

Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA  
Engenharia Automotiva

## **Projeto e Fabricação de pedal de freio para FSAE em alumínio reciclado**

**Autor: Lucas de Avelar Leite**  
**Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana**

**Brasília, DF**  
**2021**





Lucas de Avelar Leite

## **Projeto e Fabricação de pedal de freio para FSAE em alumínio reciclado**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Brasília, DF

2021

---

Lucas de Avelar Leite

Projeto e Fabricação de pedal de freio para FSAE em alumínio reciclado/  
Lucas de Avelar Leite. – Brasília, DF, 2021. 55 p.

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA , 2021.

1. Pedal de freio. 2. Fundição alumínio. 3. . I. Prof. Dr. Rhander Viana. II.  
Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto e Fabricação de  
pedal de freio para FSAE em alumínio reciclado

CDU 02:141:005.6

---

Lucas de Avelar Leite

## **Projeto e Fabricação de pedal de freio para FSAE em alumínio reciclado**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 19 de Maio de 2021:

---

**Prof. Dr. Rhander Viana**  
Orientador

---

**MSc Danilo dos Santos Oliveira**  
Convidado 1

---

**Eng. João Carlos Wohlgemuth**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2021



*Dedico este trabalho a todos que estavam comigo verdadeiramente durante esta caminhada, nos dias bons e ruins sempre me dando base para prosseguir.*





# Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por conceder a dádiva da vida e saúde para realizar este trabalho/etapa. Em segundo lugar agradeço a minha família, meus pais e irmão, Juracy Carneiro, Maria da Glória e Gabriel Avelar por todo o apoio e amor incondicional que me foram dados. Esta etapa/trabalho foi difícil e por vezes pensei em desistir, mas o exemplo dado por eles me foram fonte de inspiração e energia para poder chegar ao fim dessa caminhada.

Agradeço também aos meus amigos, família que o destino me permitiu escolher, Lucas Porta, Heitor Del Esposte, Mateus Solda e Felipe Soares e aos tantos outros também que foram presentes na minha caminhada

Agradeço aos meus professores por seus ensinamentos, em especial ao Prof. Rhan-der Viana que sempre esteve disponível para ajudar com o que fosse preciso.

E por fim agradeço aos técnicos dos laboratórios, Henrique, Jackson e Danilo que tanto me ensinaram, coisas estas que não tinha aprendido em sala de aula, ensinamentos estes que levo para a vida.

Obrigado a todos espero um dia poder retribuir tamanhos gestos feitos a mim!



"É necessário sempre acreditar que um sonho é possível, que o céu é o limite  
e você é imbatível"  
(Racionais MC).

"O pensamento é força criadora"

"Você pode não ter talento, mas raça é obrigação"

"Não espere o futuro mudar sua vida. Porque o futuro será consequência do  
presente, corrida hoje vitória amanhã"



# Resumo

A importância do pedal no sistema de freio passa despercebido no uso do dia a dia, uma vez que é mais popular a quebra de outros componentes do sistema de freios, porém a quebra do pedal causa a inoperância do sistema colocando a vida do condutor em risco, dessa forma garantir a integridade deste componente é primordial.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a concepção de um pedal de freio a partir do processo de fundição em alumínio. Buscando viabilizar sua construção e aplicação em um veículo elétrico do tipo fórmula SAE.

A partir de simulações estrutural, por intermédio do método dos elementos finitos juntamente aos *softwares* Ansys e Catia, o modelo foi projetado e analisado quanto a sua capacidade de suportar todos os esforços no qual estará submetido em condições de operação. O pedal foi simulado com engastamentos em seus pontos de fixação e aplicado uma força de 2000N na face de contato com o pé do condutor, somente com a aprovação nessa análise a peça poderia ser fabricada.

O pedal concebido a partir do processo de fundição, que passou por etapas, sendo a primeira a confecção dos modelos em impressão 3D. Em um segundo momento utilizando-se dos modelos foi moldada em areia a caixa molde para vazamento do material fundido e por fim envazando as caixas com alumínio fundido e obtendo a peça bruta projetada. Foi utilizado fluxo de ar no queimador, em uma das fundições, a fim de obter uma chama mais quente e evitar a presença de escória na peça. Este fato trouxe também a análise comparativa entre as duas peças quanto a acabamento pós fundição.

**Palavras-chaves:** Pedal de freio, Fundição alumínio ,simulação estrutural



# Abstract

The importance of the pedal in the brake system goes unnoticed in everyday use, since it is more popular to break other components of the brake system, however the breakage of the pedal causes the inoperability of the system puts the driver's life at risk , thus ensuring the integrity of this component is paramount.

This work presents a study on the design of a brake pedal based on the aluminum casting process. Seeking to make its construction and application in an electric vehicle of the SAE formula type feasible.

From structural simulations, using the finite element method together with the Ansys and Catia software, the model was designed and analyzed in terms of its ability to withstand all efforts to which it will be subjected under conditions of use. The pedal was simulated with cracks on its fixation points and a force of 2000N was applied to the face of the driver's foot, only with the approval in this analysis could the part be manufactured.

The pedal conceived from the casting process, which went through stages, the first being the making of models in 3D printing. In a second moment, using the models, the mold box was cast in sand for casting the molten material and finally filling the boxes with material and obtaining the projected raw piece. Airflow was used in the burner, in one of the foundries, in order to obtain a hotter flame and avoid the presence of slag in the part. This fact also brought about the comparative analysis between the two pieces in terms of post-cast finish.

**Key-words:** Brake pedal. aluminum casting. Structural Simulation.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema freio a disco . . . . .	24
Figura 2 – Formulação do MEF . . . . .	25
Figura 3 – Acabamento superficial . . . . .	27
Figura 4 – Áreas de atuação da manufatura 3D . . . . .	28
Figura 5 – Nomenclatura das regiões de um molde . . . . .	30
Figura 6 – Passos para fabricação de molde em areia. . . . .	31
Figura 7 – Dados referência para concepção de moldes de areia . . . . .	31
Figura 8 – Vista em corte e principais áreas de um forno de cadinho . . . . .	32
Figura 9 – Principais materiais fundidos . . . . .	33
Figura 10 – Projeto CAD do pedal de freio . . . . .	35
Figura 11 – Região de aplicação da força . . . . .	36
Figura 12 – Região de engaste . . . . .	36
Figura 13 – Propriedades da Liga de alumínio aplicada na simulação . . . . .	37
Figura 14 – Modelos projetados em CAD . . . . .	37
Figura 15 – Modelos impressos e preparados para moldagem da caixa . . . . .	38
Figura 16 – Caixa de fundição moldada com auxílio dos modelos . . . . .	39
Figura 17 – Modelo e Peça fundida em escala . . . . .	40
Figura 18 – Forno de fundição alimentado a gás GLP . . . . .	41
Figura 19 – Lingotes de alumínio . . . . .	42
Figura 20 – Cadinho com alumínio fundido . . . . .	43
Figura 21 – Tensões de Von Mises obtidas . . . . .	45
Figura 22 – Deformações obtidas . . . . .	46
Figura 23 – Qualidade de malha da simulação . . . . .	46
Figura 24 – Distribuição dos elementos por tamanho . . . . .	47
Figura 25 – Pedais fundidos em alumínio . . . . .	47



# Lista de abreviaturas e siglas

MEF	Método dos elementos finitos
SAE	Society of Automotive Engineers
FSAE	fórmula SAE
3D	Tridimensional
FGR	Fórmula Gama Racing
CAD	Computer Aided Design
STL	Stereolithography file Format
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
N	Newton
MPa	Megapascal
mm	Milímetro



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>MOTIVAÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
1.2.1	Gerais	22
1.2.2	Específicos	22
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Freio</b>	<b>23</b>
2.1.1	Projeto do pedal e sistema de freio para veículos FSAE	23
2.1.2	Requisito de regulamento	24
<b>2.2</b>	<b>Método dos elementos finitos-MEF</b>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Impressão Tridimensional</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Fundição</b>	<b>28</b>
2.4.1	Processo de fundição	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Simulação estrutural</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Fundição</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusão</b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>Estudos propostos</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>53</b>



# 1 Introdução

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A SAE Brasil promove, para os estudantes de engenharia, um evento de projeto denominado de Fórmula SAE. O estudante tem o desafio de projetar, fabricar e validar um veículo do tipo fórmula para competir no evento. Neste processo são adquiridos experiência prática de projeto e visibilidade com grandes empresas do setor automobilístico.

A competição exige a demonstração de desempenho do projeto em uma série de eventos avaliativos (SAE, 2019), primeiramente a fim de garantir a segurança de todos os envolvidos no evento e posteriormente o desempenho das equipes na capacidade de promover inovações, desempenho e robustez ao projeto. O papel do sistema de freio na segurança é primordial uma vez que o mesmo é responsável por levar o carro a inércia quando encontra-se em regime dinâmico.

Projetos estruturais não podem ter nenhum tipo de falha catastrófica, uma vez que seu papel dentro de um sistema é vital. O pedal de freio tem a função de acionar o sistema de freio de um veículo. A sua parte estrutural deve estar bem projetada e sem nenhuma desconformidade. Uma falha desse componente acarretará falha na frenagem do veículo, fato esse muito preocupante, pois o freio normalmente se faz necessário em momentos de emergência.

Uma forma de garantir a função estrutural do pedal é utilizar-se de simulações estruturais que preveem todos os tipos de não conformidades e os limites do projeto no âmbito estrutural. Cálculos estruturais são a base para as simulações estruturais, porém estes quando aplicados a projetos de geometrias mais elaboradas são complexos de serem realizados. A utilização de métodos numéricos contornam este problema, destacando-se o método dos elementos finitos.

A manufatura de fundição é um processo de fabricação bastante utilizado ao longo do tempo, normalmente é um processo mais simples, em termos de tecnologias empregadas e conseqüentemente um processo mais barato de se usar. Para geometrias mais complexas é uma técnica bastante empregada uma vez que o material fundido, em estado líquido, se molda a forma desejada. A fundição é empregada a materiais ferrosos e não ferrosos, dessa forma mais amplamente aplicável a projetos.

O presente trabalho busca projetar e fabricar um pedal de freio que atenda a necessidade da equipe FGR. Um projeto pioneiro dentro da equipe que irá contribuir bastante no desenvolvimento do projeto tanto pelo fato econômico, como também na utilização de materiais mais leves, neste caso alumínio, que traz maior competitividade

para equipe, uma vez que o fator peso potência é melhorado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Gerais

Este trabalho é dedicado a concepção do pedal de freio em alumínio reciclado, para o protótipo E-04 da equipe de competição FGR da Universidade de Brasília - faculdade Gama (UnB-FGA). O enfoque é projetar e conceber o pedal em alumínio reciclado por meio do processo de fundição e garantir que o mesmo vá atender os requisitos impostos pelo regulamento da FSAE 2020.

### 1.2.2 Específicos

- Compreender os requisitos do regulamento FSAE e compreender as necessidades do projeto E-04 da equipe FGR.
- Projetar de forma que atenda os requisitos e necessidades apuradas, por intermédio do *software* Catia, o pedal de freio e os modelos para viabilizar o processo de fabricação.
- Analisar a capacidade do projeto através de simulação numérica estrutural sob a ótica de trabalho do componente
- Fabricar os moldes de fundição e realizar a fundição dos mesmos e seus corpos de provas de forma satisfatória.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Freio

#### 2.1.1 Projeto do pedal e sistema de freio para veículos FSAE

A principal função do sistema de freios de um veículo, seja ele de qualquer natureza, é reduzir a velocidade ou mantê-la e parar o veículo por completo (LIMPERT, 1999). Os principais tipos de freios e mais utilizados são freios a disco e freios a tambor (SANTOS, 2014). Veículo do tipo formula SAE por implicações de regulamento usam majoritariamente freios a disco nas quatro rodas.

Freios a disco, figura 1, são compostos por um disco e pinça de freio. As pinças por sua vez possuem pastilhas com material de fricção e pistões hidráulicos. Após acionado o sistema os pistões hidráulicos comprime as pastilhas de freio contra a superfície do disco, já este está acoplado de maneira solidária ao eixo de tração do veículo e fixado juntamente a manga de eixo do veículo. O ato de comprimir as pastilhas contra a superfície dos discos irá produzir forças contrárias ao movimento do veículo e provocaram a diminuição ou parada do veículo. Durante este processo a energia cinética do automóvel é transformada em energia térmica e dissipada com trocas de calor com ambiente, pois freios a discos são expostos ao meio (SANTOS, 2014).



Figura 1 – Sistema freio a disco

Fonte: (WILWOOD, )

O acionamento do sistema de freio é feito a partir da interação do condutor com o pedal de freio. Uma vez que o pedal se encontra acionado pelo operador o mesmo irá gerar compressão nas linhas hidráulicas de freios e conseqüentemente nos pistões da pinça de freio que vão realizar o trabalho descrito anteriormente (SILVA, 2017). Uma falha no sistema de acionamento dos freios, pedal de freio, pode causar a impossibilidade de operação do sistema de freios e acarretar falhas catastróficas e colocará em risco a integridade do veículo e condutor, dessa forma este componente deve possuir alto nível de confiabilidade.

Garantir a integridade estrutural do pedal de freio é um processo importante na concepção do mesmo. Fazer uso de ferramentas de análises estrutural é necessário para saber o comportamento do mesmo quando aplicado as forças de operação. O uso do método dos elementos Finitos é uma forma de realizar uma avaliação do projeto e qualificar o mesmo como apto ou não para operar com segurança.

### 2.1.2 Requisito de regulamento

O regulamento da fórmula FSAE 2020 solicita do projeto de freios que o pedal de acionamento do sistema de freio deva suporta a aplicação de uma força de magnitude de 2000N e a peça não apresente deformações e nem tensões que supere o a tensão de escoamento do material selecionado para a concepção do mesmo (SAE, 2019)

## 2.2 Método dos elementos finitos-MEF

Análises estruturais para sistemas complexos acaba gerando muita complexidade de cálculos para serem resolvidos, uma forma de contornar essa complexidade é a utilização de métodos numéricos que buscam soluções aproximadas do comportamento da estrutura (SORIANO, 2003). A evolução da computação favoreceu o desenvolvimento do método numérico denominado MEF, para análises computacionais (TAVARES, 1998).

MEF é uma ferramenta matemática computacional utilizada para simular o comportamento de estruturas (SORIANO, 2003). MEF é aplicado não somente a áreas estruturais, mas também a outros tipos de problemas, por exemplo, transferência de calor, mecânica dos fluídos, eletromagnetismo e vibrações mecânicas.

Quando aplicado no âmbito estrutural o MEF busca determinar o estado de tensão e as deformações que a estrutura estará sujeita a partir das condições de contorno iniciais (AZEVEDO, 2003).

O intuito do método é subdividir a peça ou domínio de trabalho em um número finitos de elementos que quando associados entre si formam uma representação aproximada do domínio real trabalhado (GIACCHINI, 2012).

Os locais onde os elementos se interceptam são pontos, chamados de nós ou pontos nodais e esse conjunto de elementos interligados entre si é chamado de malha que fornecerá uma solução aproximada do problema em questão. Realizar um refinamento de malha, implica em variar o tamanho do elemento, o tipo ou número de nós para que a solução encontrada possa convergi para a solução exata (SORIANO, 2003).

Os elementos finitos se apresentam de forma unidimensional, bidimensional e tridimensional podendo variar a sua geometria e de forma específica o número de pontos nodais em suas fronteiras. A depender da solução os pontos nodais podem apresentar números de graus de liberdade diferente.

Para realizar uma simulação numérica por intermédio do MEF, será necessário primeiramente discretizar o domínio da peça em elementos finitos de forma bem similar a peça real e discretizar as condições de contorno da peça (SORIANO, 2003). Esta discretização servirá de inputs para o software proceder a simulação baseado na equação exemplificada na figura 2

$$[K] * \{d\} = \{f\}$$

Figura 2 – Formulação do MEF

Fonte: (SORIANO, 2003)

Onde:

[K] – Matriz de rigidez global

d – Vetor global dos deslocamentos dos nós

f – Vetor global das forças nos pontos nodais.

Dessa forma, o MEF é uma poderosa ferramenta que nos possibilita previamente, por meio de análises numéricas que geram soluções aproximadas das respostas reais, saber se o projeto proposto irá atender as expectativas propostas. Com esta validação a manufatura do projeto é viabilizada em termos econômicos, de tempo e de engenharia, sem que haja desperdícios pelo fato da peça não atender os requisitos de projeto de forma satisfatória e ser necessário o retrabalho da mesma.

## 2.3 Impressão Tridimensional

Impressão 3D ou manufatura aditiva, é o processo de fabricação cujo princípio básico é adicionar material, camada por camada sucessivamente, até obter a forma e dimensões do objeto desejado. Os processos industriais, como usinagem e fresamento, possuem princípios de operação contrário a manufatura aditiva, trabalhando com a retirada de material em busca da forma e dimensões desejadas.

Todas as tecnologias de impressão 3D possuem o mesmo princípio básico de funcionamento (CUNICO, 2015). De forma rápida, corpos tridimensionais são gerados em um único processo (SILVA et al., 2020). A prototipagem, de sólidos tridimensionais com tecnologias tradicionais, costuma ter um tempo elevado de produção principalmente quando as peças possuem formas mais complexas, tendo a necessidade de usar vários tipos de processos para obter peça finalizada.

A manufatura aditiva possui vantagens e desvantagens, em relação a manufatura tradicional, que contribuem para o desenvolvimento de diversas áreas, por exemplo, medicina, engenharia e educação e pesquisa. Como principais vantagens e desvantagens, temos:

Principais vantagens:

- Possibilidade de concepção de peças com geometrias complexas
- Pouco desperdício de matéria prima
- Processo de concepção linear, sem necessidade de trocas de ferramentas ou maquinário
- Fácil mudança de propriedades mecânica das peças
- Rápida prototipagem

- Baixo custo fixo de produção em pequena escala e baixo tempo de produção em peças muito customizadas.

Principais desvantagens:

- O processo de adição de camada por camada ocasiona divergências de propriedades quando comparado peças produzidas por manufatura tradicional, dessa forma as peças impressas possuem certas limitações.
- Acabamento superficial de menor qualidade devido ao efeito escada decorrente do processo de adição camada por camada, como ilustra a figura 3
- Limitado a uso de materiais poliméricos, pois a manufatura de matérias metálicas é de elevado custo de implementação e produção.
- Necessidade de calibração do equipamento constantemente para não haver empenamentos e desvios dimensionais elevados
- Elevado tempo de produção para produções de larga escala.

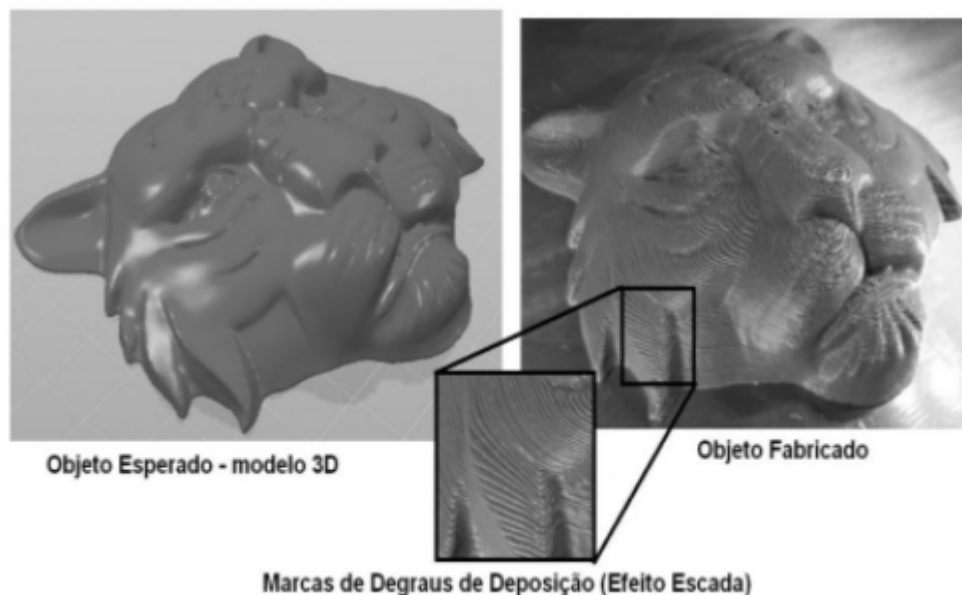


Figura 3 – Acabamento superficial

Fonte: (CUNICO, 2015)

Estas vantagens e desvantagens apresentada por Volpato, são de levar em consideração na concepção de um projeto. A manufatura aditiva é um processo altamente eficaz na concepção de projetos quando levado em consideração seus prós e contras versus as diretrizes de projeto (VOLPATO, 2018).

A manufatura aditiva possui uma gama de atuação grande, estando presente em diversas áreas como ilustra a figura 4 e vem se popularizando cada vez mais com disseminação da tecnologia, principalmente com o advento das impressoras 3D.

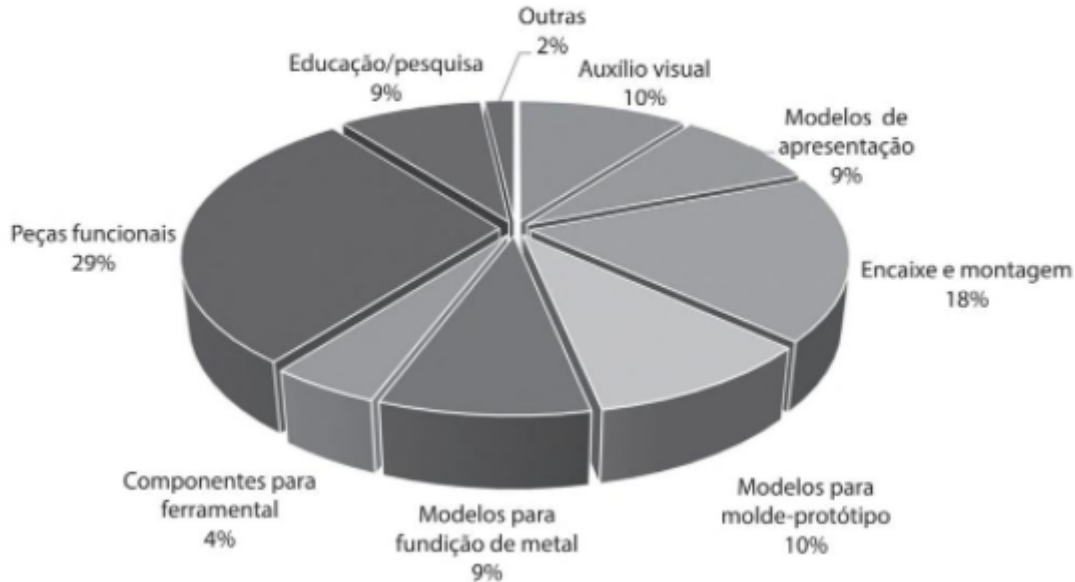


Figura 4 – Áreas de atuação da manufatura 3D

Fonte: (VOLPATO, 2018)

Para Cunico, a concepção de uma peça impressa 3D, de forma simplificada se dá por meio de 5 principais etapas. Modelagem da peça em CAD, criação da malha 3D STL, planejamento de fabricação para criação das camadas, impressão do objeto camada por camada e por fim acabamento do produto (CUNICO, 2015)

O processo de manufatura aditiva é de grande valia para o desenvolvimento de novas tecnologias seja ela no âmbito industrial ou acadêmico devido ao fato da fácil produção de protótipos seja ele para estudos ou projetos industriais que se encontram ainda na fase de desenvolvimento, possibilitando a identificação de problemas e corrigindo os mesmos antes do produto final. Para o processo de fundição a impressão 3D aumentou o poder na concepção de moldes, possibilitando moldes mais complexos com tempo e custos menores.

## 2.4 Fundição

### 2.4.1 Processo de fundição

O princípio básico do processo de fundição é envazar (por gravidade, pressão, centrifugação ou vácuo) um molde, previamente feito com a forma do objeto desejado, com metal líquido e após a solidificação do metal líquido obter uma peça semi-pronta (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)

O processo de fundição possui variações, que são identificadas a partir do modo que o molde foi confeccionado. De maneira geral existem dois tipos de moldes, destrutível e permanente. Em ambos os casos o molde será envazado e somente após a solidificação do material fundido que serão abertos (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)

Os moldes permanentes são projetados para serem fabricados por processos de usinagem que irá conceber a forma desejada do produto fundido. O envasamento do material fundido e disponibilizado no molde e após a solidificação do mesmo a peça é retirada e reutilizado o molde.

Os moldes destrutíveis são feitos com areia. Onde a moldagem da areia ocorre em torno de um modelo com a forma desejada para obter a peça fundida. Este modelo deixará uma cavidade na areia compactada, por sua vez esta cavidade será preenchida com o material fundido e dará origem a peça desejada. Para ter acesso a peça fundida é necessário romper, normalmente com impacto, toda areia compactada.

Os modelos para a fabricação de moldes de areia são usualmente feitos de forma bipartida, dessa forma o molde irá ter duas partes que quando combinados formam um molde completo. O fato de existir duas partes trás ao processo certos cuidados para o fechamento do molde, pois a geometrias das cavidades precisam estar combinadas entre si, caso não esteja após o envasamento do material teremos um objeto com forma indesejada (CASOTTI; FILHO; CASTRO, )

A fabricação de moldes para peças que possuem cavidade internas em sua forma é necessário o uso de machos. Esse por sua vez são moldados em areia na forma desejada para a cavidade. O intuito do macho é não permite que o material fundido preencha a parte onde ele está alocado e após a solidificação é necessário somente romper o macho, uma vez que este é feito de areia, e dessa forma teremos a cavidade desejada.

A cavidade obtida após a moldagem, possui várias regiões que são identificadas na figura 5:

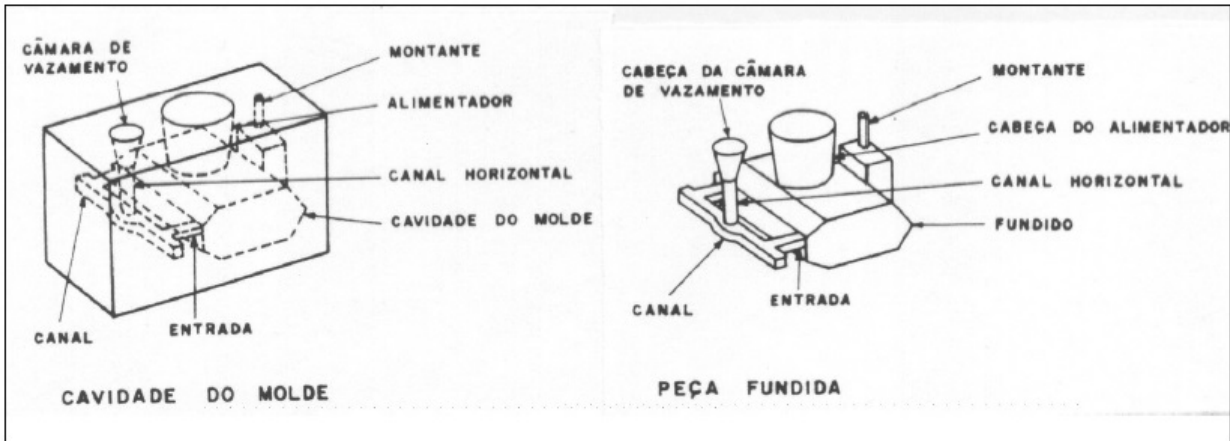


Figura 5 – Nomenclatura das regiões de um molde

Fonte: (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)

Entre as principais regiões identificadas estão os canais, que são zonas por onde o material fundido irá percorrer para alimentar a cavidade formando a peça. Os montantes, ou também chamados de massalotes pela literatura, que possuem a função de acumular material para garantir o total preenchimento do molde e reter temperatura para que o material da cavidade não resfrie tão rapidamente e apareça o fenômeno de encruamento na peça tirando a sua precisão dimensional.

O processo de fundição, com moldagem em areia são considerados moldes simples e seu processo de fabricação etapa por etapa é descrito na figura 6 (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)



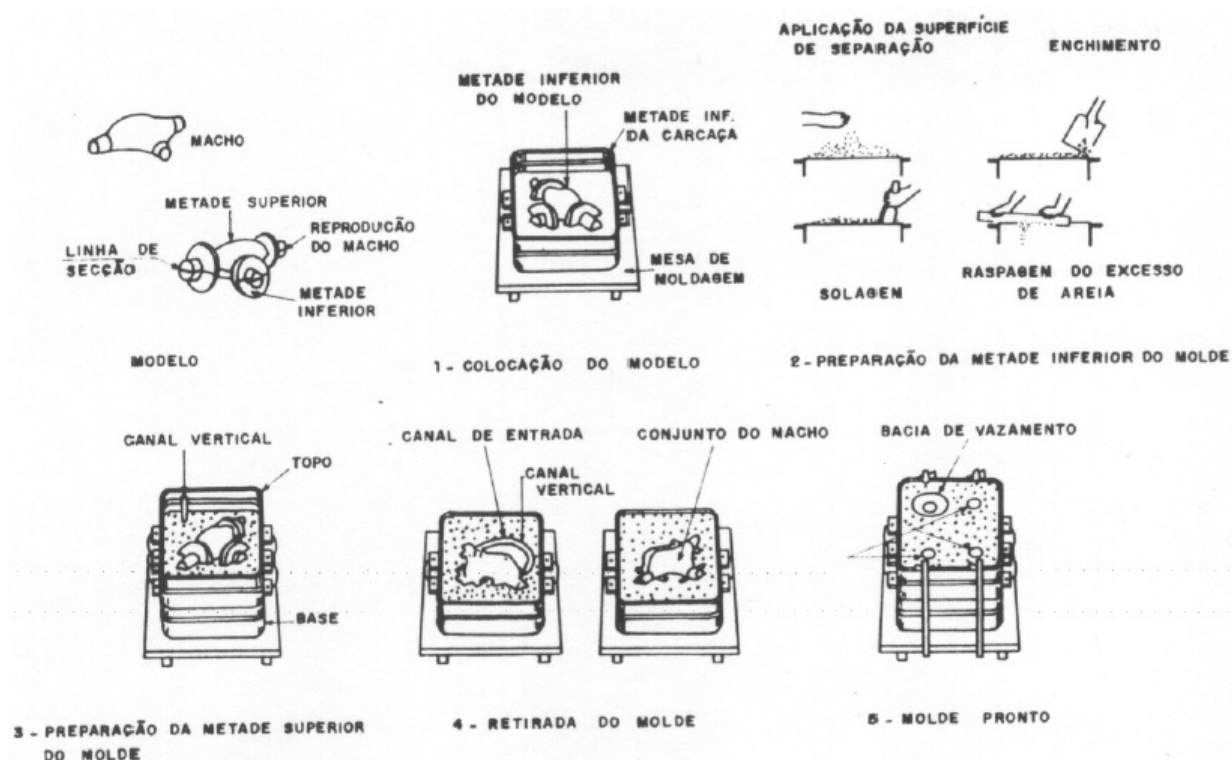


Figura 6 – Passos para fabricação de molde em areia.

Fonte: (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)

A fundição em areia é muito vantajosa em termos de complexidade de processo, fatores econômicos e sua versatilidade com as dimensões das peças a serem fundidas. E após o processo a areia pode ser aproveitada em modelagens futuras (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)

Apesar de muitas vantagens, o processo de fundição em areia possui aspectos que devem ser considerados para que ocorra êxito no trabalho. Este processo de moldagem carrega consigo um baixo poder de acabamento e precisão dimensional conforme ilustra a figura 7

Processo de Fundição	Metal ou Liga Utilizada	Limite Normal de Peso (kg)	Seção mais Fina da Peça (mm)	Acabamento Superficial ( $\mu\text{m}$ )	Tolerância Dimensional numa Dimensão de x (mm)
Moldagem em areia	Aço	0,1 - 200.000	6	8	0,005x a 0,03x
	Ferro Fundido	0,03 - 50.000	3,5	8	
	Alumínio	0,03 - 100	3	4	

Figura 7 – Dados referência para concepção de moldes de areia

Fonte: (AGOSTINHO; CASTRO; BUTON, 2012)

Nota-se que a depender do material a ser fundido temos uma variação na espessura mínima que o molde poderá ter e no peso máximo final da peça.

Para transformar o material sólido em material líquido, para envasamento dos

moldes, o processo de fundição necessita de grandes quantidades de energia. Este processo é em suma maioria realizado com a auxílio de fornos de calor. Existe vários tipos de fornos de fundição, porém os mais utilizados em fundições de pequeno porte são os fornos de cadinho alimentados por gás GLP (MATTE et al., 2018). Um esquemático desse forno é apresentado na figura 8

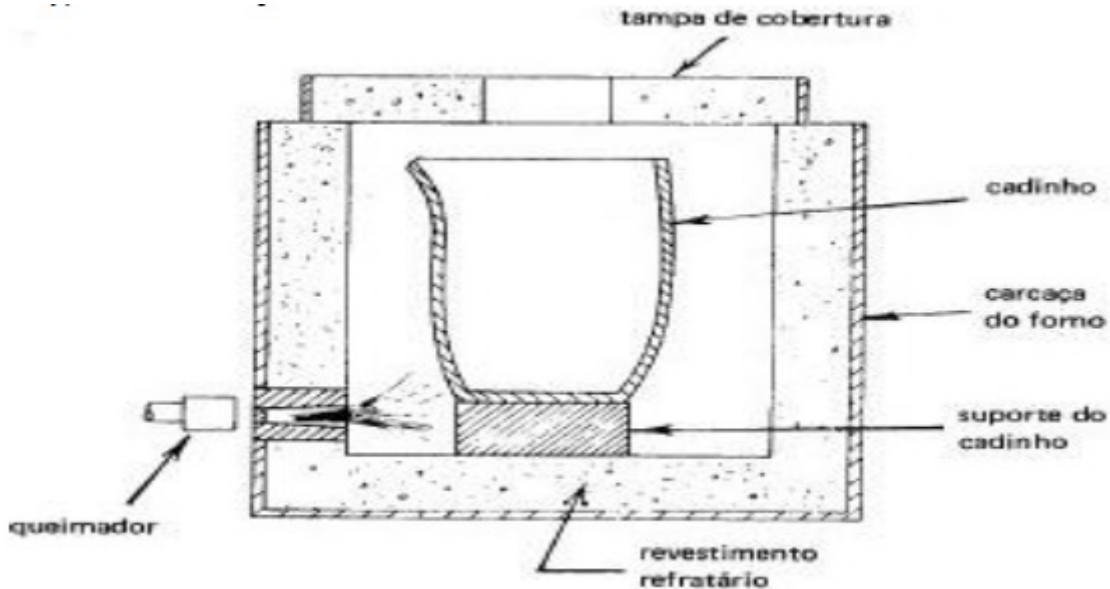


Figura 8 – Vista em corte e principais áreas de um forno de cadinho

Fonte: (MATTE et al., 2018)

O queimador é responsável por disponibilizar calor ao cadinho que por sua vez transfere para o material provocando a fusão do material. Para conceder mais calor ao forno pode-se usar queimadores com diferentes perfis de chamas ou adicionar algum fluxo de ar ao mesmo a fim de disponibilizar mais oxigênio a chama e produzir uma chama mais quente e também uma melhor e mais homogênea distribuição do calor ao redor do cadinho (MATTE et al., 2018)

Os materiais fundidos podem ser classificados, conforme a figura 9.

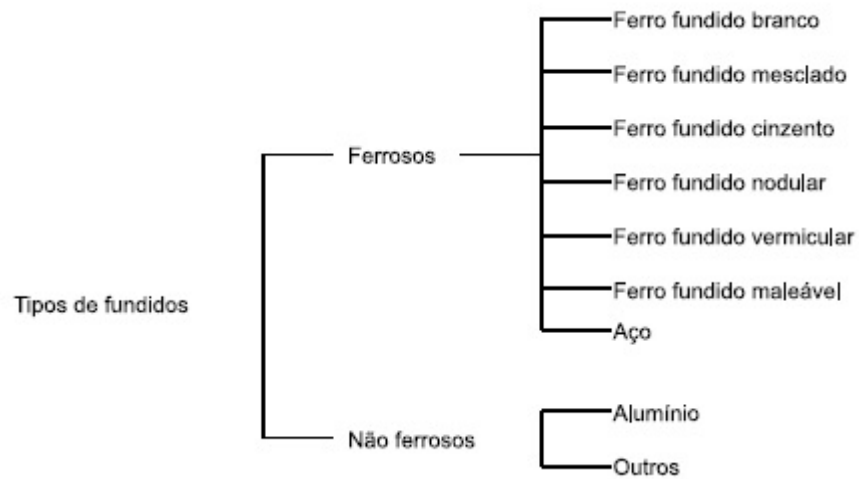


Figura 9 – Principais materiais fundidos

Fonte: (CASOTTI; FILHO; CASTRO, )

O alumínio possui maior relevância entre os materiais não ferrosos, devido a sua menor temperatura de fusão o que possibilita fornos com menor poder aquecimento apto para este processo.



## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Metodologia

A inspiração para desenvolvimento se deu a partir de uma demanda da equipe FGR, onde após dimensionamento do sistema de freios era necessário fabricar o pedal de freio, responsável pela atuação do sistema, porém com baixo investimento monetário. A proposta então foi desenvolver o pedal por fundição e com alumínio reciclado a fim de reduzir os custos de fabricação e que atendesse os requisitos de regulamento da FSAE.

O primeiro passo foi realizar o projeto mecânico por meio da ferramenta CAD, por intermédio do *software* Catia V5, de tal forma que atendesse as dimensões necessárias para que ocorresse a multiplicação da força exercida no pedal, através do braço de alavanca, e capaz de alimentar com força correta o sistema de freios e provocar a frenagem desejada. O projeto está representado na figura 10

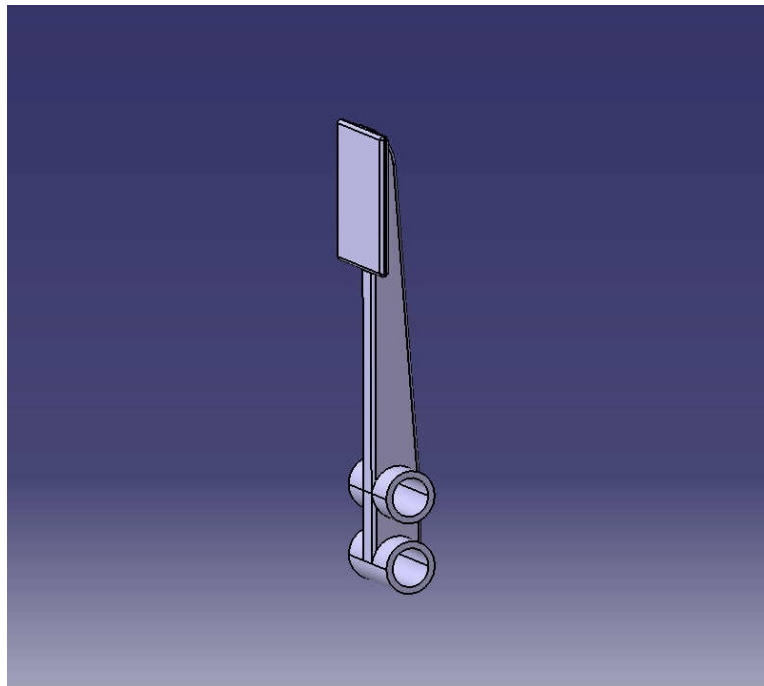


Figura 10 – Projeto CAD do pedal de freio

Dando sequência, o projeto CAD foi submetido a uma análise estrutural, pelo método dos elementos finitos, para validar o projeto mecânico conforme a exigência do regulamento da FSAE. O pedal deveria suportar uma aplicação de força de 2000N na região em vermelho da figura 11 sem que ocorresse falha com o mesmo. Uma vez a peça engastada nas regiões destacadas em roxo na figura 12

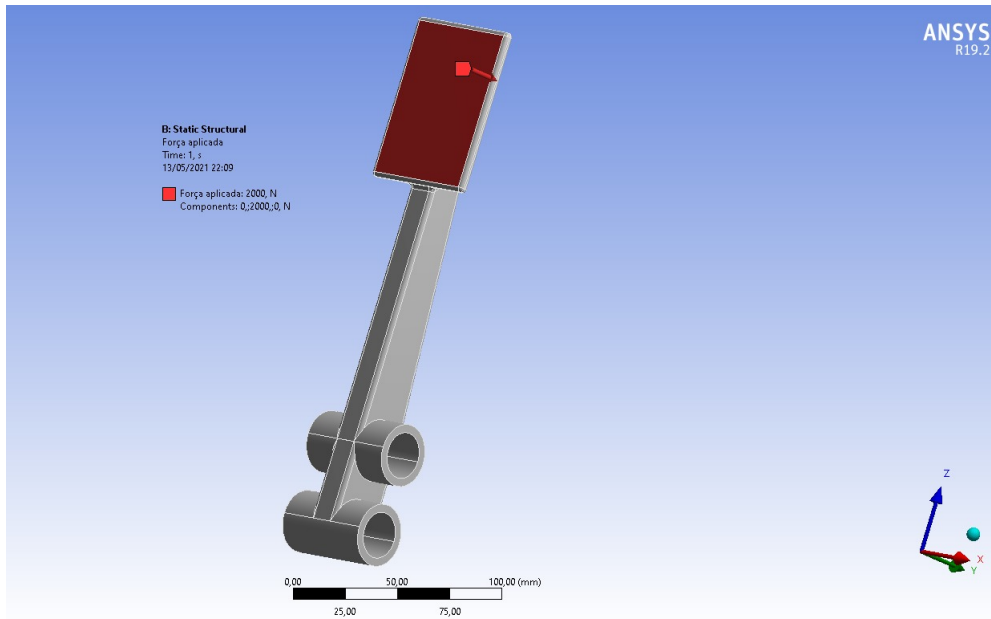


Figura 11 – Região de aplicação da força

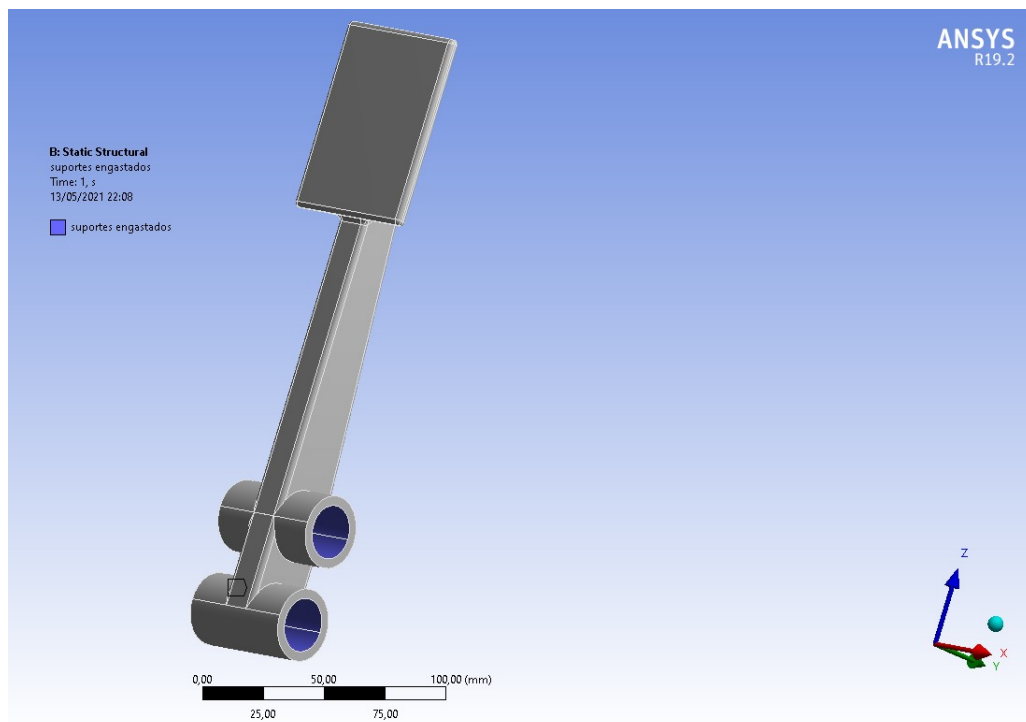


Figura 12 – Região de engaste

O material usado para simulação do projeto foi escolhido na biblioteca do *software* Ansys e estão descritos a seguir na figura13

Properties of Outline Row: Aluminum Alloy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2770	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	S-N Curve	Tabular		
16	Tensile Yield Strength	2,8E+08	Pa	
17	Compressive Yield Strength	2,8E+08	Pa	
18	Tensile Ultimate Strength	3,1E+08	Pa	
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	
20	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular		
23	Specific Heat, C <sub>p</sub>	875	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	
24	Isotropic Relative Permeability	1		
25	Isotropic Resistivity	Tabular		

Figura 13 – Propriedades da Liga de alumínio aplicada na simulação

Uma vez com o pedal validado estruturalmente, iniciou-se a etapa de confecção dos modelos, figura 14, para produzir as caixas moldes de envasamento do material fundido, foi levando em consideração as margens para usinagens de acabamento, o adoçamento de cantos vivos para um melhor desmolde e emprego de alimentadores que também tem a função de massalotes que retêm o calor e evita um resfriamento acelerado e surgimentos de zonas com rechupe na peça comprometendo a mesma.

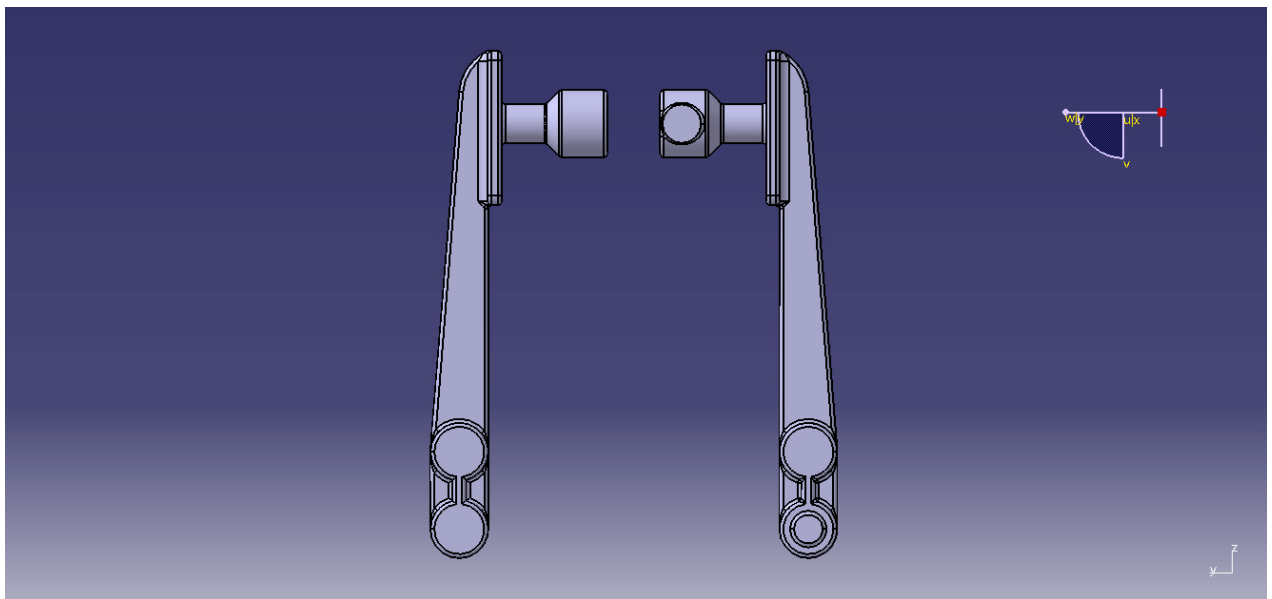


Figura 14 – Modelos projetados em CAD

Os modelos foram confeccionados em impressão 3D, devido a facilidade que o processo proporciona em conceber geometrias complexas do molde e também a rapidez e o menor custo de fabricação, pós impressão o molde passou por tratamento de superfície com aplicação de tinta para plástico, figura 15, tinta esta mais escura e capaz de dar um melhor acabamento superficial e uma proporcionar uma melhor desmoldagem da caixa de fundição.

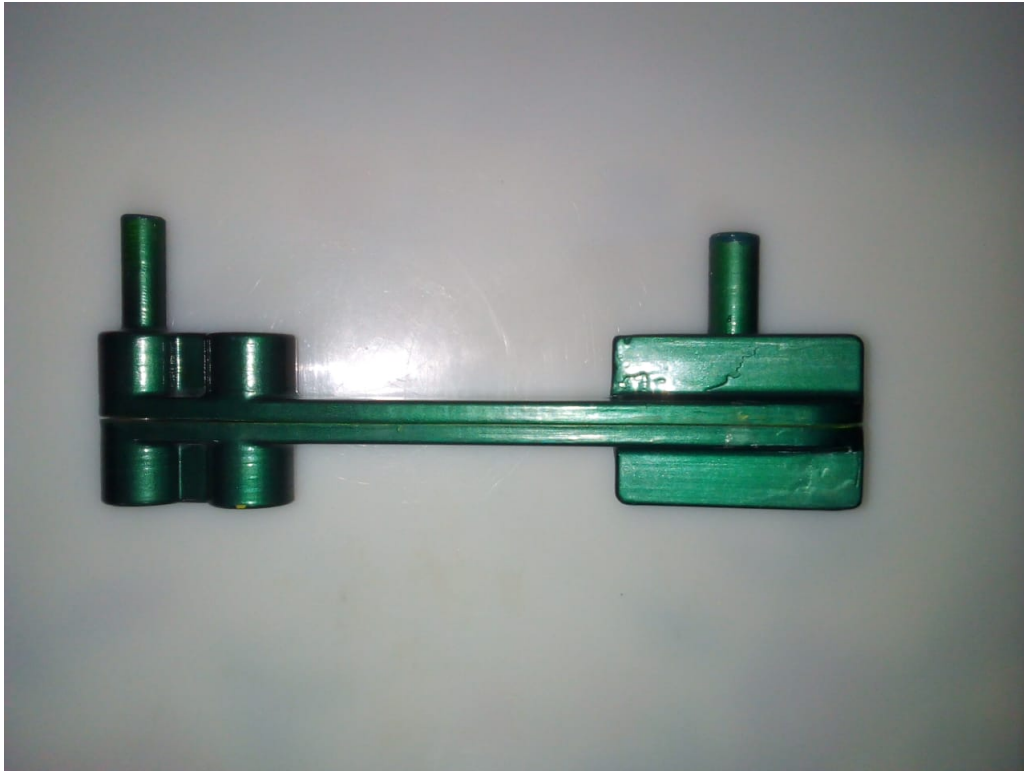


Figura 15 – Modelos impressos e preparados para moldagem da caixa

Com os modelos preparados, utilizou-se deles para fabricar o molde de areia, figura 16. Os modelos foram posicionados de maneira que suas geometrias estivessem em compatibilidade e gerasse o sólido desejado.





Figura 16 – Caixa de fundição moldada com auxílio dos modelos

Vale ressaltar que antes da fundição da peça, foi gerado um modelo em escala, para verificar o desempenho dos moldes em gerar o produto desejado. O teste teve total sucesso como demonstrado na figura 17, e dessa maneira foi realizada a fundição do pedal em tamanho real



Figura 17 – Modelo e Peça fundida em escala

A fundição foi realizada com o uso de um forno de cadinho alimentado por gás GLP, figura18



Figura 18 – Forno de fundição alimentado a gás GLP

O alumínio usado no processo estava na forma de lingotes e foram depositados no cadinho dentro do forno para que ocorresse a fusão mesmo e pudesse envasar os moldes, figuras 19 e 20.



Figura 19 – Lingotes de alumínio



Figura 20 – Cadinho com alumínio fundido

O processo foi realizado duas vezes, com variação na alimentação de calor. No primeiro foi apenas utilizado o queimador e na segunda fundição foi utilizado ar comprimido junto ao alimentador para melhorar a distribuição de calor e dessa forma eliminar escórias do material.

Junto ao processo também foram fundidos corpos de prova para futuras análise das características e propriedades do material.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Simulação estrutural

Com as condições de contornos descritas anteriormente o pedal simulado estruturalmente apresentou os seguintes resultados. Tensão última de tração máxima de 171,09 MPa e deformação máxima de 2,71mm, melhor evidenciado nas figuras 21 e 22

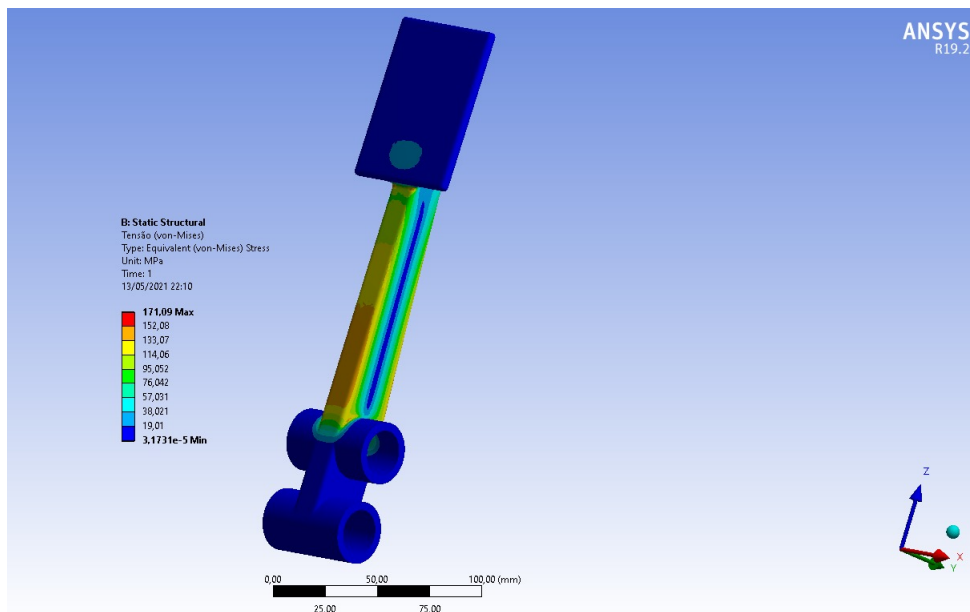


Figura 21 – Tensões de Von Mises obtidas

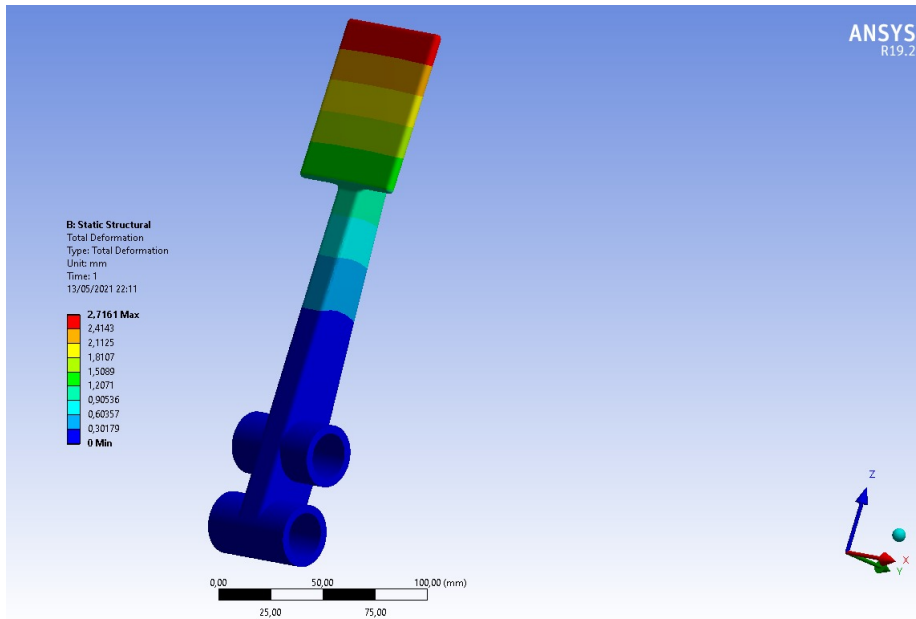


Figura 22 – Deformações obtidas

O fator de segurança do projeto foi de 1.61, dado pela razão da tensão de escoamento do material, figura 13, e tensão última encontrada na simulação. Dessa forma o pedal suportará as condições requeridas por regulamento e está apto a ser utilizado na FSAE.

A figura 23 apresenta a malha gerada para simulação com qualidade mínima de elemento de 0.14, porém grande parte dos elementos tiveram métrica de elementos acima de 0.6, como evidência a figura 24. Dessa maneira os resultados obtidos a partir da simulação são próximos dos resultados reais de projeto e confiáveis.

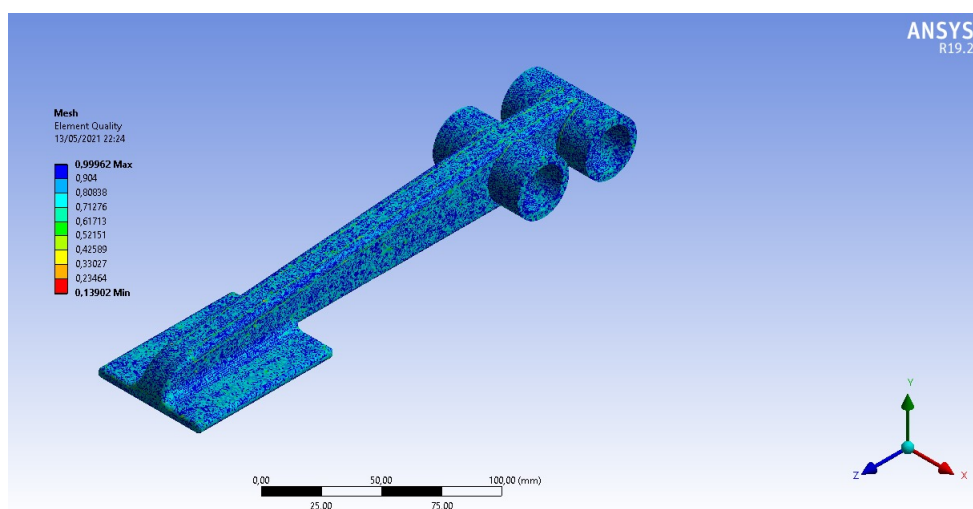


Figura 23 – Qualidade de malha da simulação



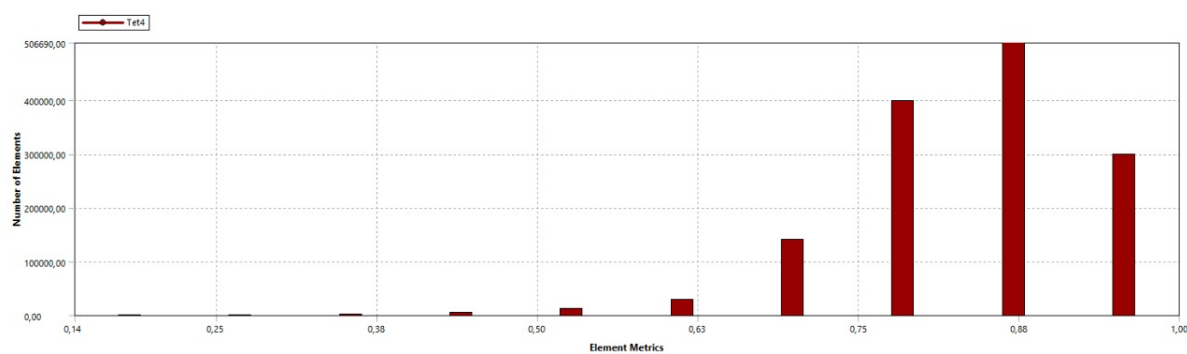


Figura 24 – Distribuição dos elementos por tamanho

## 4.2 Fundição

Ambos os processos de fundição obtiveram bons resultados em uma análise visual, não apresentando nenhuma não conformidade ou resultados inesperados, como presença de zonas de rechupe ou partes com escória na peça fundida. Figura 25



Figura 25 – Pedais fundidos em alumínio

A título de comparação o pedal fundido apresentado na figura 25 e o modelo apresentado na figura 15 são similares.

# 5 CONCLUSÃO

## 5.1 Conclusão

O pedal de freio possui grande importância no acionamento do sistema de freios de um veículo. A geometria do mesmo é responsável por multiplicar a força exercida pelo condutor e proporcionar um maior poder de frenagem. Porém o mesmo deve ser confiável estruturalmente, pois uma falha nesse sentido leva uma falha catastrófica no sistema de freio uma vez que o mesmo não possui maneiras de ser utilizado.

No âmbito acadêmico existem várias formas de estimular o desenvolvimento do aluno, uma forma prática de realizar esse desenvolvimento proposto pela SAE foi a criação da FSAE uma competição de engenharia entre as universidades do país. O intuito é desenvolver um veículo do tipo fórmula, nesse desenvolvimento é necessário projetar o sistema de freio do veículo com base nos critérios impostos pela organização do evento. Para o pedal de freio é requerido que o mesmo suporte à aplicação de uma força de 2000N e não sofra nenhuma falha.

Para garantir o cumprimento das exigências da FSAE o pedal de freio foi simulado estruturalmente no *software* Ansys. Com o material, alumínio, aplicado ao projeto o pedal apresentou resultados satisfatórios que conseguiria a aprovação da banca avaliadora do evento.

A fabricação do projeto foi realizada em alumínio reciclado para diminuir custos de produção e conseqüentemente peso do veículo, uma vez que o alumínio possui um menor peso quando comparado com ligas de aço, o mais comumente de ser usado. Os principais desafios do processo de fundição é conseguir uma peça de qualidade sem furos ou presença de escória em seu corpo, fatos estes conseguidos no desenvolvimento do estudo.

Os objetivos do estudo foram compreendidos e alcançados ao longo do desenvolvimento. Obtendo ao final uma peça apta para passar por demais processos de finalização e está apta para compor o veículo E-04 da equipe FGR.

## 5.2 Estudos propostos

Devido ao período pandêmico, não foi possível realizar a caracterização mecânica do material aplicado a fundição. Dessa forma proponha-se a realização de tais ensaios e proceder uma análise se o mesmo irá atender os requisitos de projeto. Como parâmetro para análise dos resultados da caracterização deve-se obter resultados próximos com as propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizada para simulação.



# Referências

- AGOSTINHO, O. L.; CASTRO, R.; BUTON, S. T. Processos de fabricação e planejamento de processos. Faculdade de engenharia mecânico da Universidade Estadual de Campinas, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 30 e 31.
- AZEVEDO Álvaro F. M. Método dos elementos finitos. Faculdade de Engenharia da universidade do Porto Portugal, 2003. Disponível em: <<http://www.fe.up.pt/~alvaro>>. Citado na página 25.
- CASOTTI, B. P.; FILHO, E. D. B.; CASTRO, P. C. de. *Industria de fundição: situação atual e perspectivas*. [S.l.: s.n.]. 121-162 p. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 33.
- CUNICO, M. W. M. *Impressora 3D: O novo meio produtivo*. [S.l.: s.n.], 2015. 150 p. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- GIACCHINI, B. L. Uma breve introdução ao método dos elementos finitos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Citado na página 25.
- LIMPERT, R. *Brake Design and Safety*. [S.l.: s.n.], 1999. 525 p. Citado na página 23.
- MATTE, C. R. et al. Análise e otimização de um pequeno forno de fundição. 2018. Citado na página 32.
- SANTOS, G. C. M. dos. Projeto e dimensionamento de um sistema de freios aplicado a um veículo fórmula sae. Rio de Janeiro, Brasil, p. 114, 2014. Citado na página 23.
- SILVA, P. C. et al. Impressão 3d: Um guia prático. 2020. Disponível em: <DOI: [10.34117/bjdv6n11-021](https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-021)>. Citado na página 26.
- SILVA, P. H. M. da. Análise do sistema de freio de um veículo de competição fórmula sae. Joinville, Brasil, p. 87, 2017. Citado na página 24.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. *Rules 2020: Technical aspects*. Rio de Janeiro, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.
- SORIANO, S. d. S. L. H. L. Método de elemntos finitos em análise de estruturas. In: . [S.l.: s.n.], 2003. v. 1. Citado na página 25.
- TAVARES, J. M. R. S. Introdução ao método dos elementos finitos. Instituto de Engenharia Biomédica - INEB, 1998. Citado na página 25.
- VOLPATO, N. *Manufatura aditiva tecnologia e aplicações da impressão 3D*. [S.l.: s.n.], 2018. 400 p. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- WILWOOD. *Sistema de freio a disco*. <[https://www.wilwood.com/BrakeKits/BrakeKitLandingmonth={Maio},year={2021},note={\(Accessedon15/05/2021\)}](https://www.wilwood.com/BrakeKits/BrakeKitLandingmonth={Maio},year={2021},note={(Accessedon15/05/2021)})>. Citado na página 24.



# Apêndices





