

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PEDRO HENRIQUE NIZER RAHMEIER**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA FABRICAÇÃO DE MODELOS APLICADOS NO  
PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE**

**Alegrete  
2022**

**PEDRO HENRIQUE NIZER RAHMEIER**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA FABRICAÇÃO DE MODELOS APLICADOS NO  
PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Aldoni Gabriel  
Widenhöft

**Alegrete  
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

R147p Rahmeier, Pedro Henrique Nizer  
PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA FABRICAÇÃO DE MODELOS APLICADOS  
NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE / Pedro Henrique Nizer  
Rahmeier.  
56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa,  
ENGENHARIA MECÂNICA, 2022.  
"Orientação: Aldoni Gabriel Widenhöft".

1. Fundição. 2. Impressão 3D. 3. Moldes. 4. Modelos. 5. Prototipagem Rápida. I.  
Título.

**PEDRO HENRIQUE NIZER RAHMEIER**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA FABRICAÇÃO DE MODELOS APLICADOS NO PROCESSO DE  
FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE**

Monografia apresentada ao curso de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Dissertação defendida e aprovada em: 11, Agosto de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Aldoni Gabriel Widenhöft

Orientador

Unipampa

---

Prof. Msc. Mauricio Paz França

Unipampa

---

Prof. Dr. Alexandre Urbano Hoffmann

Unipampa



Assinado eletronicamente por **MAURICIO PAZ FRANCA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/08/2022, às 14:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE URBANO HOFFMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/08/2022, às 14:27, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/08/2022, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0898202** e o código CRC **46FAAE75**.

Dedico este trabalho a minha mãe que sempre me incentivou a buscar conhecimento e sempre esteve ao meu lado dando apoio e incentivo.

“Gigantes são os mestres nos ombros dos  
quais eu me elevei”.

Isaac Newton

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhöft pela orientação, dedicação, incentivo e auxílio disponibilizado para elaboração do trabalho.

Ao Prof. Me. Alexandre Urbano Hoffman pelo apoio, incentivo, auxílio disponibilizado para a elaboração do trabalho.

A Universidade Federal do Pampa por todo auxílio prestado durante a formação acadêmica e para a elaboração do trabalho.

A todos os colegas de curso, amigos e professores que ao longo de toda a graduação me apoiaram em todas as situações, sendo de suma importância para a conclusão do curso, com ênfase nos alunos que puderam colaborar para a realização deste trabalho.

E principalmente, aos meus pais Nubia Cristina Nizer e Dalmir Rubens Rahmeier e ao meu irmão João Guilherme Nizer Rahmeier que sempre me incentivaram e não mediram esforços para mais esta conquista em minha vida.



## RESUMO

A fundição é um dos processos de fabricação que mais se beneficia de avanços tecnológicos dentro dos processos produtivos de uma organização. No Brasil, existem aproximadamente 1,2 milhões de empresas no setor de fundição, tornando-o o décimo maior produtor mundial de fundidos. De forma integrada, fundição e prototipagem rápida promovem uma vasta gama de benefícios desde a concepção até etapas finais do projeto, aliando protótipos, modelos e personalização no desenvolvimento e fabricação do produto. Este trabalho tem por objetivo compreender ganhos de produtividade no setor de fundição de metais, decorrentes do uso da tecnologia de prototipagem rápida. Precisamente, analisa-se a aplicação do processo de fabricação de modelos via prototipagem rápida por deposição de material aplicados na confecção de moldes no processo de fundição em areia verde, como forma de validação do trabalho será realizado um ensaio de fundição utilizando os modelos produzidos através da prototipagem rápida e comparado o custo de fabricação e tempo de confecção com o processo de usinagem.

**Palavras-Chave:** prototipagem rápida, personalização, fundição.

## **ABSTRACT**

Casting is one of the manufacturing processes that most benefits from technological advances within an organization's production processes. In Brazil, there are approximately 1.2 million companies in the foundry sector, making it the tenth largest producer of castings in the world. In an integrated way, casting and rapid prototyping promote a wide range of benefits from conception to final stages of the project, combining prototypes, models and customization in the development and manufacture of the product. This work aims to understand productivity gains in the metal smelting sector, resulting from the use of rapid prototyping technology. Precisely, the application of the process of manufacturing models via rapid prototyping by deposition of material, applied in the making of molds in the casting process in green sand, is analyzed. through rapid prototyping and comparing the manufacturing cost and manufacturing time with the machining process.

**Keywords:** rapid prototyping, customization, casting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Molde para o processo de fundição.....	21
Figura 2 – Fluxograma do processo de fundição por areia verde.....	22
Figura 3 – Partes constituintes de impressora FDM.....	27
Figura 4 – Princípio de funcionamento impressão FDM. ....	27
Figura 5 – Interface software CAD. ....	28
Figura 6 – Placa em processo de fabricação.....	31
Figura 7 – Cubo de roda. ....	32
Figura 8 – Acoplamento Flexível. ....	33
Figura 9 – Modelagem digital cubo de roda vista isométrica. ....	34
Figura 10 – Modelagem digital cubo de roda vista lateral. ....	34
Figura 11 – Modelagem digital acoplamento flexível vista isométrica. ....	34
Figura 12 – Modelagem digital acoplamento flexível vista lateral. ....	35
Figura 13 – Modelagem acoplamento do modelo bipartido para o molde.....	35
Figura 14 – Modelagem parte 1 inferior do modelo.....	36
Figura 15 – Modelagem parte 2 do modelo para o molde.....	36
Figura 16 – Modelagem parte 2 do modelo para o molde.....	37
Figura 17 – Componentes da placa modelados digitalmente. ....	37
Figura 18 – Cubo após o fatiamento.....	38
Figura 19 – Acoplamento após fatiamento.....	39
Figura 20 – Cubo após a impressão.....	40
Figura 21 – Acoplamento após a impressão.....	40
Figura 22 – Impressão parte 1 do modelo inferior com parte dos canais.....	41
Figura 23 – Impressão parte 2 do modelo inferior com parte dos canais.....	41
Figura 24 – Modelos fixados no lado inferior da placa. ....	42
Figura 25 – Modelos fixados no lado superior da placa.....	43
Figura 26 – Placa com a areia já compactada.....	44
Figura 27 – Parte inferior do molde.....	44
Figura 28 – Parte superior do molde. ....	45
Figura 29 – Vazamento do metal no molde.....	46
Figura 30 – Temperatura do metal em estado líquido. ....	46
Figura 31 – Conjunto fundido. ....	47
Figura 32 – Cubo de rodas após limpeza e rebarbação. ....	47
Figura 33 – Acoplamento após limpeza e rebarbação.....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de processos conforme sua matéria prima .....	26
Quadro 2 – Cotação usinagem cubo de roda .....	49
Quadro 3 – Cotação usinagem acoplamento .....	50
Quadro 4 – Cotação impressão cubo de rodas .....	50
Quadro 5 – Cotação impressão acoplamento .....	51
Quadro 6 – Comparativo entre os processos .....	51

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

n. – número

p. – página

f. – folha

cap. – capítulo

v. – volume

org. – organizador

coord. – coordenador

col. – colaborador

a.C – antes de Cristo

mm – milímetros

m – Metros

s – Segundos

## **LISTA DE SIGLAS**

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

CAD – Computer Aided-Design

FDM – Fused Deposition Modeling

MC – Modern Casting

PETG - Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol

PIB – Produto Interno Bruto

PLA – Ácido Polilático

PR – Prototipagem Rápida

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. Considerações Iniciais .....	17
1.2. Justificativa.....	18
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo Geral .....	19
1.3.2. Objetivos Específicos .....	19
1.4. Revisão Bibliográfica .....	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1. Fundição de metais .....	20
2.1.1. Processo de fundição em areia verde.....	21
2.1.1.1. <i>Confecção do molde</i> .....	22
2.1.1.2. <i>Confecção do macho, massalotes, respiros e canais de vazamento</i> .....	22
2.1.1.3. <i>Fechamento do molde</i> .....	23
2.1.1.4. <i>Fusão</i> .....	23
2.1.1.5. <i>Vazamento</i> .....	23
2.1.1.6. <i>Desmoldagem</i> .....	23
2.1.1.7. <i>Corte de canais e massalotes</i> .....	23
2.1.1.8. <i>Rebarbação e limpeza</i> .....	24
2.1.1.9. <i>Inspeção e recuperação</i> .....	24
2.2. Modelagem.....	24
2.3. Modelo.....	24
2.4. Prototipagem rápida.....	25
2.4.1. Prototipagem rápida por deposição de material .....	26
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1. Escolha do modelo .....	28
3.2. Modelagem digital.....	28
3.3. Prototipagem do modelo.....	29
3.4. Comparação entre os métodos de fabricação .....	29
3.4.1. Tempo de Fabricação.....	29

3.4.2. Custo de Fabricação.....	30
3.5. Construção da placa.....	30
3.6. Ensaio de fundição.....	31
<b>4. PROJETO E EXECUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
4.1. Escolha do modelo .....	31
4.2. Modelagem .....	33
4.3. Prototipagem dos modelos .....	38
4.4. Montagem da placa.....	42
4.5. Confeção do molde .....	43
4.6. Vazamento do molde e Desmoldagem .....	45
4.7. Limpeza e Rebarbação.....	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
5.1. Modelos .....	48
5.2. Comparação entre os métodos .....	49
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>



## **1. INTRODUÇÃO**

Dentre os processos de fabricação o processo de fundição de metais está entre os que mais se beneficiam com os avanços tecnológicos principalmente quando correlacionados aos processos de prototipagem rápida. O desenvolvimento do trabalho se dá em aplicar a prototipagem rápida na fabricação de modelos para serem utilizados na fabricação de moldes utilizados no processo de fundição em areia verde, onde serão selecionados dois modelos já utilizados comercialmente por empresas atuantes no setor, modelados digitalmente e confeccionados através da prototipagem rápida por deposição de material fundido.

Posterior a confecção dos modelos, será realizado então todas as etapas do processo de fundição em areia verde para a validação do processo empregado na fabricação dos modelos através da elaboração do conjunto fundido, de forma complementar ao trabalho, será realizado também a comparação do método de fabricação dos modelos em relação a custo através do processo de usinagem, tanto em aço como alumínio.

Neste capítulo serão abordadas as considerações pertinentes ao tema, os objetivos, justificativas e uma revisão sobre alguns trabalhos relacionados.

### **1.1. Considerações Iniciais**

Com o mercado cada dia mais competitivo e consumidores cada vez mais exigentes, é fundamental que as empresas optem por tecnologias que as auxiliem a melhorar seus processos, qualidade de seus produtos, reduzir custos e o tempo de produção.

De acordo com o a revista Modern Casting (MC) em sua edição Jan/2021 o Brasil foi responsável pela produção de cerca de 2.288.889 toneladas anuais de fundidos, o que coloca o Brasil na décima posição do ranking entre os produtores globais, sendo responsável por quase cerca de 3% do toda a produção mundial. Segundo o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) a produção de fundidos no brasil representa cerca de 3% do PIB industrial brasileiro, o que ganha maior relevância quando se considera as indústrias que abastecem, dentre elas em destaque ao setor automobilístico, que representa cerca de 23% do PIB industrial.

Dentre os processos de fabricação existentes, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos (ex.: engrenagens, carcaças, tubulações, implantes ortopédicos, bloco de motor, miniaturas); peças de extrema

responsabilidade como as que se destinam à indústria aeronáutica e aeroespacial. A produção também pode ser unitária (joias, implantes e peças artísticas) ou seriada, voltada principalmente para as indústrias mecânica e automobilística (GLORIA, 2000).

Para a realização do processo de fundição em areia verde, uma das etapas durante a fabricação do molde é a de se utilizar modelos, com isso os modelos utilizados para a confecção do molde se tornam um item de extrema importância para o processo. Para a confecção dos modelos, diversas empresas precisam de equipamentos como centro de usinagem ou tornos, ou ainda dependem de um processo manual, terceirizado ou até mesmo artesanal.

A fabricação dos modelos quando conciliado o processo de prototipagem rápida, podemos buscar uma otimização no tempo da confecção dos modelos e também tornar o processo de fundição com alta capacidade de personalização, reduzir custos, como também criar modelos com uma alta complexidade, o que processos convencionais podem não oferecer, sendo assim então o objetivo do trabalho é verificar a efetividade dos modelos produzidos pelo processo de prototipagem rápida FDM aplicados processo de fundição em areia verde.

## **1.2. Justificativa**

A proposta deste trabalho justifica-se pela oportunidade de conciliar os conhecimentos adquiridos na academia durante as monitorias da disciplina de processos metalúrgicos, identificando a necessidade e dificuldade da produção dos modelos, aplicando a prototipagem rápida para a confecção de maneira a facilitar essa demanda do processo e aplicando o processo de confecção na prática.

Tendo em vista que o setor de fundição é composto por uma quantidade expressiva de indústrias no Brasil, o trabalho também pode servir como base para as indústrias, sejam elas de pequeno ou grande porte, como material de apoio a implementação e uso do processo.

Disseminar a utilização da prototipagem rápida também é motivador, visto que muitas pessoas ainda têm um conceito de que demanda um elevado investimento para usufruir deste processo, como também podem aprimorar o conhecimento da sua aplicabilidade.

## **1.3. Objetivos**

Nesta seção apresenta-se o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

### 1.3.1. Objetivo Geral

O presente trabalho busca verificar e comparar os modelos produzidos através do processo de prototipagem rápida por deposição de material aplicados no processo de fundição em areia verde. De forma complementar, comparar o método de fabricação dos modelos do trabalho com os métodos de usinagem em aço e alumínio.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

Para atingir o Objetivo Geral, delimitando-se o problema, este trabalho de conclusão tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Fabricação de modelos utilizando a prototipagem rápida FDM.
- b) Construir uma placa para fundição em areia verde utilizando da prototipagem rápida para confecção dos modelos.
- c) Verificar a efetividade dos modelos através do ensaio de fundição.
- d) Comparar o método de impresso FDM com o de usinagem em aço alumínio.

## 1.4. Revisão Bibliográfica

Há trabalhos disponíveis que utilizam a impressão 3D, ou prototipagem rápida na fabricação de modelos, moldes e até mesmo como modelos de sacrifício, onde alguns dos trabalhos são direcionados para grandes indústrias das quais utilizam o modelo em máquinas para a fabricação do molde.

No trabalho de Silveira (2017), ele investiga a aplicação da impressão 3D na fabricação de moldes para fundição, onde através da manufatura aditiva pelo processo de jato de aglutinante é utilizado para a fabricação dos moldes, molde o qual é confeccionado em gesso, posteriormente investiga os desvios proporcionados entre o projeto do molde e o molde final.

Já no trabalho de Albuquerque (2017), o objetivo foi avaliar o desempenho em relação ao custo e vida útil de modelos confeccionados por manufatura aditiva para o processo de areia verde, onde o modelo era impresso em ABS ou PLA. Os modelos então, foram aplicados a um equipamento de sopro para machos e moldes de areia, então verificado o desgaste dos modelos, onde foram submetidos a 100 ciclos de operação, em seguida foram medidos e, por conseguinte, mais 100 ciclos, totalizando 200 ciclos.

Walker (2018) investiga a aplicação da manufatura aditiva na construção de moldes inteligentes, onde os moldes possuem uma geometria complexa para serem manufaturados através dos processos convencionais, verificando então a otimização dos moldes produzidos através da manufatura aditiva com relação ao peso e resistências das peças finais.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O desenvolvimento do trabalho é baseado em pesquisas dos assuntos relacionados ao trabalho na bibliografia, estudos de caso, trabalhos práticos realizados durante a monitoria da disciplina de processos metalúrgicos e a aplicação prática. A necessidade da fundamentação teórica se faz presente para um melhor entendimento do desenvolvimento e contexto em que o trabalho se encontra e, juntamente, auxiliar na interpretação dos resultados obtidos.

### **3.1. Fundição de metais**

A indústria de fundição é um segmento que se caracteriza pela produção de bens intermediários, fornecendo, em sua maioria subprodutos a diversas outras indústrias. (BIOLO, 2005).

Podemos notar em diversas literaturas que o processo de fundição surgiu no período de 5.000 a 3.000 a.C, onde foram catalogados alguns dos trabalhos com cobre fundido e moldes em pedra lascada. Com a descoberta do fundido, os humanos tiveram a oportunidade de utilizar os metais a seu favor, sendo empregados na fabricação de ferramentas e instrumentos, facilitando as tarefas no dia a dia.

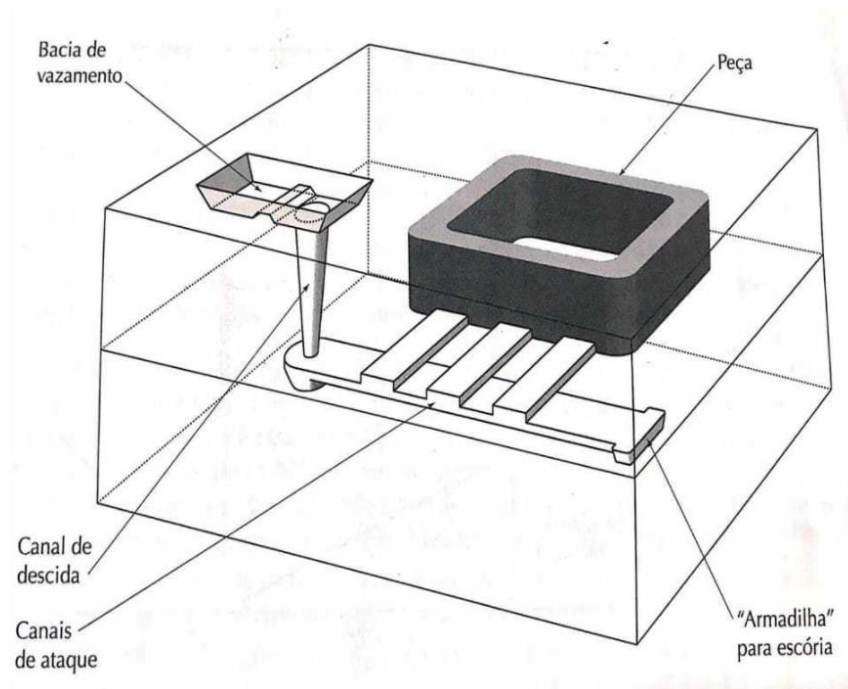
Os processos de fundição caracterizam-se por serem eventos em que está envolvida uma série de transformações físico-químicas. Estas transformações ocorrem tanto nas mudanças de fase, a que são submetidos os materiais utilizados, quanto nas substituições de matéria. Considera-se, como substituição de matéria, a alternância de materiais, nas passagens de forma ou geometria: do modelo para o molde e do molde para o produto (GUILIANO, 2008).

Esse método que vem evoluindo em conjunto com a humanidade, possibilita a fabricação de peças unitárias ou seriadas, diversos tamanhos e geometrias. Dentre os processos de fabricação, a fundição é o método mais econômico de se produzir uma vasta gama de produtos, subprodutos metálicos, podendo ser eles já direcionados ao consumidor final ou não.

Há inúmeras técnicas para realizar os processos de fundição, onde o molde utilizado pode ser permanente ou não permanente. (MOREIRA,2004).

Dentre os processos de fundição se destacam os processos de fundição em areia verde, shell molding, por gravidade, continua, sob pressão e por centrifugação. Sendo estes os processos mais utilizados no dia a dia das indústrias.

Figura 1 - Molde para o processo de fundição em areia verde.

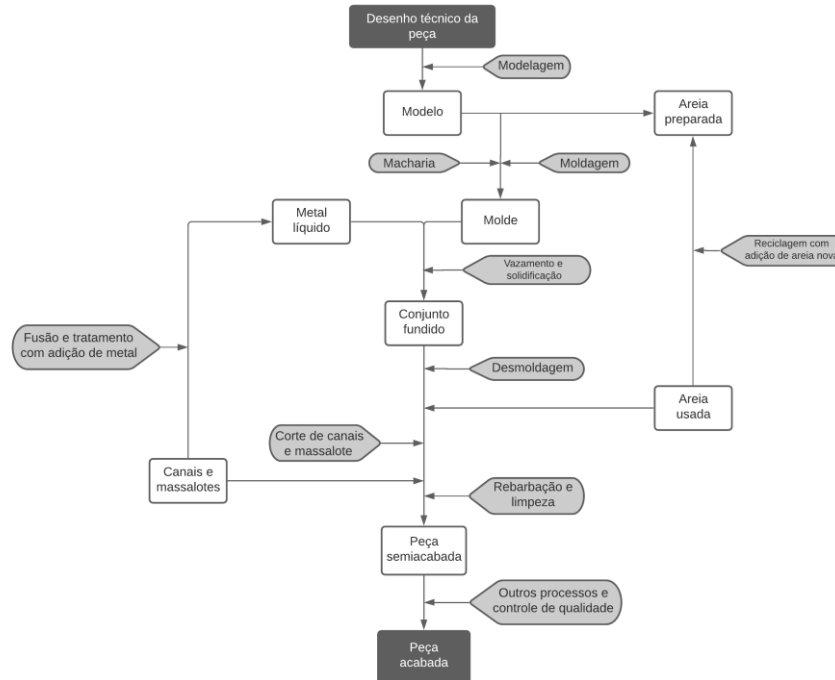


Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 35).

### 3.1.1. Processo de fundição em areia verde

O processo de fundição por areia verde, é amplamente utilizado pela indústria, responsável por toneladas de fundidos produzidos pelas indústrias do mundo toda dada a sua simplicidade tecnológica, baixo custo e a facilidade com que a areia pode ser recuperada. Diversas ligas podem ser fundidas através desse processo, como também é um dos poucos processos que permite a fundição de ligas com elevado ponto de fusão, como aço, titânio e níquel. As etapas do processo são representadas através do fluxograma na figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do processo de fundição por areia verde



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira., (2013) adaptado pelo autor.

As peças provenientes deste processo de fabricação, devem passar por algumas etapas até estarem prontas, as etapas do processo de fundição em areia verde, segundo Castro et. al, (2010), são descritas como:

### 3.1.1.1. Confecção do molde

O molde é o dispositivo no qual o metal fundido é despejado e cuja cavidade tem formato similar ao da peça final. Feito em material refratário, o molde deve ser capaz de resistir às altas temperaturas dos metais líquidos.

### 3.1.1.2. Confecção do macho, massalotes, respiros e canais de vazamento

Os machos são colocados nos moldes antes que estes sejam fechados para receber o metal líquido. Diferentemente do molde, que é uma peça que delimita as partes externas da peça fundida, o macho é uma peça que delimita as partes internas (vazios). Durante o vazamento, o macho fica completamente envolto em metal líquido.

Posto que o metal se contrai durante a solidificação, é necessária a construção de reservatórios com metal líquido para compensar a contração. Tais reservatórios são

denominados massalotes e, quando mal dimensionados, podem causar defeitos na peça, conhecidos como vazio ou rechupe.

Também é necessária a confecção de respiros, que são canais para a saída do ar e dos gases de combustão provenientes da areia durante o vazamento no molde e canais de vazamento, dutos que levam o metal despejado do cadinho de vazamento até o interior do molde.

#### *3.1.1.3. Fechamento do molde*

O molde é composto de duas metades, sendo o macho colocado no interior da primeira e fechado pela segunda. Nessa fase, é fundamental garantir a limpeza dos moldes, para que não ocorra a inclusão de outros materiais no metal, o que poderia comprometer a resistência da peça.

#### *3.1.1.4. Fusão*

Nessa fase, o metal é fundido em um forno de indução. As variáveis mais importantes desse processo são a temperatura do forno, a composição química do fundido e a correção da mesa, caso necessário.

#### *3.1.1.5. Vazamento*

O metal líquido é transferido do forno para a panela de vazamento, que despejará o metal no molde. As principais variáveis nessa fase são a limpeza da panela, a temperatura e a velocidade de vazamento. Uma velocidade muito alta pode provocar erosão da areia e inclusão de grãos na peça.

#### *3.1.1.6. Desmoldagem*

Operação de retirada da peça sólida de dentro do molde. É importante controlar a temperatura em que a operação é feita, para evitar choque térmico e consequentes trincas na peça.

#### *3.1.1.7. Corte de canais e massalotes*

Remoção do metal excedente que ficou nos canais e nos massalotes. Essa remoção pode ser feita com corte por disco abrasivo ou por fusão localizada.

#### 3.1.1.8. *Rebarbação e limpeza*

Após o corte dos canais e massalotes, essas áreas precisam de acabamento superficial. Se faz necessária a retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida.

#### 3.1.1.9. *Inspeção e recuperação*

Por fim, marcam-se os defeitos da peça durante ensaios de inspeção visual, líquido penetrante, ultrassom ou radiografia. Em seguida, testam-se as propriedades físicas e mecânicas do material. Os defeitos são removidos e reparados por solda (com exceção dos ferros fundidos, que não admitem recuperação por solda) para serem novamente inspecionados.

### 3.2. **Modelagem**

A modelagem está como uma etapa base do processo, é proveniente de desenhos técnicos da peça a ser fabricada, o qual tem sua origem na demanda da peça.

Durante a modelagem, deve se levar em conta os fenômenos que ocorrem na solidificação do metal no interior do molde, de modo que se minimizem ou evite os defeitos que possam aparecer nas peças solidificadas. Devem ser levados em conta também os detalhes da peça, design o qual dará o formato da peça final após passar por algum trabalho de acabamento ou se já estiver em sua forma final.

### 3.3. **Modelo**

Esta etapa então tem como objetivo construir uma réplica das peças que serão fundidas, tendo como finalidade imprimir as formas e dimensões das peças no molde de fundição composto pelo modelo da peça, modelo dos canais de alimentação e modelo dos massalotes (BALDAM; VIEIRA, 2013).

A confecção do modelo tem que levar em conta os seguintes fatores:

- O material depende do número de moldes a serem confeccionados (madeira, metal, gesso, polímeros).
- As dimensões devem considerar a contração do metal quando resfriar.
- O desenho deve considerar aspectos que facilitam a moldagem (por exemplo, conicidade) e que minimizem os defeitos de solidificação (por exemplo, cantos vivos, variações bruscas de seções, espessura mínima da parede etc.)



- Se há uso de macho, é preciso prever as cavidades para o respectivo encaixe.
- Projetar o sistema de canais de vazamento, respiro e massalotes.

### **3.4. Prototipagem rápida**

Os processos de fabricação dos modelos necessitam determinado tempo para sua confecção, que muitas vezes são dependentes de um processo manual, terceirizado ou equipamentos específicos, com isso, o processo de fabricação dos modelos aliado ao processo de prototipagem rápida pode-se obter uma redução no tempo de confecção dos modelos, redução de custos e tornar o processo de fundição com alta capacidade de personalização.

A prototipagem rápida permite a elaboração de métodos de desenvolvimento de produtos, sendo este realizado em etapas, permitindo a interação de diversas áreas como: planejamento, desenvolvimento e execução, tendo como principal foco o desenvolvimento de componentes funcionais, protótipos e formas de objetos em um curto período, e respeitando as especificações exigidas para o produto (VOLPATO et al.,2007).

Segundo Pipes (2010), um dos principais benefícios obtidos com a utilização da prototipagem rápida é a visualização do produto em meio digital, o que proporciona uma compreensão espacial dos modelos, sendo que estes podem ser produzidos em várias escalas. Assim, a prototipagem rápida ou impressão 3D está se tornando uma técnica bastante utilizada na fase do processo do projeto, em que os produtos são produzidos diretamente através de um modelo computacional, eliminando o uso de ferramentas manuais, diminuindo o tempo e os custos da fabricação.

Já em relação à prototipagem rápida, esta é utilizada como uma técnica de fabricação aditiva, em que o objeto é desenvolvido graficamente em um software computacional e é fabricado através da deposição de sucessivas camadas de material, geralmente polímeros, em uma plataforma que contém o molde do produto (VOLPATO et al., 2007).

Proveniente das funções da qual a peça tende a ser empregada, a escolha do processo de fabricação se torna crucial para obter seu melhor desempenho e evitar retrabalho ou até mesmo casos de insucesso com o processo. A prototipagem rápida possibilita diversos modos de fabricação, sendo eles provenientes de líquidos, sólidos ou pó, onde estão representados na Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de processos conforme sua matéria prima.

Baseada em líquidos	Baseadas em sólidos	Baseadas em Pó
SLA (Aparelho de Estereolitografia)	FDM (Modelagem por Fusão)	SLS (Sinterização Seletiva a Laser)
IJP (Impressão a Jato de Tinta) – Polyjet	LOM (Fabricação de Objetos Laminados)	3DP (Impressão em 3 Dimensões)
IJP (Impressão a Jato de Tinta) – InVision	PLT (Tecnologia de Laminação de Papel)	LENS (Modelagem de Rede Projetada a Laser)
-	IJP (Impressão a Jato de Tinta) – ThermoJet	3DP (Impressão em 3 Dimensões) – ProMetal
-	IJP (Impressão a Jato de Tinta) – Benchtop	-

Fonte: VOLPATO et al., (2007) adaptado pelo autor.

Atualmente, a prototipagem rápida utiliza-se de um conjunto de tecnologias utilizadas para a fabricação de objetos físicos através de fontes geradas por sistemas de projetos através de um software de desenho (CAD). Este método permite a criação de protótipos utilizando-se projetos de figuras bidimensionais que permitem diversos usos: serve como auxílio visual para discussões de projetos entre colaboradores e clientes, permite a realização de testes prévios, permitem a obtenção de peças com qualidade igual a de produção em série, entre outros (CURTIS, 2006).

A demanda pela impressão 3D buscando uma alternativa aos métodos tradicionais de fabricação, deriva do fato da capacidade de se produzir peças de elevada complexidade, flexibilidade de personalização e baixo custo de forma muito mais rápida.

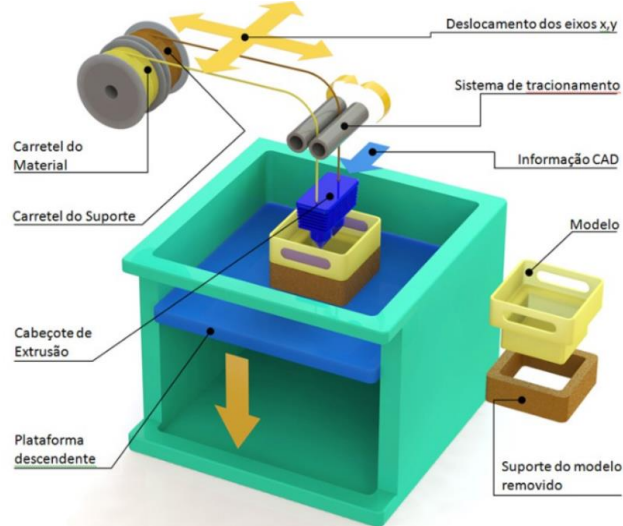
Pelos métodos tradicionais se gasta meses na concepção e desenvolvimento de novos produtos. Com a aplicação da técnica de prototipagem rápida, este tempo pode ser substituído por semanas, até mesmo dia, fazendo com que a organização economize em tempo e dinheiro (GROOVER, 2007).

### 3.4.1. Prototipagem rápida por deposição de material

O processo de prototipagem rápida por deposição de material, popularmente conhecido como impressão 3D, é proveniente dos processos de manufatura aditiva presente

nos processos de fabricação. A figura 3 representa as partes constituintes de uma impressora 3D modelo FDM.

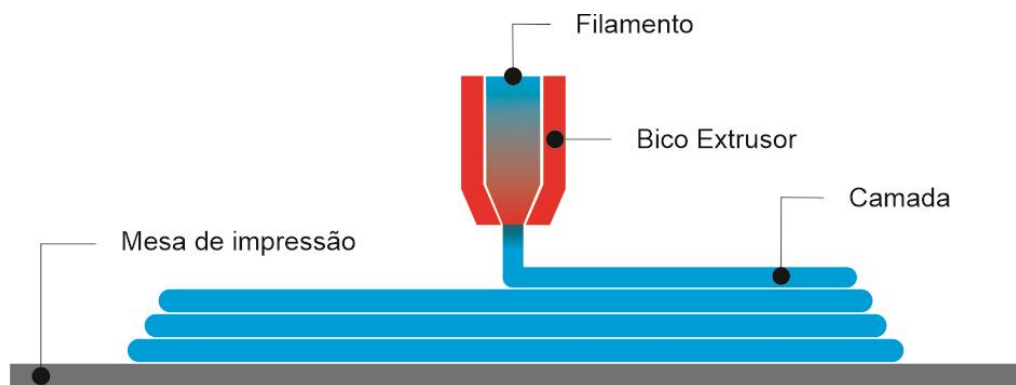
Figura 3 – Partes constituintes de impressora FDM.



Fonte: <https://aldesig.com.br/o-que-e-prototipagem-fdm-> acessado em 27/10/2021

O processo funciona em um princípio de adição do material em camadas, onde um filamento plástico é desenrolado de uma bobina, posteriormente direcionado a um bico de extrusão que controla a fusão e a deposição do fluxo de material, representado na figura 4. O bico extrusor é controlado numericamente e pode ser movido nas direções X e Y e a mesa pelo eixo Z, ao final de cada camada a plataforma de desloca para baixo com uma distância igual a espessura de camada, controlada por um software de manufatura assistida por computador (CAM), não havendo a necessidade de utilizar quaisquer tipos de ferramentas durante o processo, como resultado do processo se obtém o objeto pretendido.

Figura 4 – Princípio de funcionamento impressão FDM.



Fonte: Autor (2021)

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados e descritos os métodos e o componentes que serão utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

### 4.1. Escolha do modelo

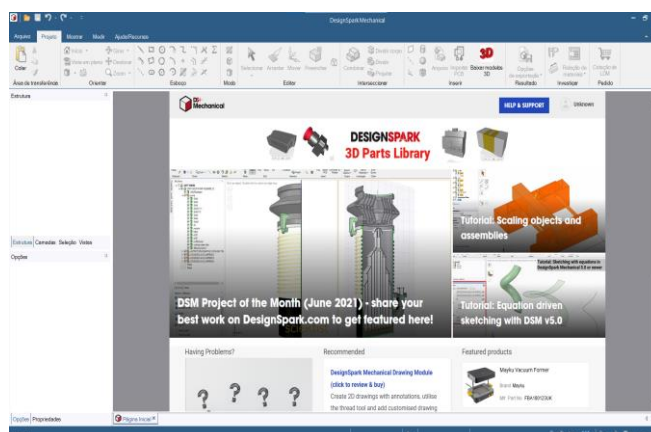
O ponto inicial do trabalho se dá com a escolha do modelo que será utilizado como base para o desenvolvimento, visando uma ação exploratória da aplicação da prototipagem rápida na produção dos modelos, onde serão selecionados modelos que exigem máquinas de usinagem mais atuais e robustas.

Os critérios de escolha dos modelos será, o primeiro um modelo do qual tem como objetivo testar a aplicação e sua eficácia e o segundo modelo terá como objetivo testar as limitações que o método possui aliado as limitações do processo de fundição. A escolha será realizada através de uma pesquisa com indústrias do setor, em seus produtos já comercializados, levando em conta o quão complexo é sua fabricação através dos métodos convencionais, sejam elas por demanda de equipamento para manufatura, tempo, mão de obra e custo.

### 4.2. Modelagem digital

A modelagem digital será realizada através do software DesignSpark Mechanical, por se tratar de um software CAD – Computer Aided-Design, ou “desenho assistido por computador”, e por ser um software livre, sem custos ou necessidade de licença para o seu uso.

Figura 5 - Interface software CAD.



Fonte: Autor (2022)

### 4.3. Prototipagem do modelo

Para a confecção dos modelos, será utilizado o material ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno, que nada mais é que um plástico derivado de petróleo. O ABS é um plástico muito utilizado na indústria por ser economicamente viável, leve e fácil de moldar, possui boas propriedades mecânicas como resistência ao impacto, tração e a abrasão.

Dentre os materiais disponíveis para a impressão 3D compatíveis com a impressora que vai ser utilizada, o ABS se destaca pois é uma das matérias primas com maior custo-benefício disponível no mercado.

Na parte de confecção dos modelos será utilizada uma impressora 3D modelo grabber i3, a qual é uma impressora de entrada, muitas vezes montadas com o auxílio de projetos Open-Source, o que as torna de fácil acesso e baixo custo.

A impressora possui as seguintes características:

- Estrutura: MDF – Medium Density Fiberboard (placa de fibra de média densidade)
- Volume de impressão: 180 x 180 x 180 mm
- Filamentos aceitos: ABS, PLA, PETG, Nylon, Tritan
- Diâmetro do filamento: 1,75 mm
- Diâmetro do bico: 0,40 mm
- Quantidade de extrusor: 1
- Resolução de impressão: 0,05mm – 50 Mícrons
- Temperatura máxima de trabalho: 250°C
- Temperatura máxima da mesa: 115°C
- Velocidade máxima de impressão: 80 mm/s

### 4.4. Comparação entre os métodos de fabricação

Para realizar a comparação entre os métodos de fabricação será analisado os seguintes quesitos:

#### 4.4.1. Tempo de Fabricação

O tempo de fabricação do modelo é fundamental para a etapa da fundição, modelos que necessitam de elevados detalhes, modificações e ajustes. Conforme o processo de fabricação, diversos modelos podem acabar tendo um elevado tempo de fabricação o que impacta diretamente no tempo de produção das peças e atendimento ao cliente.

#### 4.4.2. Custo de Fabricação

O custo de fabricação do modelo deve ser considerado, principalmente quando se tem um pedido com um elevado número de peças a serem produzidas, no processo de fundição em areia verde conforme o número de peças a serem fabricadas reflete diretamente na quantidade de moldes a serem vazados simultaneamente, onde o processo de fabricação dos modelos está diretamente ligado ao custo.

#### 4.5. Construção da placa

Para a construção da placa de fundição, será utilizado o laboratório de fundição disponível na Universidade, o qual conta com todos os materiais necessário para o desenvolvimento do trabalho.

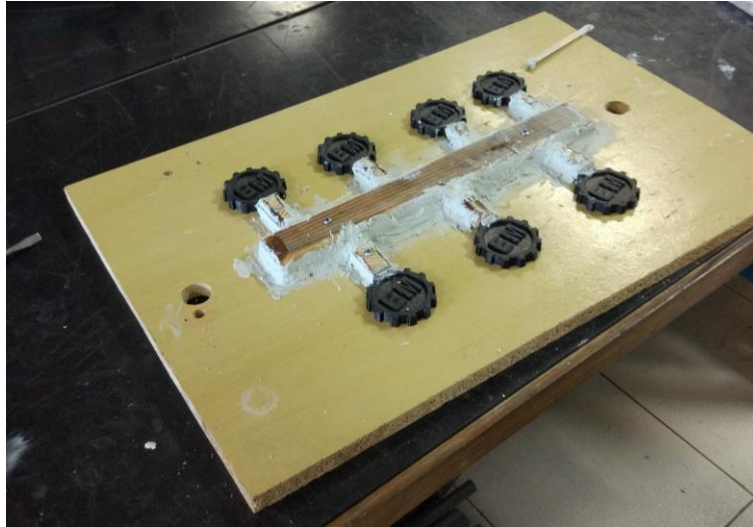
O processo de fabricação da placa deve-se levar em conta algumas etapas para que o processo ocorra da melhor maneira possível, são estas etapas constituídas pela separação da areia, pesagem da areia, ajuste de umidade, enchimento da caixa, colocação dos modelos, fechamento da caixa, compactação da areia, abertura da caixa e remoção dos modelos. Após estas etapas serem finalizadas, a etapa seguinte que é a fusão do material e vazamento do molde pode ser iniciada.

Os materiais a serem utilizados durante o ensaio de fundição são:

- Modelos impressos em ABS
- Areia verde
- Água
- Caixa para fundição
- Alumínio
- Forno

A figura 6, demonstra uma placa de fundição em processo de fabricação, onde os modelos utilizados foram fabricados através do processo de impressão 3D.

Figura 6 - Placa em processo de fabricação.



Fonte: Autor (2019)

#### **4.6. Ensaio de fundição**

A etapa do ensaio de fundição é constituída pela fusão do material que será realizado com o auxílio do forno, posteriormente o vazamento do material e solidificação no molde que foi produzido com a areia verde, com o molde preenchido se inicia então a etapa de desmoldagem, corte de canais e massalotes, remoção de rebarbas e limpeza da peça fundida, obtendo então uma peça semiacabada ou já pronta para sua aplicação final.

### **5. PROJETO E EXECUÇÃO**

A execução do trabalho foi dividida em cinco etapas, onde para cada uma delas será descrito os procedimentos realizados.

#### **5.1. Escolha do modelo**

A escolha dos modelos a serem utilizados no trabalho foi feita com o auxílio do professor orientador, onde através da análise de portfólio de produtos das empresas fiat e mademil foram determinadas.

O modelo 1 foi escolhido com o intuito de testar a aplicação da impressão FDM na produção dos modelos e sua aplicabilidade no processo de fundição em areia verde. A figura

7 representa então a primeira peça escolhida, a qual é um cubo de roda utilizado em automóveis.

Figura 7 - Cubo de Roda.

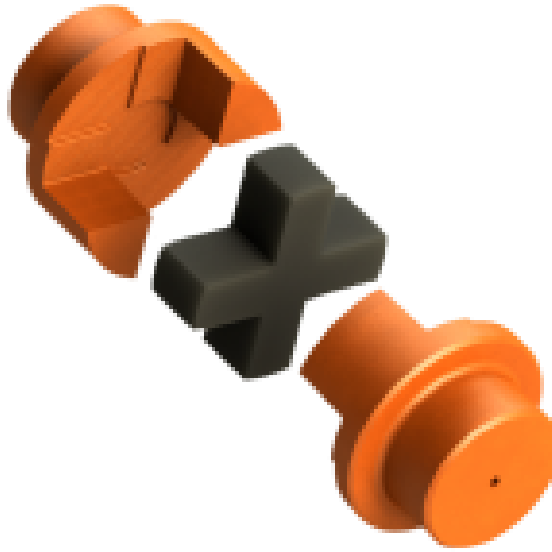


Fonte: Jocar. Disponível no link: <https://www.jocar.com.br/produtos/fiat> acessado em 27/10/2021.

A segunda peça foi escolhida então tendo em vista como um desafio para os moldes, onde a peça então possui uma série de descontinuidades e ressaltos o que a torna uma peça difícil de ser confeccionada através da modelagem em cera por exemplo e uma peça complexa para ser empregada no processo de moldagem da areia verde. A figura 8 representa a segunda peça escolhida.



Figura 8 - Acoplamento flexível.



Fonte: Mademil. Disponível no link: <https://www.mademil.com.br/linhas/linha-industrial-1> acessado em 27/10/2021.

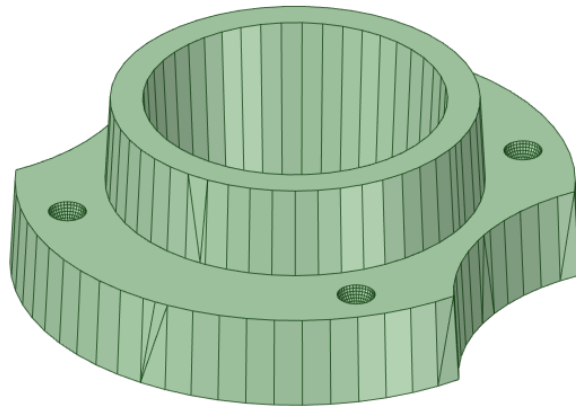
## 5.2. Modelagem

Com as peças modelos já determinadas, foi realizado então a etapa da modelagem. Através do software Design Spark Mechanical, foram modeladas as peças digitalmente, a modelagem das peças foi realizada com um formato próximo da peça a ser fundida e adequadas as geometrias para facilitar na hora da confecção do molde de fundição, onde este ajuste de compensação da geometria deve ser realizado devido a contração do material utilizado na fundição e também pela contração do material após a impressão, os ângulos das faces dos modelos devem ser ajustados de modo a facilitar a remoção na etapa de moldagem.

Os modelos selecionados proporcionam a geometria requerida para testar algumas das limitações impostas pelo método escolhido, as dimensões utilizadas para a modelagem foram retiradas com base nos modelos físicos e adaptadas de modo que melhor se enquadrem a todas as etapas do processo, visando um melhor desempenho no processo de fundição, a superfície dos modelos contém um ângulo de 3 graus, facilitando assim a remoção do modelo na etapa de moldagem da areia.

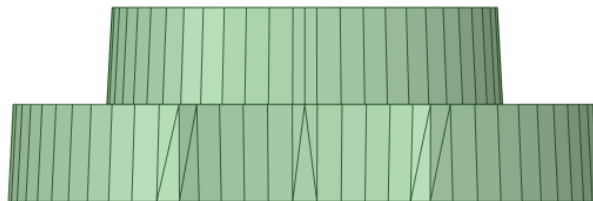
O primeiro modelo, cubo de roda, já após a etapa de modelagem digital, é representado na figura 9.

Figura 9 - Modelagem digital cubo de roda vista isométrica.



Fonte: Autor (2022)

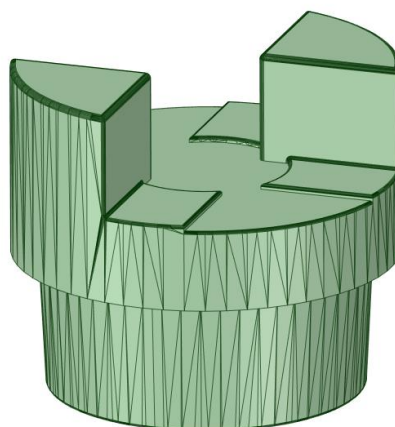
Figura 10 - Modelagem digital cubo de roda vista lateral.



Fonte: Autor (2022)

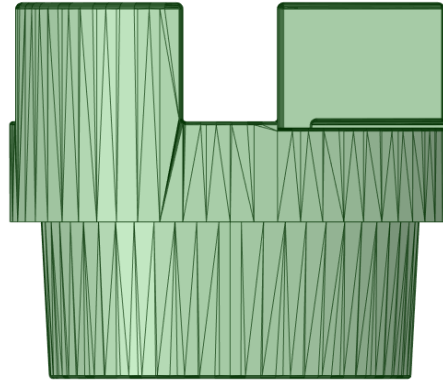
O segundo modelo, acoplamento flexível, é representado na figura 11.

Figura 11 - Modelagem digital acoplamento flexível vista isométrica.



Fonte: Autor (2022)

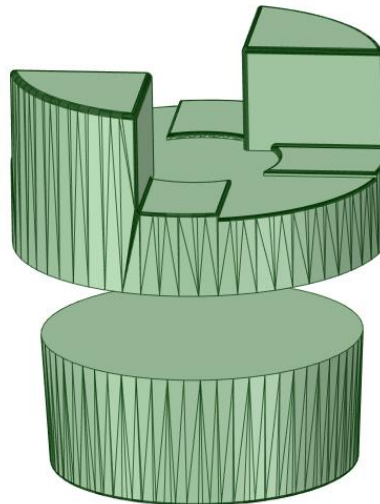
Figura 12 - Modelagem digital acoplamento flexível vista lateral.



Fonte: Autor (2022)

O modelo do acoplamento flexível teve sua modelagem seccionada em duas partes, visto que para realizar a confecção desta peça através do processo de fundição em areia verde, demande que o molde seja bipartido. A figura 13 demonstra então as duas partes.

Figura 13 - Modelagem acoplamento do modelo bipartido para o molde.

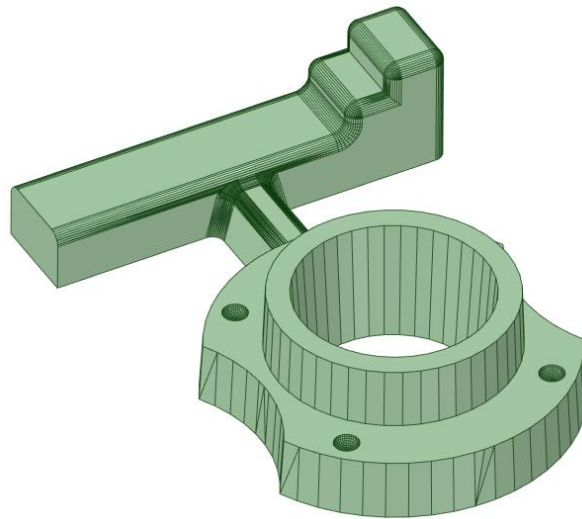


Fonte: Autor (2022)

Além das peças utilizadas como modelo, se fez necessário então a modelagem dos elementos que complementam o molde para o processo de fundição em areia verde, como o canal de alimentação, canal de ataque, armadilha para escoria e bacia de vazamento.

A figura 14, representa a modelagem da parte 1 do modelo utilizado, composta pelo modelo digital do cubo de rodas, canal de ataque, parte do canal de alimentação e armadilha para a escória.

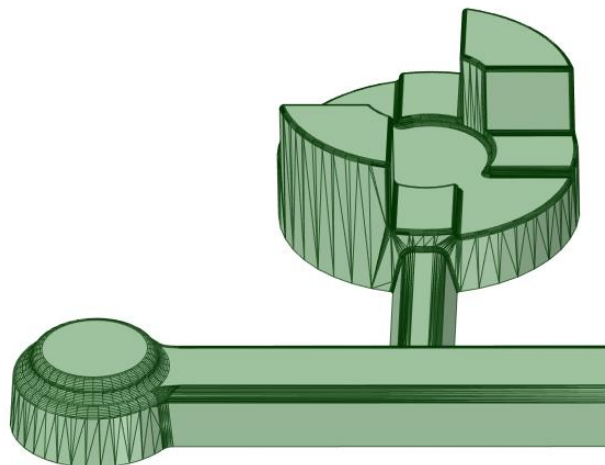
Figura 14 - Modelagem parte 1 inferior do modelo.



Fonte: Autor (2022)

A figura 15, representa então o modelo digital da parte 2, composta base do canal de alimentação, canal de ataque, parte do modelo referente ao acoplamento tipo garra.

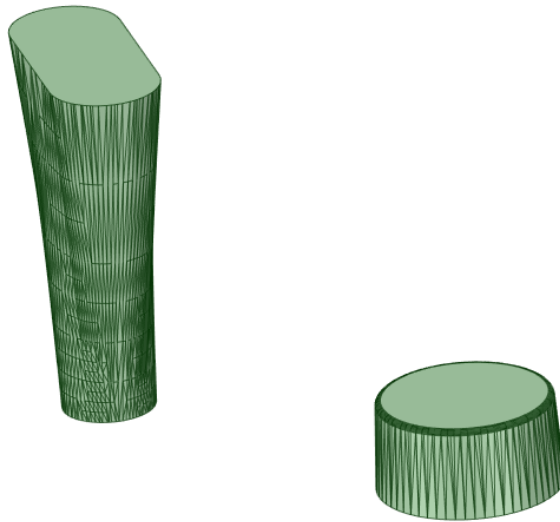
Figura 15 - Modelagem parte 2 do modelo para o molde.



Fonte: Autor (2022)

A parte inferior do modelo, apresentada na figura 14 e figura 15, representa as peças que ficarão na parte inferior do molde, já na figura 16 estão representados o canal de alimentação e a segunda parte do acoplamento.

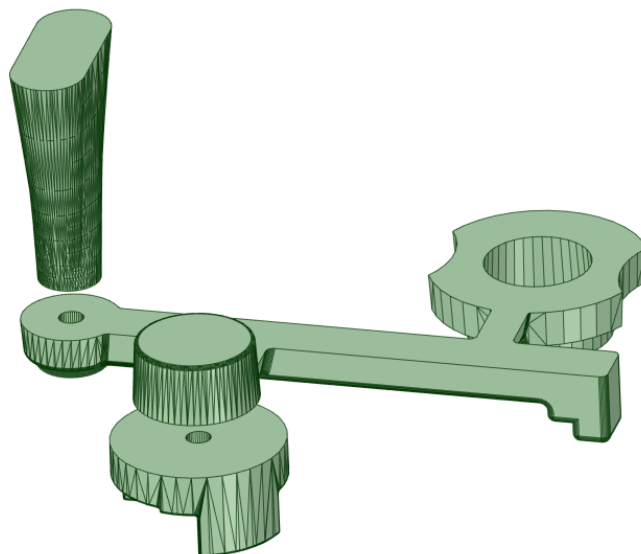
Figura 16 - Modelagem parte 2 do modelo para o molde.



Fonte: Autor (2022)

Sendo então a placa composta pelas partes superior e inferior, representada pela figura 17.

Figura 17 – Componentes da placa modelados digitalmente.



Fonte: Autor (2022)

### 5.3. Prototipagem dos modelos

Na etapa de prototipagem dos modelos, foi utilizado o software Cura Ultimaker para o fatiamento dos modelos digitais, o processo de fatiamento é onde o modelo digital literalmente é fatiar a peça em inúmeras camadas e define as coordenadas que a impressora deve seguir, sendo gerado o GCODE.

Durante o processo de fatiamento é possível definir a velocidade de movimentação do cabeçote extrusor e mesa, altura de camada, porcentagem de preenchimento, linhas de perímetro, dentre outros parâmetros que refletem na qualidade do modelo impresso.

As peças foram impressas com os seguintes parâmetros:

Velocidade de impressão: 45mm/s

Espessura de camada: 0,15mm

Espessura do bico: 0.4mm

Porcentagem de preenchimento: 20%

Linhas de perímetro: 2 linhas

Camadas de topo: 3 Camadas

Camadas de base: 3 Camadas

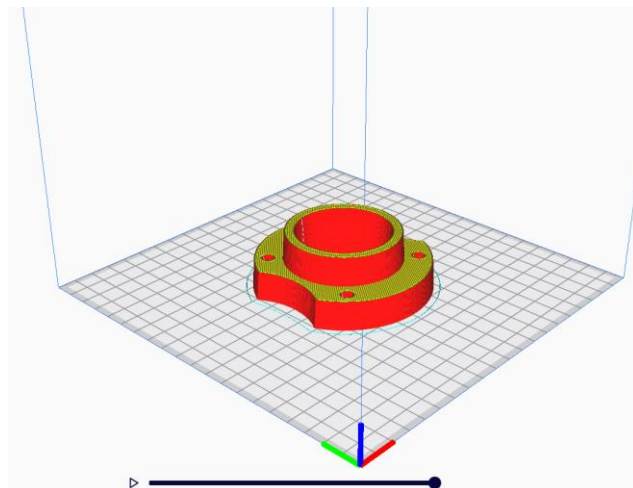
Temperatura de extrusão: 235°C

Temperatura da mesa: 105°C

Os parâmetros utilizados são de acordo com a melhor impressão a qual a máquina utilizada permite.

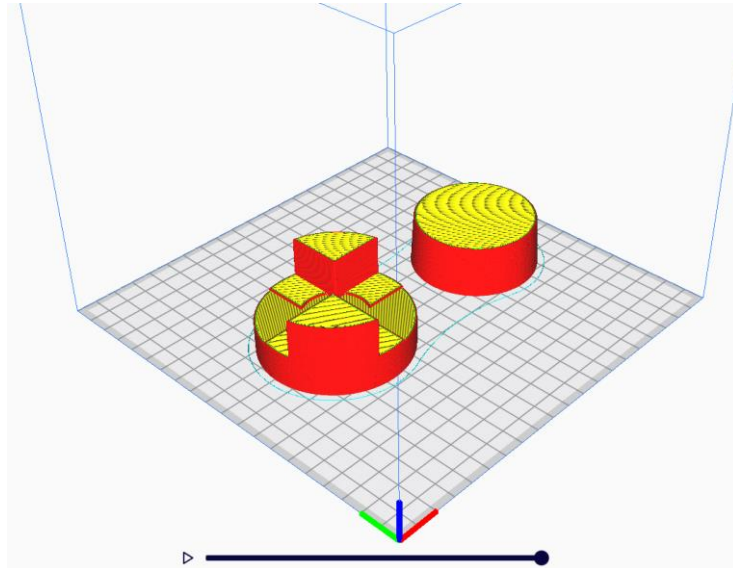
A figura 18 representa o modelo digital do cubo após a etapa de fatiamento.

Figura 18 – Cubo após o fatiamento.



O acoplamento flexível seguiu os mesmos parâmetros de impressão, onde na figura 19 é representada o modelo após o fatiamento.

Figura 19 – Acoplamento após o fatiamento.



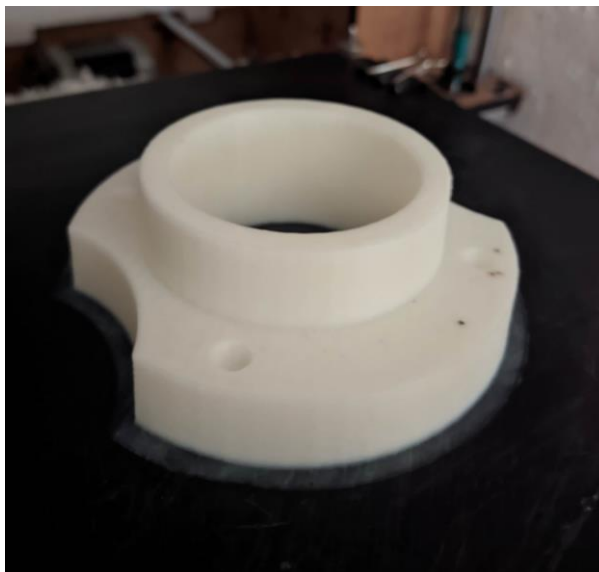
Fonte: Autor (2022)

Após o fatiamento dos modelos, foi salvo então o GCODE gerado pelo software de fatiamento em um cartão de memória e se deu início no processo de fabricação dos modelos.

Durante a etapa de impressão, cuidados com o ambiente de impressão se tornam fundamentais para o bom desenvolvimento do processo, principalmente quando se é utilizado o material ABS. O enclausuramento do ambiente serve para evitar correntes de ar que podem vir a causar uma rápida contração no material ocasionando a deformação da peça impressa através da contração das camadas, descolamento de camadas ou descolamento da peça da mesa de impressão, casos em que defeitos como esses decorrentes no processo de impressão podem acabar sacrificando toda a peça e inutilizando o modelo. Cuidados com o filamento utilizado também devem ser levados em conta, principalmente com seu armazenamento evitando com que o filamento tenha uma umidade elevada ou má qualidade do material, resultando em defeito nas peças.

O primeiro modelo impresso foi o cubo, 2 horas e 10 minutos e 24 gramas de material foram necessários para a impressão do modelo, a figura 20 apresenta então o modelo na mesa de impressão.

Figura 20 – Cubo após a impressão.



Fonte: Autor (2022)

O segundo modelo, acoplamento, teve um tempo de impressão igual a 3 horas e 32 minutos e foram necessários 32 gramas de filamento, a figura 21 apresenta o modelo logo após a impressão.

Figura 21 – Acoplamento após a impressão.



Fonte: Autor (2022)

Tendo em vista que além das peças modelo, o restante dos componentes que serão utilizados para a confecção da placa, como canal de ataque, alimentação, armadilha para escória e canal de vazamento, também devem ser dimensionados e fabricados de acordo com



o projeto. De modo a facilitar a fabricação e montagem dos componentes na placa, optou-se por realizar a modelagem e realizar a impressão dos componentes integrados, facilitando assim as atividades de montagem.

Através da modelagem digital foi possível desmembrar o modelo geral, constituído por todos os elementos constituintes da placa, em partes, a parte que fica no lado inferior da placa foi dividida em duas partes, parte 1 e parte 2. Dos componentes que ficam na parte superior da placa, ambos foram impressos separadamente.

Para a impressão da parte 1, representada na figura 22, foram necessários cerca de 4 horas e 57 minutos e 40 gramas de filamento.

Figura 22 - Impressão parte 1 do modelo inferior com parte dos canais.



Fonte: Autor (2022)

Já para a impressão da parte 2, representada na figura 23, teve a duração de 5 horas e 18 minutos e 53 gramas de filamento.

Figura 23 - Impressão parte 2 do modelo inferior com parte dos canais.



Fonte: Autor (2022)

#### 5.4. Montagem da placa

A placa utilizada para a confecção do molde, é onde contém os componentes que irão formar as cavidades do molde, sendo eles o canal de vazamento, canais de ataque, bacia de alimentação, armadilha para escória e a peça modelo.

Para realizar a montagem da placa, foi utilizado uma lâmina de MDF de 60 x 40 centímetros e 18 milímetros de espessura. Com a placa já nas dimensões adequadas se deu início a montagem dos componentes. No lado inferior da placa ficaram instalados os canais de ataque, armadilha para escoria, o modelo do cubo de roda e a parte inferior do modelo acoplamento flexível, que necessita ser um modelo bipartido devido a sua forma geométrica.

A figura 24, representa então os modelos já fixados no lado inferior da placa.

Figura 24 – Modelos fixados no lado inferior da placa.



Fonte: Autor (2022)

Na parte superior da placa, ficam instalados então o canal de alimentação e a segunda parte do modelo referente ao acoplamento flexível, representados na figura 25.

Figura 25 – Modelos fixados no lado superior da placa.



Fonte: Autor (2022)

Com os componentes já fixados em ambos os lados da placa, se dá início a próxima etapa do processo que é a confecção do molde.

### **5.5. Confecção do molde**

O molde é o dispositivo onde o metal em seu estado líquido é vazado, para assim obter o formato da peça desejada. O molde é constituído de material refratário, neste caso areia verde e aglomerante, onde é moldado sobre a placa realizada na etapa 5.4, que após a remoção, forma a cavidade com o formato da peça a ser fundida.

A primeira etapa para a construção do molde é proveniente do preparo da areia, onde ela deve ser peneira para evitar que partículas com tamanho indesejado venham junto com a areia utilizada na confecção do molde, após a areia ser peneirada, ela é umidificada, mantendo assim a consistência do molde. Após o preparo da areia ser realizado, a areia já preparada é então posta sobre a caixa de fundição com a placa em seu meio, onde se dá início a etapa de compactação, formando assim o molde em areia verde.

A figura 26 representa a placa de fundição já com a areia compactada em ambos os lados, em seu meio está a placa com os modelos.

Figura 26 – Placa com a areia já compactada.

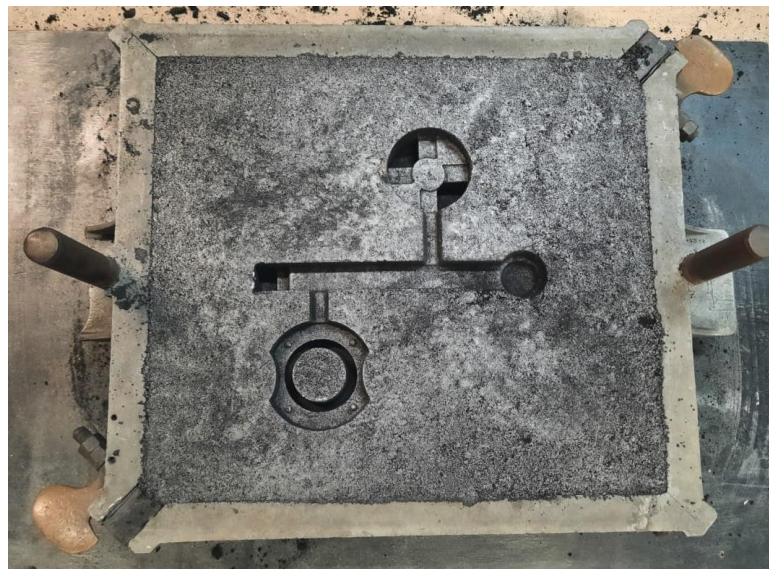


Fonte: Autor (2022)

Com ambas as partes do molde já compactadas, uma das etapas é a remoção da placa da caixa de fundição, etapa a qual provem totalmente de como os modelos, canais e componentes da placa foram projetados, resultando assim em um desacoplamento da placa com maior facilidade sem que a areia fique grudada nos modelos ou mal compactada.

A figura 27 demonstra a placa inferior após a retirada da placa com os modelos.

Figura 27 – Parte inferior do molde.



Fonte: Autor (2022)

A figura 28 demonstra a placa superior após a retirada da placa com os modelos.

Figura 28 – Parte superior do molde com areia já compactada.



Fonte: Autor (2022)

Após a retirada da placa superior, foi constatado que não houve uma boa desmoldagem da placa com os modelos. Com o intuito de dar seguimento ao ensaio de fundição, foi então realizado um reparo paliativo da forma que possibilitasse ser realizado então a etapa de vazamento do molde.

### **5.6. Vazamento do molde e Desmoldagem**

Para a realização do vazamento do molde foram utilizadas peças de alumínio como partes de trilhos de cortina e peças de moto como matéria prima, onde foram alocadas em um cadinho e posteriormente levadas ao forno o qual estava com o setpoint em  $1000^{\circ}\text{C}$ . Com o material já em todo seu estado líquido foi realizado a etapa de vazamento, figura 29, sendo conduzido o cadinho até o molde e realizado o vazamento, com o auxílio de um termopar foi realizado a aferição de temperatura da liga que estava em  $707^{\circ}\text{C}$  graus.



Figura 29 – Vazamento do metal no molde.



Fonte: Autor (2022)

Figura 30 – Temperatura do metal em estado líquido.



Fonte: Autor (2022)

Após o vazamento do molde foi aguardado cerca de 30 minutos para a solidificação completa do material nas cavidades internas do molde e realizado então a desmoldagem. A figura 31 apresenta o conjunto fundido após a etapa de desmoldagem.

Figura 31 – Conjunto fundido.

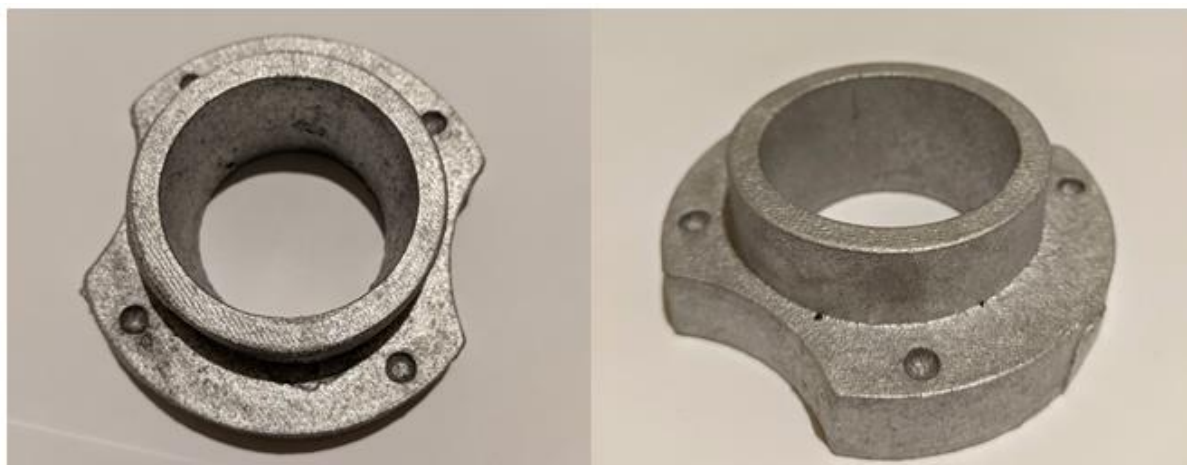


Fonte: Autor (2022)

### 5.7. Limpeza e Rebarbação

De forma a melhorar a apresentação dos componentes fundidos foi realizado a limpeza e rebarbação dos componentes fundidos, representados nas figuras 32 e 33.

Figura 32 – Cubo de rodas após limpeza e rebarbação.



Fonte: Autor (2022)

Figura 33 – Acoplamento após limpeza e rebarbação.



Fonte: Autor (2022)

## 6. Resultados e Discussões

Neste capítulo será abordado os resultados obtidos com a aplicação dos modelos fabricados a partir do processo de prototipagem rápida e empregados no processo de fundição por areia verde e posteriormente realizado a comparação entre os métodos de fabricação.

### 6.1. Modelos

O conjunto fundido é proveniente do molde utilizado, o molde por si tem como sua origem os modelos onde podemos notar durante o desenvolvimento que foi muito satisfatório.

A figura 27 podemos notar que os modelos se saíram muito bem, toda a geometria dos modelos fora passada para o molde e o mesmo não apresentou defeitos quando realizado a remoção dos modelos da parte inferior.

Através da figura 28, que apresenta a parte do molde superior é possível notar que devido a rugosidade proveniente do processo de prototipagem escolhido tem interferência na etapa de moldagem, sendo assim necessário uma correção manual para se obter um melhor resultado.

Toda a etapa de moldagem foi realizada em conjunto com os alunos da disciplina de processos metalúrgicos, alunos estes os quais tiveram seu primeiro contato com o processo e mesmo sem maestria ou pouco cuidado obtiveram um resultado muito satisfatório com a utilização dos modelos. Nas figuras 32 e 33, pode-se notar como os modelos passaram suas



mais minuciosas características, como rugosidade, curvas e saliências provenientes do método de fabricação. Isso ressalva alguns cuidados que se devem ter ao utilizar modelos provenientes deste método, seja para evitar com que essas características sejam transferidas dos modelos para o molde, como também de modo que sejam utilizadas em seu favor.

Alguns imprevistos ocorreram com a moldagem da placa superior, onde através da figura 28 é possível notar o descolamento de parte do molde o qual ficou grudado na peça modelo durante a desmoldagem do bolo de fundição, isso foi correlacionado com a rugosidades dos modelos. Possíveis fatores relacionados ao defeito podem ser levantados como uma alta rugosidade, baixa ou alta umidade da areia, baixa quantidade de desmoldante nos modelos ou elevada pressão na hora de compactar a areia, mas se contradiz quando comparado com a moldagem da placa inferior, a qual havia as geometrias mais complexas e obtiveram um excelente resultado no processo.

## 6.2. Comparação entre os métodos

Durante o desenvolvimento da parte prática do trabalho, foi elaborado a cotação de preços para a fabricação dos modelos com diversas empresas do setor de usinagem. Ambas as peças utilizadas como modelo para a fabricação do molde, a sua reprodução em metal demanda de um centro de usinagem, já para serem modelados em cera, as empresas encontradas que viessem a ofertar tal serviço, declinaram o pedido de orçamento pois se tratava de uma peça unitária de cada modelo, alegando inviabilidade de produção ou falta de um modelo físico para sua reprodução. Dessa maneira foi realizado somente a cotação de preços com empresas de usinagem.

A cotação para a fabricação das peças através do processo de usinagem é então apresentada nos quadros abaixo, onde no Quadro 2 é apresentado os valores de cotação para o cubo de roda e na Quadro 3 é apresentado os valores cotados para o acoplamento.

Quadro 2 – Cotação usinagem cubo de roda.

<b>Cubo de Roda</b>			
<b>Empresa</b>	<b>Preço – Aço SAE 1020 (R\$)</b>	<b>Preço – Alumínio (R\$)</b>	<b>Tempo de Fabricação (min)</b>
Delavi	828,00	828,00	N/I
Nazário	435,00	390,00	120

Wartung	362,00	315,00	N/I
Romix	320,00	260,00	135
Usimatos	296,00	212,00	95
<b>Média</b>	448,20	401,00	116,66

Fonte: Autor (2022)

Quadro 3 – Cotação usinagem acoplamento.

<b>Acoplamento</b>			
<b>Empresa</b>	<b>Preço – Aço SAE 1020 (R\$)</b>	<b>Preço – Alumínio (R\$)</b>	<b>Tempo de Fabricação (min)</b>
Delavi	1104,00	1104,00	N/I
Wartung	670,00	500,00	N/I
Romix	600,00	475,00	215
Usimatos	592,00	438,00	200
Nazário	515,00	416,00	250
<b>Média</b>	696,20	586,60	221,6

Fonte: Autor (2022)

Os quadros 4 e 5 apresentam então a cotação para impressão das peças nos mesmos parâmetros utilizados para a realização do trabalho.

Quadro 4 – Cotação impressão cubo de roda.

<b>Cubo de Roda</b>		
<b>Empresa</b>	<b>Preço (R\$)</b>	<b>Tempo de Fabricação (min)</b>
FRZ3D	52,80	185
3D Montes	80,00	N/I
Engiprinters	75,00	N/I
Forja Sul 3D	20,00	N/I
PRINTUP 3D	82,81	N/I
<b>Média</b>	62,12	185

Fonte: Autor (2022)

Quadro 5 – Cotação impressão acoplamento.

<b>Acoplamento</b>		
<b>Empresa</b>	<b>Preço (R\$)</b>	<b>Tempo de Fabricação (min)</b>
FRZ3D	92,40	243
3D Montes	100,00	N/I
Engiprinters	106,00	N/I
Forja Sul 3D	25,00	N/I
PRINTUP 3D	110,00	N/I
<b>Média</b>	<b>86,68</b>	<b>243</b>

Fonte: Autor (2022)

De forma a analisar o custo e o tempo de fabricação, foi realizado a comparação utilizando da média entre as 5 cotações recebidas, apresentadas no quadro 6.

Quadro 6 – Comparativo entre os processos.

<b>Comparativo entre Processos</b>				
<b>Componente</b>	<b>Processo</b>	<b>Custo (R\$)</b>		<b>Tempo (min)</b>
		<b>Aço</b>	<b>Alumínio</b>	
Cubo de Rodas	Usinagem	448,20	401,00	116
	Impressão 3D	62,00 <i>(7,2x – 6,42x)</i>		185 <i>(1,6x)</i>
Acoplamento	Usinagem	696,00	586,60	221
	Impressão 3D	86,68 <i>(8,02x – 6,76x)</i>		243 <i>(1,09x)</i>

Fonte: Autor (2022)

Através do Quadro 6, é possível verificar o custo e tempo de fabricação médio pertinentes a fabricação dos modelos através dos processos de usinagem e impressão 3D.

O modelo do cubo de rodas quando realizado sua confecção através da impressão 3D apresenta um custo cerca de 7,2 vezes menor que quando confeccionado através da usinagem

em aço e 6,42 vezes ao alumínio. O tempo de fabricação em contrapartida se demonstra superior em 1,6 vezes quando comparado com o tempo de fabricação necessário para a confecção do modelo para o trabalho, ele se sobressai.

Para o modelo do acoplamento, quando comparado o custo de fabricação através da impressão 3D ele demonstra um custo cerca de 8,02 vezes menor a confecção em aço e 6,76 vezes em alumínio, já o tempo de fabricação se demonstra 1,09 vezes superior ao da usinagem.

Os tempos de fabricação podem sofrer divergências quando levados em conta os modelos das máquinas utilizadas. Na impressão 3D, máquinas mais robustas permitem impressões com maiores velocidades sem que gere defeitos na peça, da mesma forma que para a usinagem os equipamentos mais robustos e atuais podem proporcionar um tempo de fabricação inferior.

## **7. CONCLUSÃO**

O principal objetivo deste trabalho foi a produção dos modelos através do processo de prototipagem rápida, necessários para a confecção dos moldes utilizados no processo de fundição por areia verde. Como parte complementar foi comparado com o método tradicional utilizado pelas indústrias, como forma de auxílio para a seleção do processo de fabricação dos modelos.

Durante o desenvolvimento do trabalho ficou explicito o quão prático é a aplicação do processo de prototipagem rápida na fabricação dos modelos, desde a escolha dos modelos que seriam utilizados para o trabalho, passando pela etapa de modelagem digital, fabricação, montagem do molde até sua aplicação final no processo de fundição.

A prototipagem rápida possibilita uma grande flexibilidade durante o processo de confecção dos modelos, tendo vista que a primeira etapa prática do processo é constituída pela modelagem digital dos componentes, resultando em uma prévia digital do modelo físico que será fabricado, de uma maneira fácil e rápida também possibilita ajustes e modificações.

Já na produção dos modelos, é possível verificar que o método escolhido possui um tempo hábil satisfatório quando comparado com o método de fabricação através da usinagem. Comparando o tempo de confecção dos modelos pelo processo de prototipagem rápida com os processos de usinagem, pode-se notar que o processo através da prototipagem apresenta um maior tempo de confecção o que contrabalança com o seu custo. Além do mais o processo

possibilita uma alta compatibilidade quando ocorre alguma modificação de material utilizado no processo de fundição, ajustes e correções com baixo custo.

Ao total foram cerca de 25 empresas contatadas para a usinagem das peças modelo, onde apenas 5 dessas empresas se disponibilizaram a atender o pedido. Com isso pode-se notar o quão difícil é para uma empresa atender um pedido com uma serie pequena ou limitada de peças a serem produzidas, em casos que isso ocorre as empresas do setor fundiário que demandam de peças unitárias para a fabricação dos moldes passam a declinar o pedido pois não conseguem realizar a produção devido a falta do modelo. Até mesmo deixa-se de atender o pedido pela inviabilidade de se produzir o modelo proveniente de um elevado custo.

No término do trabalho, conclui-se que, a utilização dos modelos impressos deve-se ter cuidado durante sua fabricação e aplicação no processo, mas possibilitam um alta compatibilidade e baixo custo quando comparados aos processos tradicionais de fabricação, demonstrando assim uma viabilidade produtiva e econômica.

Durante o desenvolvimento do trabalho é possível verificar que a aplicação dos modelos confeccionados através da prototipagem rápida FDM é necessário cuidado, principalmente com a rugosidade dos modelos, o que é característico do processo.

Dessa maneira é verificado que através do processo de prototipagem rápida FDM é possível confeccionar modelos para serem utilizados no processo de fundição em areia verde de forma satisfatória devido ao êxito do conjunto fundido.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se os seguintes itens:

- Verificar a utilização de tratamentos superficiais em modelos produzidas através da prototipagem rápida FDM com a finalidade de melhorar a produção dos moldes.
- Desenvolver estudos da fabricação de modelos com métodos diferentes do FDM.
- Verificar o desgaste dos modelos quando aplicados na fabricação manualmente dos moldes e outros materiais disponíveis para o processo de prototipagem FDM.
- Verificar para diferentes materiais o desgaste ocasionado nos modelos fabricados através da prototipagem rápida decorrentes da moldagem em areia verde.
- Aplicar a metodologia em parceria com indústrias do setor.
- Disponibilizar o processo para aplicação prática em conjunto com a disciplina de processos metalúrgicos ministrada na universidade.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Bruno Souza. **Estudo da fabricação de ferramental de fundição por manufatura aditiva**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BALDAM, Roquemar, VIEIRA, Estefano. **Fundição: Processos e tecnologia correlatos**; São Paulo: Érica, 2013, 384 p.

BIOLO, S. M. **Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. 2005, 162f. Dissertação Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, RS.

CASTRO, P. C. de; FILHO E. D. B.; CASOTTI, B. P. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. 2010. BNDES Setorial 33, p.121 -162.

Census of World Casting Production: Total Casting Tons Dip in 2019 // Modern Casting. – January 2021. – Vol. 111, No. 1. – pp. 28-30.

CURTIS, W. **Rapid prototyping: trully functional prototype – time-compression technologies**. Moldes de Prototipado, Astúrias, v. 03, n. 04, p. 12, Mar./Apr. 2006. Disponível em: Disponível em: <<http://www.timecompress.com>>. Acesso em: 14 set. 2021.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

GIULIANO, José Antonio Schenini. **OS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO, COMO FERRAMENTA NA OBTENÇÃO DE ESCULTURAS EM METAL**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, [S.L], p. 15, 2008.

KIMINAMI, Claudio; CASTRO, Walman; OLIVEIRA, Marcelo. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**; São Paulo: Blucher, 2013, 235p.

MOREIRA, M. T. de O. T. **Contaminação ambiental associada às areias residuais de fundição**. 2004, 235f. Tese (Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

PIPES, A. **Desenho para designers**. São Paulo: Blucher, 2010.

SOARES, Glória Almeida. **Fundição – mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe, 2000.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: tecnologia e aplicações**. São Paulo: E. Blucher, 2007.

WALKER, Jason et al. **3D printed smart molds for sand casting**. International Journal of Metalcasting, Springer, v. 12, n. 4, p. 785–796, 2018.