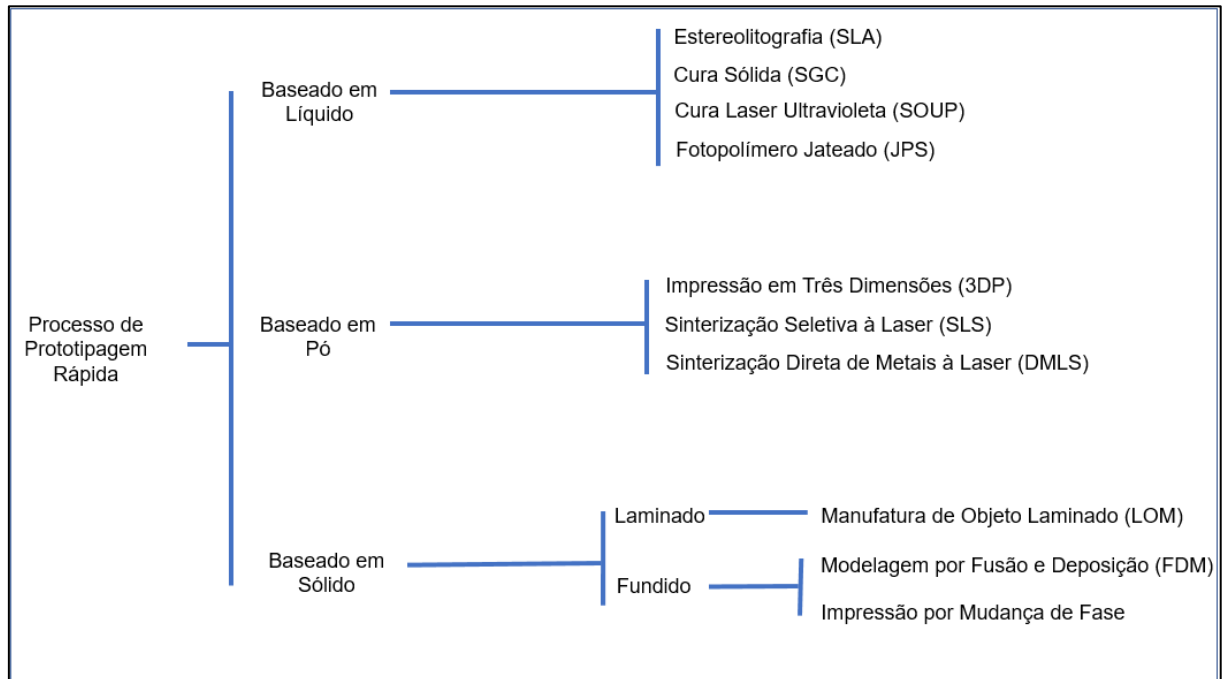
Método	Vantagens
Manufatura Aditiva	Possibilidade de fazer formas complexas
	Maior velocidade no desenvolvimento de produtos
	Menor desperdício de material
	Fluxo de trabalho mais ágil
	Permite a customização do produto e flexibilidade no design
Métodos Tradicionais	Bom desempenho na produção em massa
	Grande variedade de materiais disponíveis
	Possibilidade de manufaturar peças maiores

Fonte: Adaptado de COTTELEER (2014).

2.1.4 Tecnologias De Manufatura Aditiva

Swift (2013) classifica as tecnologias de manufatura aditiva em três grandes grupos de acordo com a forma original da matéria prima utilizada, como é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Classificação geral dos processos de prototipagem rápida.



Fonte: Adaptado de SWIFT (2013).

Esses processos são descritos em detalhes por Gibson *et al.* (2010), Volpato (2007) e Swift (2013), neste trabalho será dado enfoque na tecnologia de modelagem por fusão e deposição.

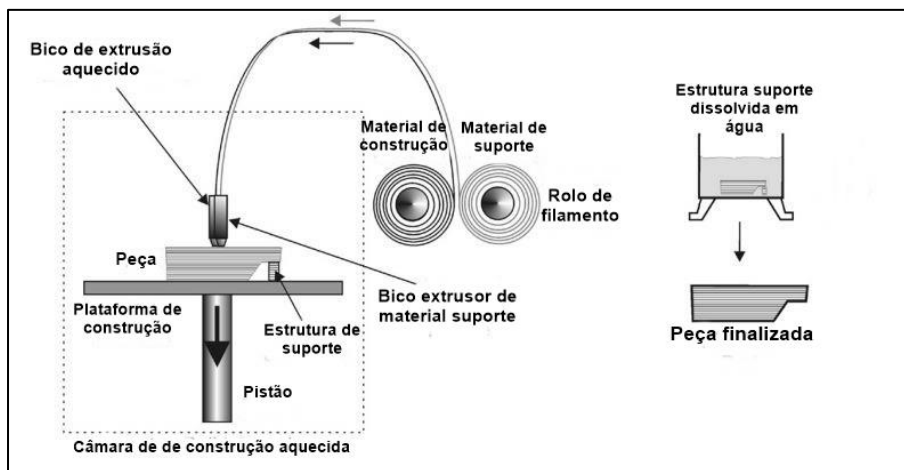
2.1.5 Modelagem Por Fusão e Deposição

A tecnologia FDM, exemplificada na Figura 3, usa geralmente filamentos plásticos que são depositados em camadas através de um bico aquecido que derrete o filamento, o bico se movimenta em dois eixos (X e Y) no plano e quando a primeira camada de material é depositada, a mesa se move no terceiro eixo (Z), com uma variação de altura equivalente a espessura da camada depositada, para a formação das próximas camadas. Alguns equipamentos precisam de câmaras aquecidas para

evitar o resfriamento rápido da peça, o qual pode causar distorções (VOLPATO, 2007; SWIFT, 2013).

Além disso há um segundo bico, que deposita material de suporte simultaneamente ao primeiro, isso é necessário para a construção de saliências, beiradas e regiões que não estejam conectadas ao corpo da peça pois as mesmas ficariam suspensas no espaço caso não houvesse uma estrutura para suporta-las. Esse material de suporte é mais frágil que o material da peça, podendo ser removido manualmente ou solubilizado em solução líquida aquecida. (VOLPATO, 2007; SWIFT, 2013).

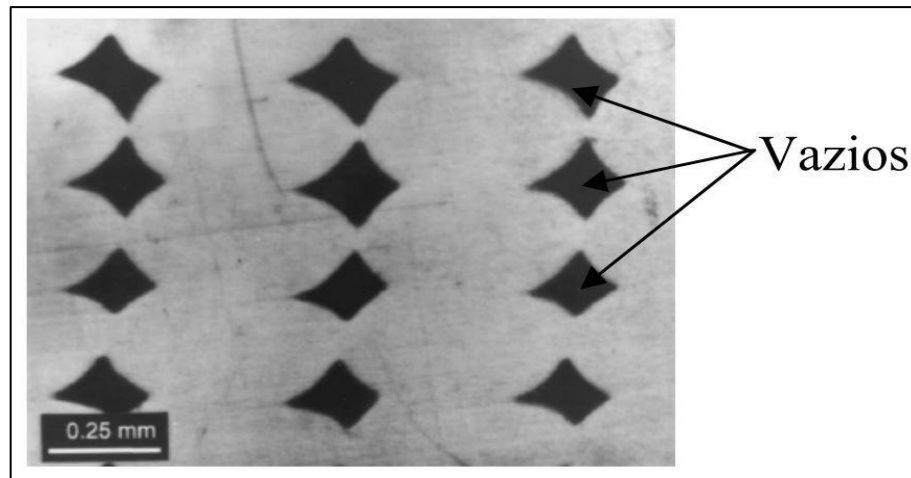
Figura 3 - Representação da tecnologia FDM.



Fonte: Adaptado de SWIFT (2013).

Assim como ocorre em outras tecnologias, o FDM sofre grande influência dos parâmetros de impressão usados, especialmente em relação às propriedades mecânicas e acabamento das partes impressas (HOSSAIN, 2013). Para Volpato (2007) os principais parâmetros possíveis de serem controlados no processo são: a espessura de camada, a espessura do filamento e os vazios entre filamentos (*gap*), os quais são inerentes ao processo de deposição em camadas. Um corte transversal de uma peça confeccionada por A.M. é mostrada na Figura 4, onde podem ser vistos os vazios deixados pela deposição. Gibson *et. al.* (2010) afirma que quanto mais fina a camada, melhor o acabamento superficial da peça produzida.

Figura 4 - Seção transversal de peça produzida por FDM.



Fonte: KRETSCHEK (2009).

Essa tecnologia vem sendo empregada na fabricação de moldes, mas também pode ser usada para fabricar ferramental para fundição como mostrou Lencina *et al.* (2003).

A tecnologia FDM geralmente utiliza termoplásticos como material de extrusão, que apesar de confeccionarem peças relativamente fortes, com geometrias complexas, apresentam um acabamento superficial pior e processo mais lento quando comparado à sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sinterising* - SLA) (COTTELEER, 2014). Algumas considerações de Swift (2013) sobre a tecnologia FDM são:

- A matéria prima é constituída de cera, elastômeros e materiais termoplásticos;
- O processo econômico para pequenos lotes com peças pequenas;
- O equipamento é relativamente barato;
- Os custos de finalização são baixos.

As limitações da modelagem por deposição fundida são principalmente a velocidade de impressão, precisão do equipamento e a densidade do material (GIBSON, 2010).

2.2 MATÉRIA PRIMA DE MANUFATURA ADITIVA

“A tecnologia FDM monta peças com os mesmos plásticos resistentes e estáveis usados nos processos de moldagem por injeção, CNC e outros processos tradicionais de manufatura” (STRATASYS, 2017).

Poli ácido láctico (*Polylactic Acid* – PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* – ABS) são os materiais mais comumente usados na tecnologia FDM. Ambos são termoplásticos, o que significa que entram em um estado maleável quando aquecidos e voltam a ser sólidos quando resfriados (3D HUBS, 2017). O Quadro 2 mostra um comparativo entre os dois materiais com ensaios feitos em corpos de prova impressos.

Tabela 1 - Comparativo entre ABS e PLA.

Propriedades	ABS	PLA
Resistência à Tração	14,7 [MPa]	24,8 [MPa]
Módulo de Elasticidade	1335,9 [MPa]	1896,0 [MPa]
Alongamento	7,08%	3,69%
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 3D LAB (2017).

2.3 SETOR DE FUNDIÇÃO E PROJETO DE MODELOS

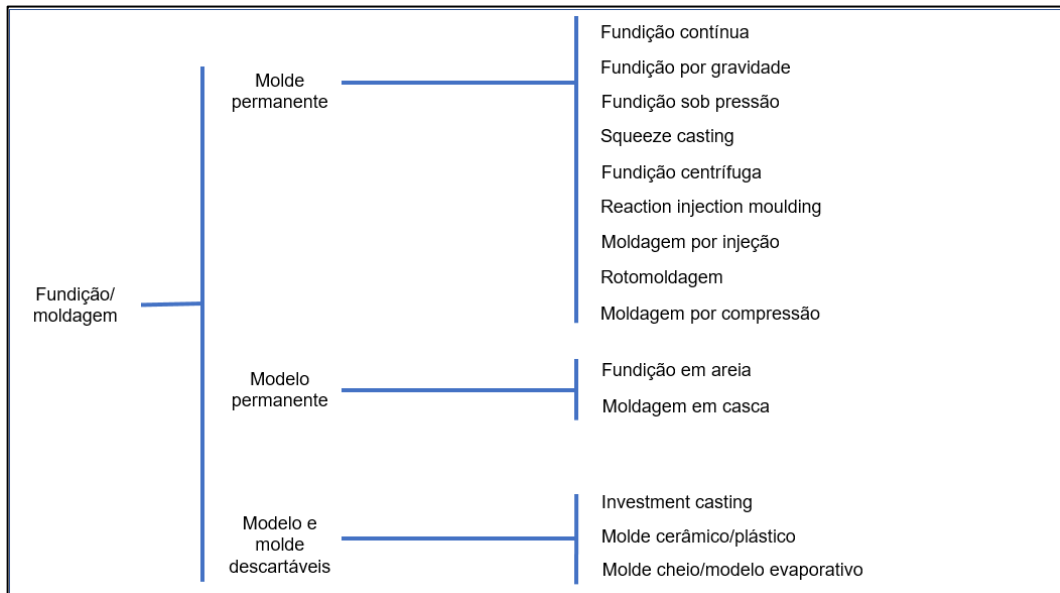
2.3.1 Fundição

Para Soares (2000), dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por ser um processo relativamente simples que permite construir peças de responsabilidade, com os mais variados formatos e tamanhos, além de permitir tanto a produção unitária como a seriada. Segundo Soares (2000), o processo baseia-se em vaziar metal líquido numa cavidade que consiste no negativo da peça a ser construída, o molde.

Ravi (2004) afirma que há um número muito grande de processos industriais de fundição, os quais podem ser classificados de acordo com o material do

molde, método de produção do molde ou pressão de moldagem. A Figura 5 mostra uma classificação geral para os processos de fundição.

Figura 5 - Classificação geral dos processos de fundição.



Fonte: Adaptado de SWIFT, (2013).

Dentre os processos mostrados na Figura 5 o mais barato e usual é o de fundição em areia, que será objeto de estudo desta monografia.

2.3.2 Fundição Em Areia

Na fundição em areia a cavidade do molde é formada por um modelo da peça a ser construída, o qual geralmente é feito em madeira, metal ou plástico. O modelo deve ser um pouco maior que a peça devido a contração de volume na solidificação do metal. As cavidades internas da peça como canais e furos, são formadas por meio de machos (geralmente feitos de areia) que são colocados na cavidade do molde, impedindo que o metal preencha determinada área (PIPLEYA, 2010).

“A qualidade da peça fundida depende, antes de mais nada da qualidade e precisão com que o modelo é fabricado” (SOARES, 2000, p. 07).

Os moldes de areia verde possuem esse nome devido a areia permanecer com sua umidade natural, esses são os mais baratos, com menor distorção (não há aquecimento), possuem boa estabilidade dimensional e menor incidência de trincas à

quente além da areia ser facilmente reciclada. Porém perde-se em alguns aspectos como maior erosão e pior acabamento superficial em peças maiores. Esse tipo de molde apresenta características importantes como: Permeabilidade, inércia química, estabilidade, difusividade térmica, refratariedade e desmoldabilidade (ETEC, 2000).

2.3.3 Projeto De Modelos Por Manufatura Aditiva

O desenho para manufatura convencional difere do desenho para manufatura aditiva principalmente pela liberdade de desenho que a manufatura aditiva oferece, tendo como únicos limitantes a própria capacidade do equipamento (GIBSON, 2010). Gibson (2010) diz que os *softwares* que fazem uso de desenhos de sólidos em desenho auxiliado por computador (*Computer aided Desing - CAD*), tipicamente usados no desenvolvimento de partes mecânicas são limitantes das possibilidades geométricas que se pode atingir com a AM, pois não são capazes de representar dezenas ou centenas de características, superfícies e partes, outro problema é a escala de desenho limitada. Porém para este estudo, onde o objeto final é um componente mecânico esses *softwares* têm desempenho satisfatório, por isso para o desenho e visualização das partes será usado o SolidWorks™.

Para Swift (2013) o desenho de peças por manufatura aditiva deve:

- Possuir estruturas de suporte que devem ser projetadas para entalhes e partes sobressalentes;
- Ter a peça orientada na câmara de construção a fim de reduzir o uso de material de suporte;
- Possuir estruturas internas caso se deseje melhorar a relação peso x volume.

Além disso Swift (2013) também cita algumas limitações de projeto para AM, como:

- Dificuldade de construir paredes finas, ângulos agudos e cantos vivos no plano vertical devido a pressão de contato nos filamentos saindo do bico o que pode causar deformação;
- Anisotropia, que existe devido ao processo de deposição em camadas (há pouca resistência no sentido vertical);
- Resistência à tração típica de aproximadamente dois terços da resistência do mesmo termoplástico que foi moldado por injeção.

Devem ser considerados os seguintes elementos para adaptação de um componente de fundição: ângulo de saída, contração de metal, espessura mínima de parede, sobremetal de usinagem, linha de partição, concentração de massa, solidificação direcional, concentração de tensão e macharia (RAVI, 2004).

Para Ravi (2004) a linha de partição é necessária para criar a cavidade do molde. Ela afeta e é afetada pela orientação da peça, pelo desenho do modelo e dos machos, pelo número de cavidades, localização dos canais de vazamento, localização dos massalotes, resfriamento e permeabilidade do molde.

Para qualquer geometria da peça existem muitas formas de se posicionar a linha de partição, isso depende dos requerimentos do cliente, especificações de qualidade, facilidades de manufatura e considerações econômicas (RAVI, 2004).

O primeiro passo para o desenho da linha de partição é selecionar uma direção de partição apropriada de forma a minimizar o uso de machos para formar cavidades de reentrâncias, minimizar a distância de extração, além do *draft allowance*. A utilização de machos principalmente, acarreta custos em termos de materiais, necessidade de mais ferramentaria e menor produtividade, por isso seu uso deve ser minimizado pela seleção da melhor direção de partição (RAVI, 2004).

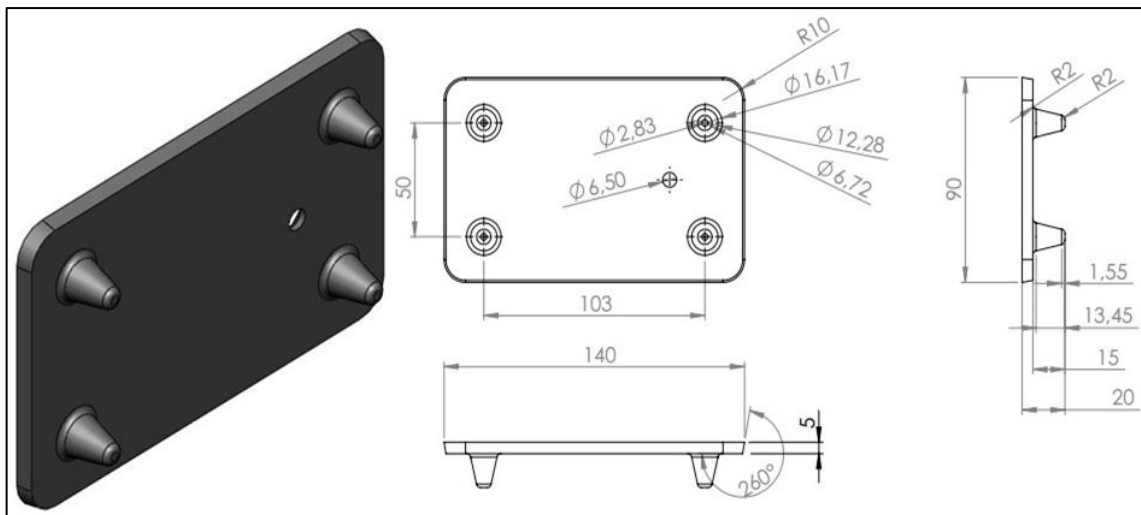
3 METODOLOGIA

3.1 CONFECÇÃO DE MODELOS POR AM

Com base no conhecimento adquirido na revisão teórica sobre o assunto, pode-se dizer que os parâmetros mais importantes de um equipamento de manufatura aditiva para a fabricação de modelos de fundição são: taxa de deposição, área útil de impressão e principalmente precisão dimensional pois, caso os modelos impressos tenham rugosidade superficial muito alta, será difícil a retirada dos moldes de areia.

O equipamento utilizado nessa monografia será a impressora Core A1™, da fabricante GTMax®, com dimensões de impressão de 300mm de largura por 200mm de profundidade e 250mm de altura. A mesma é propriedade de uma empresa prestadora de serviços de manufatura aditiva localizada em Joinville – SC. A peça que foi avaliada nesse estudo está representada em 3D e também por vistas na Figura 6, compreende de um suporte que é parafusado à porta de fogões à lenha de 65,8cm³. A mesma foi obtida junto a uma empresa de fundição situada em Pato Branco – PR.

Figura 6 - Representação da peça em estudo.



Fonte: Autor (2017).

A peça foi escolhida por ser simples e plana, o que facilita o processo de medição, além do tempo de impressão ser relativamente baixo, outro fator de influência foi a responsabilidade da peça que, caso falhe, não implicaria risco aos usuários e nem grandes custos à empresa de fundição. Porém, as características

avaliadas nesse trabalho se aplicam à grande maioria de produtos que possam ser fabricados por manufatura aditiva e posteriormente fundidos.

A manufatura aditiva é vantajosa em relação aos métodos tradicionais quando se deseja produzir peças pequenas, com geometria complexa em pequenos lotes, assim, o foco deste trabalho consiste em tentar comprovar a funcionalidade do ferramental produzido por AM e medir seu desgaste em testes de campo, além de mensurar a viabilidade econômico-financeira do uso dessa tecnologia no setor de fundição de metais.

3.2 TESTES DE CAMPO

Após a confecção das peças pelo equipamento de manufatura aditiva, os modelos foram submetidos a testes de campo na empresa de fundição. Dentre as opções para realização dos testes foi escolhido o equipamento soprador de machos e moldes de areia (Figura 7) que faz a injeção, compactação e secagem da areia verde na caixa de machos por meio de ar comprimido, a fim de se avaliar o desgaste dos modelos mais rapidamente devido à maior severidade do processo. Para isso, os modelos (um de PLA e um de ABS) foram fixados a uma caixa de madeira. O equipamento foi programado com uma pressão de 7bar o operado em modo automático.

Figura 7 - Sopradora de machos e moldes de areia.



Fonte: Autor (2017).

O equipamento foi programado pelo operador com uma pressão de sopro adequada às dimensões da caixa de machos. Os modelos foram submetidos a 100 ciclos de operação, em seguida foram medidos e por conseguinte, mais 100 ciclos, totalizando 200 ciclos antes da última medição.

Para que se possa avaliar as medidas dos modelos e das peças finais (de metal) foram usados os equipamentos descritos na Tabela 1:

Tabela 2 - Equipamentos de medição.

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	RESOLUÇÃO
PAQUÍMETRO	STARRETT	125	0,02mm
TRAÇADOR DE ALTURA	MITUTOYO	514-107	0,02mm
RUGOSÍMETRO	TIME	TR-220	0,01µm
BALANÇA ANALÍTICA	SHIIMADZU	AY220	0,001g
BALANÇA	KN WAAGEN	KNCD 30/05	0,5g

Fonte: Autor (2017).

Além disso, foi feito o *set-up* do rugosímetro com *cut-off* automático e *Range* de 0,8µm. As peças plásticas foram colocadas sobre uma bancada e foi feita uma medição em cada um dos 5 pontos distintos das peças (4 bordas e centro).

Foi comparada a vida útil dos modelos feitos em manufatura aditiva com os modelos convencionais da empresa, por fim uma comparação de custos de fabricação foi feita para avaliar a viabilidade de implementação da manufatura aditiva no setor de fundição.

3.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE FABRICAÇÃO

Atualmente para a peça em estudo, a empresa de fundição usa um modelo com 6 cavidades em uma sopradora de machos maior, esse modelo é feito em resina epóxi Araldite®. Segundo Soares (2000) o tempo de vida dos mesmos depende da complexidade e do cuidado no armazenamento e manuseio. Para o caso de modelos confeccionados em resina epóxi, estima-se uma vida de até 6000 moldes (METALS HANDBOOK, 1988). Para a estimativa dos custos de produção de modelos e moldes foi feita uma entrevista com o modelador da empresa de fundição, que contou com sua experiência e dados da empresa para estimar os valores.

Após a estimativa de todos os custos e frequência de reparos, foram comparados os custos para se produzir um mesmo molde pelos métodos convencionais e com o auxílio da manufatura aditiva.

4 RESULTADOS

4.1 MODELOS MANUFATURADOS

Os modelos confeccionados por manufatura aditiva são mostrados na Figura 8, com PLA em branco e ABS em preto. Os 4 modelos foram impressos por meio de um bico extrusor de 0,1mm com 20% de preenchimento para todas as peças, as quais precisaram de aproximadamente 4 horas cada para serem confeccionadas.

Figura 8 - Modelos confeccionados por manufatura aditiva.



Fonte: Autor (2017).

Após a impressão, os modelos foram medidos, os dados obtidos são mostrados na Tabela 2.

As medidas de rugosidade superficial mostraram-se visivelmente ruins em ambos os materiais, além de apresentarem um desvio padrão relativamente alto, sendo necessário um tratamento posterior de lixamento para que seja facilitado o desprendimento da areia após o sopro e garantida a qualidade das peças finais.

Tabela 3 – Dados iniciais dos modelos.

	PLA I					MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5		
COMPRIMENTO (mm)	140,50	140,00	140,20	140,48	140,00	140,24	0,2459
LARGURA (mm)	90,30	90,14	90,50	90,50	90,50	90,39	0,1634
ESPESSURA (mm)	5,40	4,96	5,00	4,96	5,08	5,08	0,1854
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	11,19	11,87	12,03	10,98	11,54	11,52	0,4401
MASSA (g)	52,42						
				PLA II			
COMPRIMENTO (mm)	140,04	140,06	140,1	140,00	140,10	140,06	0,0424
LARGURA (mm)	90,06	90,00	90,00	90,04	90,00	90,02	0,0282
ESPESSURA (mm)	5,14	4,92	5,04	5,10	5,04	5,05	0,0831
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	8,58	10,6	13,81	8,72	12,48	10,84	2,2988
MASSA (g)	52,42						
				ABS I			
COMPRIMENTO (mm)	140,10	140,08	139,94	139,94	140,00	140,01	0,07563
LARGURA (mm)	89,70	89,68	89,70	89,62	89,64	89,67	0,03633
ESPESSURA (mm)	5,42	5,26	5,42	5,70	5,70	5,50	0,1939
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	6,68	7,94	10,53	12,94	8,07	9,23	2,4959
MASSA (g)	30,47						
				ABS II			
COMPRIMENTO (mm)	140,08	139,92	139,86	139,74	139,96	139,91	0,1253
LARGURA (mm)	89,82	89,70	89,62	89,82	89,56	89,70	0,1169
ESPESSURA (mm)	5,46	5,30	5,46	5,48	5,44	5,43	0,0729
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	10,95	10,57	11,27	8,11	7,66	9,71	1,6940
MASSA (g)	32,16						

Fonte: Autor (2017).

Como só haveria espaço para duas figuras no equipamento de sopro menor (Pois o equipamento com capacidade para 6 não estava disponível), somente os modelos PLA I e ABS I foram lixados com uma lixa 60, medidos e testados. Os dados após o tratamento superficial das peças são mostrados na Tabela 3.

Tabela 4 - Dados dos modelos após lixamento.

	PLA I					MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5		
ESPESSURA (mm)	5,00	4,98	5,10	5,06	5,08	5,04	0,022
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μ m)	9,25	8,95	9,46	4,29	3,44	7,09	2,9539
MASSA (g)	52,31						
	ABS I						
ESPESSURA (mm)	5,36	5,34	5,44	5,40	5,46	5,40	0,0509
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μ m)	9,70	8,77	6,22	4,25	5,24	6,83	2,3214
MASSA (g)	30,35						

Fonte: Autor (2017).

4.2 CONFECÇÃO DE MOLDES DE AREIA

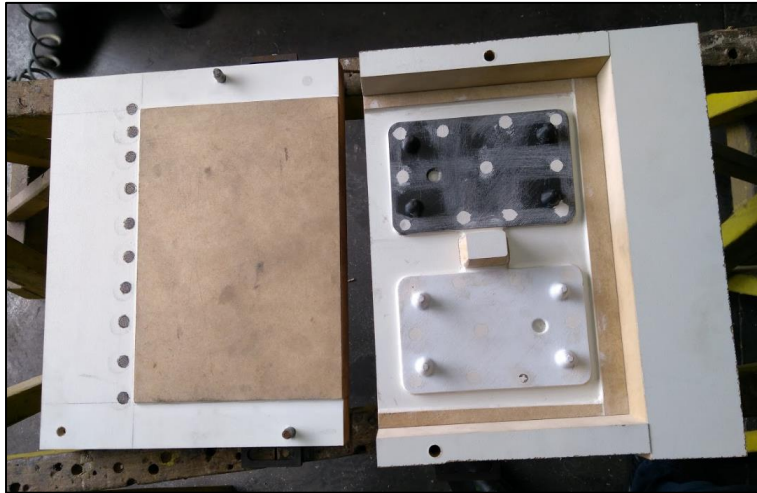
Os modelos foram fixados a uma caixa como mostrado na Figura 9, devido ao tamanho do equipamento de sopro só foi possível operar com a caixa para 2 modelos e devido ao tempo de equipamento disponibilizado pela empresa, não foi possível testar os outros 2.

As peças foram confeccionadas com 20% de preenchimento, o seja seu interior não é totalmente preenchido, estruturas internas no sentido diagonal das peças foram feitas para suportar as camadas adjacentes superiores, sobrando vãos entre essas estruturas onde não foi depositado material.

Segundo o operador, as partes ocas das peças plásticas seriam um problema no processo e devido a pontos de entrada de ar, as mesmas não resistiriam à pressão de sopro, o ideal então, seria usar um preenchimento de 100% ou próximo disso na confecção por manufatura aditiva.

Logo, foi necessária uma adaptação nos modelos, que foram preenchidos com massa plástica, o que não afeta o estudo pois está sendo avaliado apenas o desgaste superficial dos mesmos.

Figura 9 -Caixa de machos.



Fonte: Autor (2017).

Um dos moldes de areia confeccionados no equipamento de sopro pode ser visto na Figura 10, após 100 ciclos os modelos impressos foram medidos novamente e em seguida passaram por mais 100 ciclos antes da última medição. A massa média de areia em cada molde foi de 1581,5 gramas e a produtividade foi de pouco mais de 1,5 minuto por ciclo, relativamente baixo, o que foi acentuado devido ao equipamento de sopro possuir um volume útil pequeno (apenas duas figuras por ciclo nesse caso).

Figura 10 - Molde de areia.



Fonte: Autor (2017).

Segundo o modelador da empresa de fundição, após inspeção visual, os moldes ficaram tão bons quanto os que são feitos por meio dos modelos de resina epóxi. Os resultados de desgaste nas peças plásticas devido aos primeiros 100 ciclos de operação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 5 – Medidas após 100 ciclos.

	PLA I					MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5		
ESPESSURA (mm)	5,04	5,02	5,00	5,08	5,00	5,03	0,0335
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	12,06	10,41	12,67	12,52	12,12	11,95	0,9021
	ABS I						
ESPESSURA (mm)	5,26	5,14	5,20	5,18	5,28	5,21	0,0576
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	9,85	11,00	12,31	11,54	12,65	11,47	1,1122

Fonte: Autor (2017).

Considerando as medidas médias, a espessura diminuiu 0,01mm no PLA e 0,19mm no ABS, porém os valores de rugosidade superficial mostraram-se maiores com um desvio padrão menor em relação aos dados da Tabela 3. Por conseguinte, os modelos foram submetidos a mais 100 ciclos que resultaram nas medidas mostradas na Tabela 5.

Tabela 6 - Medidas após 200 ciclos.

	PLA I					MÉDIA	DESVIO PADRÃO
	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5		
ESPESSURA (mm)	5,18	5,14	5,16	4,68	4,76	4,98	0,2430
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	11,41	10,52	8,76	10,92	11,20	10,56	1,0610
	ABS I						
ESPESSURA (mm)	4,96	5,30	5,12	4,90	5,12	5,08	0,1568
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra(μm)	11,53	9,43	10,04	10,14	9,25	10,08	0,8970

Fonte: Autor (2017).

Pode-se notar pelas medidas médias que, em relação aos primeiros 100 ciclos a espessura diminuiu 0,05mm no PLA e 0,13mm no ABS, porém os valores de rugosidade superficial mostraram-se menores em relação aos dados da Tabela 3. A média de rugosidade superficial diminuiu em ambas as peças, porém os desvios padrão aumentou no caso do PLA. Com apenas dois pontos não é possível afirmar se o desgaste superficial segue de forma linear ou não mas é possível afirmar que o PLA teve menos desgaste nos testes de campo.

Tabela 7 - Medidas das peças finais nos primeiros ciclos.

	PLA I					MÉDIA TOTAL	DESVIO PADRÃO
	MÉDIA 1	MÉDIA 2	MÉDIA 3	MÉDIA 4	MÉDIA 5		
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 I						
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: Autor (2017).

A fim de testar a eficácia dos moldes de areia (verificar se poderia ser verificado algum tipo de desgaste dos modelos por meio das peças finais de metal), foram amostrados 4 moldes como o da figura 10, 2 deles feitos nos primeiros ciclos de sopro e 2 deles feitos nos últimos ciclos de sopro, os mesmos foram preenchidos com ferro fundido, as 8 peças finais solidificadas foram medidas e apresentaram as características mostradas nas Tabelas 6 e 7 nas quais os valores de “Média 1” a “Média 5” são médias dos valores de duas peças.

Tabela 8 – Medidas das peças finais nos últimos ciclos.

	PLA I					MÉDIA TOTAL	DESVIO PADRÃO
	MÉDIA 1	MÉDIA 2	MÉDIA 3	MÉDIA 4	MÉDIA 5		
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 I						
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: Autor (2017).

Houve alguns defeitos nas peças finais, causados principalmente pelo método de vazamento de metal líquido nos moldes, trata-se de um volume de metal muito pequeno para os padrões da empresa, assim houve dificuldade de se colocar a

quantidade correta de metal e principalmente de adaptar um reservatório menor para que fosse possível o vazamento no pequeno canal dos moldes.

Mesmo com algumas das peças apresentando defeitos (falta de material principalmente) foi possível comprovar a eficácia dos moldes que, segundo os funcionários da fundição não apresentou diferenças significativas dos moldes convencionais.

Analisando os dados das tabelas 6 e 7, podemos ver que nos últimos ciclos, houve um aumento de massa nas peças feitas a partir do modelo de ABS e redução nos modelos de PLA provavelmente devido aos defeitos já citados. Todavia, as medidas mostraram-se satisfatórias e estão bem próximas das medidas mostradas na Figura 6, dentro do esperado considerando-se a contração de solidificação de aproximadamente 1% para ferro fundido, o que não foi considerado na impressão das peças em plástico devido a um erro de comunicação com a empresa de manufatura aditiva.

4.3 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO

O custo para se produzir uma caixa de machos com 6 modelos como os da Figura 9, mas em resina epóxi, usada atualmente pela empresa gira em torno de R\$1200,00 contando material e processo de fabricação pelos métodos convencionais, essa caixa de machos apresenta uma frequência de defeitos baixa devido à simplicidade da peça e condições de operação podendo ter uma vida-útil para a produção de até 10000 moldes no processo por sopro de areia. (Fonte: Fersul Manuafurados de Ferro LTDA).

Quanto aos modelos feitos por manufatura aditiva com 100% de preenchimento, a estimativa de custo foi feita por meio de uma ferramenta *on-line*, de cálculo para manufatura aditiva chamada CAMMADA onde são fornecidos o volume de material, preço e custo do equipamento para cálculo do preço das peças, o cálculo foi feito para o PLA, que mostrou melhor desempenho nos testes de campo, a estimativa é que cada modelo custe cerca de R\$65,00, totalizando um custo de R\$390,00 para 6 deles, somado ao preço de cerca de R\$30,00 para a caixa de madeira tem-se um custo total de R\$420,00 para uma caixa de machos. Segundo a Fersul essa caixa de machos possui uma tolerância de ± 1 mm, assim, somando-se um

desgaste de 0,04mm a cada ciclo estima-se uma vida-útil de 2700 moldes para a caixa.

Sendo assim, pode-se chegar ao valor de unidade monetária por molde produzido com mão de obra não inclusa que é de R\$0,12 para o método convencional e de R\$0,15 por AM, este, um pouco mais caro devido principalmente à simplicidade da peça. Porém, conforme mostrou Dalozchio (2017) conforme a complexidade da peça aumenta a A.M. torna-se muito mais vantajosa.

5 CONCLUSÕES

A confecção de modelos por manufatura aditiva é um processo simples e prático, porém pode ser demorado, devido à necessidade de alta precisão dimensional no bico injetor do equipamento ($<0.1\text{mm}$) além da porcentagem de preenchimento de aproximadamente 100%, o que demanda maior tempo de impressão. Porém, como Dalzochio (2017) mostra, quanto mais complexa for a peça, mais rápido é o processo de confecção da mesma, o que reforça a afirmação de que quanto maior a complexidade da peça, mais indicada é a manufatura aditiva em relação aos métodos convencionais.

De modo geral os modelos confeccionados por AM satisfazem às necessidades da fundição, por meio deles foram feitos moldes e peças finais tão bons quanto os confeccionados pelos métodos convencionais, eles também mostraram boa resistência ao desgaste nos testes de campo na sopradora de machos, segundo os funcionários da empresa em outros processos menos agressivos a vida útil dos modelos plásticos seria ainda maior portanto, não há dúvidas quanto a aplicabilidade da manufatura aditiva no setor de fundição.

Ambos os modelos atenderam às expectativas, porém, os resultados mostraram que o PLA resistiu melhor à abrasão, desgastando-se menos e produzindo peças finais com maior qualidade.

Do ponto de vista prático a manufatura aditiva mostra-se superior aos métodos tradicionais de confecção de modelos para fundição por ser um processo muito simples, seguro, limpo e de fácil automação. Todavia, do ponto de vista econômico a viabilidade depende de outros fatores como o tamanho do lote, complexidade, tamanho e responsabilidade da peça.

Por fim, o objetivo geral de avaliar o desempenho em relação a custo e vida útil de modelos confeccionados por manufatura aditiva para o processo de fundição em areia foi atendido seguindo os objetivos específicos desse trabalho, algumas das dificuldades encontradas nesse período foram: Estimar custos atuais de modelos em uso na empresa, imprevistos com equipamentos de manufatura aditiva como erros de *software* e empenamento, além de imprevistos com prazos e variação da demanda da empresa de fundição. Algumas sugestões para estudos futuros são:

- Avaliar a viabilidade econômica da compra de um equipamento de AM pela empresa de fundição;

- Estudar o efeito de um revestimento metálico nas peças além de formas de fazê-lo (usando banhos de formaldeído ou hipofosfito de sódio);
- Usar outros processos de AM nos testes de campo, inclusive a impressão direta de metais.

REFERÊNCIAS

3D HUBS. **PLA vs. ABS: What's the difference?** . Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

3D LAB. **Propriedades Técnicas dos Materiais para Impressora 3D** . Disponível em: <<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

COTTELEER, Mark; HOLDOWSKY, Jonathan; MAHTO, Monika. An overview of additive manufacturing (3D printing). **The 3D Opportunity Primer: The basics of additive manufacturing**, Deloitte University Press, Westlake, Texas, EUA, mar. 2014.

DALZOCHIO, João E.. Critérios de complexidade de forma aplicados a manufatura aditiva. 2017. 46 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

ETEC, Escola Técnica Estadual Cel. Fernando Febeliano da Costa. **Apostila do 3º Ciclo de Técnico em Mecânica**. 65 f. Piracicaba - SP, 2000.

FORD, Sharon. “Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness.” **Journal of International Commerce and Economics**. Published electronically September 2014.

GIBSON, I.; ROSEN, D.W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**, 2010.

HOSSAIN, M. S., RAMOS, J., ESPALIN, D., PEREZ, M., WICKER, R. Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters. **International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference**. Austin, v. 2013, p. 380-392.

KRETSCHKEK, David. Desenvolvimento de um Cabeçote de Extrusão por Êmbolo para Polipropileno Granulado Visando a Manufatura Aditiva. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

KRETSCHKEK, David; FOGGIATTO, José A.; VOLPATO, Neri. “Infiltração De Peças Fabricadas Por Tecnologia FDM Com Resinas Poliméricas”. **CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS**, 10. Foz do Iguaçu, 2009.

KUREK, Ana Paula. Tratamento químico superficial e metalização de ABS, PVC e blendas de PVC/ABS. **Polímeros**, São Carlos, v. 25, n. 2, p. 212-218, abr. 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282015000200212&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 12 maio 2017.

LENCINA, Diovani; AHRENS, Carlos Henrique; GUESSER, Wilson Luiz. Avaliação De Uma Caixa De Machos, Produzida Por Estereolitografia, Para O Processo De

Caixa Fria Fenólítico-Uretano. Em: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 2. Uberlândia, 2003.

Metals Handbook Volume 15: Casting, Metals Park, Ohio, **ASM International**, 1988.

PIPLEYA, S.; JOSHI, D.: "Computer Aided Casting Simulation, Analysis and Pattern Cost Estimation". **International Journal of Simulation - Systems, Science & Techno**, 2010, Vol. 11 Issue 4, p51.

RAVI, B. **Metal Casting: Computer-Aided Design and Analysis**, PHI, New Delhi, ISBN 81 203 2726 8, 4th print, 2008

SOARES, G. A. **Fundição: Mercado Processos e Metalurgia**. 1 ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/SR-1,2000.

STRATASYS. **FDM and PolyJet 3D Printing**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/resources/white-papers/fdm-and-polyjet-3d-printing>

>. Acesso em: 02 nov. 2017.

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. **Manufacturing Process Selection Handbook**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. P. 61-91.

TEIXEIRA, Luiz Alberto Cesar; SANTINI, Marcela Costa. "Surface conditioning of ABS for metallization without the use of chromium baths". **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 170, Issues 1–2, 14 December 2005, Pages 37-41, ISSN 0924-0136.

U.S. Department of Energy. **Advanced Manufacturing Office**. "Additive Manufacturing: Pursuing the Promises," August 2012.

VOLPATO, N., *et al*, 2007, **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**. 1º ed. São Paulo, Edgard Blucher.

WETZEL, S. "Jump Starting 3-D Printing With FDM, FFF", **Modern Casting**, Abril 2017, pp. 22-43.