

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

ALINE RABELO ANTUNES  
EMILLY RAIANE RODRIGUES  
NICOLE LEMONS DE VASCONCELOS

**Elaboração de um KIT Didático de Minifoguetes de Baixo Custo**

Santa Maria

2021

ALINE RABELO ANTUNES  
EMILLY RAIANE RODRIGUES  
NICOLE LEMONS DE VASCONCELOS

**Elaboração de um KIT Didático de Minifoguetes de Baixo Custo**

Trabalho apresentado ao Centro de Tecnologia do Universidade Federal de Santa Maria para a disciplina de CPIO I.

Área de concentração: Foguetemodelismo

Orientador: Prof. PhD. João Martos

Santa Maria

2021

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a montagem de um KIT didático para minifoguetes de baixo custo para a divulgação das ciências espaciais aos estudantes de escolas públicas. Isso será realizado através do ensino de conceitos básicos de foguetemodelismo, como aerodinâmica e caracterização de motores, e por fim, a construção de um minifoguete. Pensando nas condições financeiras das instituições públicas e de seus integrantes, a metodologia a ser aplicada foi planejada a abranger materiais de fácil acesso e econômicos.

Palavras-chaves: Foguetemodelismo; Baixo custo; Minifoguete; Espaço modelo.

## **Abstract**

The present study aims to build a low cost KIT for model rockets for the dissemination of space sciences to public school students. This will be achieved through the teaching of basic concepts of rocket modeling, such as aerodynamics and engine characterization, and finally, the construction of a model rocket. Thinking about the financial conditions of public institutions and their members, the methodology to be applied was planned to cover easily accessible and economical materials.

Keywords: Rocketry. Low cost. Model rocket. Space model.

## Lista de figuras

Figura 1 – Estrutura Organizacional de Projeto . . . . .	15
Figura 2 – Força exercida pelo ar sobre a bexiga. . . . .	17
Figura 3 – Experimento Teleférico de Newton. . . . .	17
Figura 4 – Diferença de Pressão na Câmara de Combustão . . . . .	18
Figura 5 – Exemplo momento linear . . . . .	19
Figura 6 – Diferenças entre Motor-Foguete a Propelente Líquido e Sólido . . . . .	20
Figura 7 – Componentes do motor-foguete de espaçomodelo . . . . .	21
Figura 8 – Pressão Exercida pelos Gases . . . . .	22
Figura 9 – Relação do Consumo de Massa com Empuxo . . . . .	24
Figura 10 – Curva de empuxo típica de um motor-foguete de um espaçomodelo. . . . .	25
Figura 11 – Ilustração dos pontos de interesse do gráfico Impulso x Tempo. . . . .	25
Figura 12 – Grão propelente com e sem cavidade central . . . . .	27
Figura 13 – Arrasto de Forma . . . . .	29
Figura 14 – Arrasto de Fricção . . . . .	30
Figura 15 – Arrasto de Base . . . . .	30
Figura 16 – Arrasto Induzido . . . . .	31
Figura 17 – Arrasto de Interferência . . . . .	31
Figura 18 – Forças de Arrasto atuantes em um Minifoguete . . . . .	32
Figura 19 – Nariz elíptico . . . . .	34
Figura 20 – Espaçomodelo Sondinha II em sua rampa de lançamento . . . . .	35
Figura 21 – Direção de voo de um MF . . . . .	36
Figura 22 – Afilamento . . . . .	38
Figura 23 – As principais fases do trajeto de voo. . . . .	39
Figura 24 – Vista lateral entre o observador e o apogeu do minifoguete. . . . .	41
Figura 25 – Vista lateral entre o observador e o apogeu do minifoguete. . . . .	42
Figura 26 – Variáveis envolvidas na análise de voo. . . . .	44
Figura 27 – Embalagem Apito de Vara . . . . .	46
Figura 28 – Curva de Empuxo Motor CA-11. . . . .	47

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos motores. . . . .	28
Tabela 2 – Resultados Testes Estáticos Motor 1/2A0.5 – 0 . . . . .	46

## Lista de abreviaturas e siglas

AEB	Agência Espacial Brasileira
CG	Centro de Gravidade
CM	Centro de Massa
CP	Centro de Pressão
EM	Espaçomodelos
MF	Minifoguetes
MOBFOG	Mostra Brasileira de Foguetes
NAR	<i>National Association of Rocketry</i>
SAB	Sociedade Astronômica Brasileira

## Lista de símbolos

$g$	Aceleração da Gravidade
$H$	Apogeu
$A$	Área de referência
$A_s$	Área de saída do bocal
$C_D$	Coefficiente de Arrasto
$R$	Constante específica do gás
$\overline{LI}$	Distância entre a plataforma de lançamento e o ponto de impacto após a queda do MF
$\overline{OL}$	Distância entre o observador e a plataforma de lançamento
$E_{max}$	Empuxo Máximo
$E_{med}$	Empuxo Médio
$f_m$	Fluxo de Massa
$D$	Força de Arrasto
$E$	Força de Empuxo
$I_s$	Impulso Específico
$I_t$	Impulso Total
$m$	Massa de uma Partícula
$\rho$	Massa específica do ar
$M_p$	Massa Total Inicial do Propelente
$m_p$	Massa variável do propelente
$P$	Pressão exercida por um gás
$P_{ext}$	Pressão externa

$P_{int}$	Pressão interna
$Q$	Quantidade de movimento
$T$	Temperatura do gás
$t_q$	Tempo de Queima do Propelente
$t_H$	Tempo de voo cronometrado entre a decolagem e o apogeu
$t_I$	Tempo de voo entre a decolagem e o impacto
$V$	Velocidade
$v_q$	Velocidade da queima do propelente
$v_e$	Velocidade de ejeção dos gases
$c$	Velocidade Média de ejeção dos gases
$\gamma$	ângulo entre $\overline{LN}$ e $\overline{LO}$
$\lambda$	ângulo entre $\overline{LN}$ e $\overline{LI}$
$\beta$	$= 180^\circ + \gamma - \lambda$
$\theta$	ângulo lateral entre o observador e o apogeu (Fig. 24)

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos e justificativas</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1	<i>Gerais</i> . . . . .	13
2.2	<i>Específicos</i> . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Metodologia</b> . . . . .	<b>14</b>
3.1	<i>Restrições de projeto</i> . . . . .	14
3.2	<i>Gestão de projeto</i> . . . . .	15
3.3	<i>Especificação dos materiais</i> . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Conceitos Fundamentais</b> . . . . .	<b>16</b>
4.1	<i>Como os Foguetes Funcionam</i> . . . . .	16
4.1.1	Classificações dos Minifoguetes . . . . .	19
4.2	<i>Motor-Foguete</i> . . . . .	19
4.2.1	Componentes do Motor-Foguete . . . . .	21
4.2.2	Funcionamento do Motor-Foguete a Propelente Sólido . . . . .	22
4.2.3	Empuxo . . . . .	23
4.2.4	Curva de Empuxo . . . . .	24
4.2.5	Parâmetros da Curva de Empuxo . . . . .	25
4.2.6	Grão Propelente . . . . .	26
4.2.7	Classificação dos Motores . . . . .	27
4.3	<i>Aerodinâmica de Foguetemodelos</i> . . . . .	28
4.3.1	Arrasto Aerodinâmico . . . . .	29
4.3.2	Fatores que afetam o $C_D$ . . . . .	32
4.3.3	Sustentação . . . . .	33
4.3.4	Efeito Aerodinâmico dos Modelos do Nariz . . . . .	33
4.3.5	Diâmetro do Tubo-Foguete . . . . .	34
4.3.6	Tubo Guia . . . . .	34
4.4	<i>Estabilidade de Foguetemodelos</i> . . . . .	35
4.4.1	Efeito do vento e da variação . . . . .	36

4.4.2	Geometrias de Empenas . . . . .	37
4.5	<i>Trajatória de Foguetemodelos</i> . . . . .	39
4.5.1	Fases do Voo . . . . .	39
4.6	<i>Análise de Voo de Foguetemodelos</i> . . . . .	40
4.6.1	Método Ideal 1 . . . . .	40
4.6.2	Método Ideal 1 . . . . .	41
4.6.3	Método A . . . . .	41
4.6.4	Método B . . . . .	42
4.6.5	Método C . . . . .	43
4.6.6	Medições dos Lançamentos . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Concepção do kit</b> . . . . .	<b>45</b>
5.1	<i>Custo de Produção</i> . . . . .	45
5.2	<i>Caracterização do Motor</i> . . . . .	45
5.3	<i>Etapas de Montagem</i> . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Conclusão</b> . . . . .	<b>48</b>
	<b>Referências<sup>1</sup></b> . . . . .	<b>49</b>
	<b>Anexo A – Elaboração do kit</b> . . . . .	<b>50</b>
	<b>Anexo B – Desenhos técnicos do Minifoguete</b> . . . . .	<b>52</b>

---

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

## 1 Introdução

O céu fascina o homem há milhares de anos. A ciência mais antiga datada é a astronomia, com seus primeiros registros em 3000 a. C., e vem guiando a humanidade aos avanços científicos desde então. A exploração espacial, além de aumentar nosso conhecimento sobre o universo, trouxe inúmeros benefícios para nossa sociedade. GPS, telecomunicações, são apenas algumas aplicações dependentes da infraestrutura espacial.

Além da divulgação, a educação em ciências espaciais torna-se extremamente importante, uma vez que combina a ciência, tecnologia e cultura. Ela é um instrumento significativo para despertar o interesse e envolver jovens estudantes nas diferentes áreas dessa ciência. Dentro da diversidade de assuntos, o enfoque em foguetes inspira pessoas de todas as faixas etárias ao espírito de exploração espacial.

Minifoguetes (MF) são foguetes de pequeno porte, e usam propelente sólido. Espaçomodelos (EM) são minifoguetes feitos de materiais não-metálicos e dotados de motores comerciais. Eles podem ter até centenas de gramas de massa, geralmente menos de 10 gramas de propelente, e podem atingir centenas de metros de altura (MARCHI et al, 2008).

A Mostra Brasileira de Foguetes (MOBFOG), realizada pela Sociedade Astronômica Brasileira (SAB) em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB) tem por objetivo despertar o interesse dos jovens pela astronáutica, física, astronomia e ciências afins para promover a difusão dos conhecimentos de forma recreativa, onde os estudantes constroem foguetes para uma disputa com outros estudantes de todo o Brasil. A MOBFOG, que conta com milhares de participantes todos os anos, é mais uma oportunidade para a aplicação dos aprendizados teóricos que recebem por meio das disciplinas curriculares.

Ao trabalhar com os foguetes-modelo, os estudantes põem em prática conceitos como as leis de Newton, momento linear e simulações computacionais, além de desenvolver e estimular a criatividade e responsabilidade para a manipulação dos artefatos.

Em meio a um cenário pandêmico, as instituições de ensino tiveram que adaptar-se para garantir a educação de forma segura. Apesar dos esforços dos educadores nessa nova forma de ensino à distância, houve um aumento nos níveis de ansiedade, depressão e estresse entre os estudantes. Baseado em resultados de outras pesquisas, afirma-se que isso pode levar à diminuição da motivação aumentada pela pressão de estudar de forma

independente e a interrupção da rotina diária. A consequência será um aumento potencial nas taxas de evasão (GRUBIC et al, 2020, MEETER et al, 2020).

Essa situação motivou nosso grupo a buscar métodos que fomentem mais uma vez o interesse dos estudantes do ensino público, que são os mais afetados pela pandemia, no retorno das atividades presenciais. Com isso, surgiu a ideia de levar a física em uma proposta lúdica para a realidade em que os estudantes de escolas públicas convivem, almejando difundir a cultura espacial e contribuir para que o prazer e a curiosidade estejam presentes lado a lado no processo de aprendizagem, através dos minifoguetes de baixo custo.

Diante do exposto, o presente projeto propõe uma intervenção pedagógica em forma de construção de minifoguetes como estratégia didática para o ensino de ciências e divulgação da área espacial por meio do projeto, fabricação, testes e qualificação do kit de minifoguetes para estudantes do segundo ciclo do ensino fundamental e ensino médio.

## 2 Objetivos e justificativas

### 2.1 Gerais

Divulgar e difundir conhecimentos para estudantes de escola públicas e demais públicos, a engenharia aeroespacial, conceitos de física, e demais aspectos que envolvem as ciências espaciais.

### 2.2 Específicos

1) Desenvolver um kit didático de minifoguetes com diversas configurações geométricas para os estudantes entenderem na prática, através de montagem e lançamento, os princípios da engenharia aeroespacial.

2) Em um momento apropriado, realizar exposições públicas em escolas, através de palestras e minicursos para as turmas do ensino fundamental e médio, para despertar a curiosidade científica e tecnológica, além de difundir e popularizar o foguetemodelismo na região.

### 3 Metodologia

A metodologia a ser seguida é baseada na apresentada pelo professor associado da Universidade Federal do Paraná, Carlos Henrique Marchi, do grupo de foguetes Carl Sagan. Com 38 anos de experiência em foguetemodélismo, o professor Marchi atualmente leciona no Departamento de Engenharia Mecânica.

A teoria desenvolvida foi apresentada no curso gratuito de foguetemodélismo ministrado pelo professor de forma remota. A montagem do kit foi publicada em formato de vídeos no *YouTube* e adaptada para esse trabalho e para melhores condições ambientais. Através de reuniões do grupo com o professor, recebemos sua autorização para a disseminação de sua metodologia.

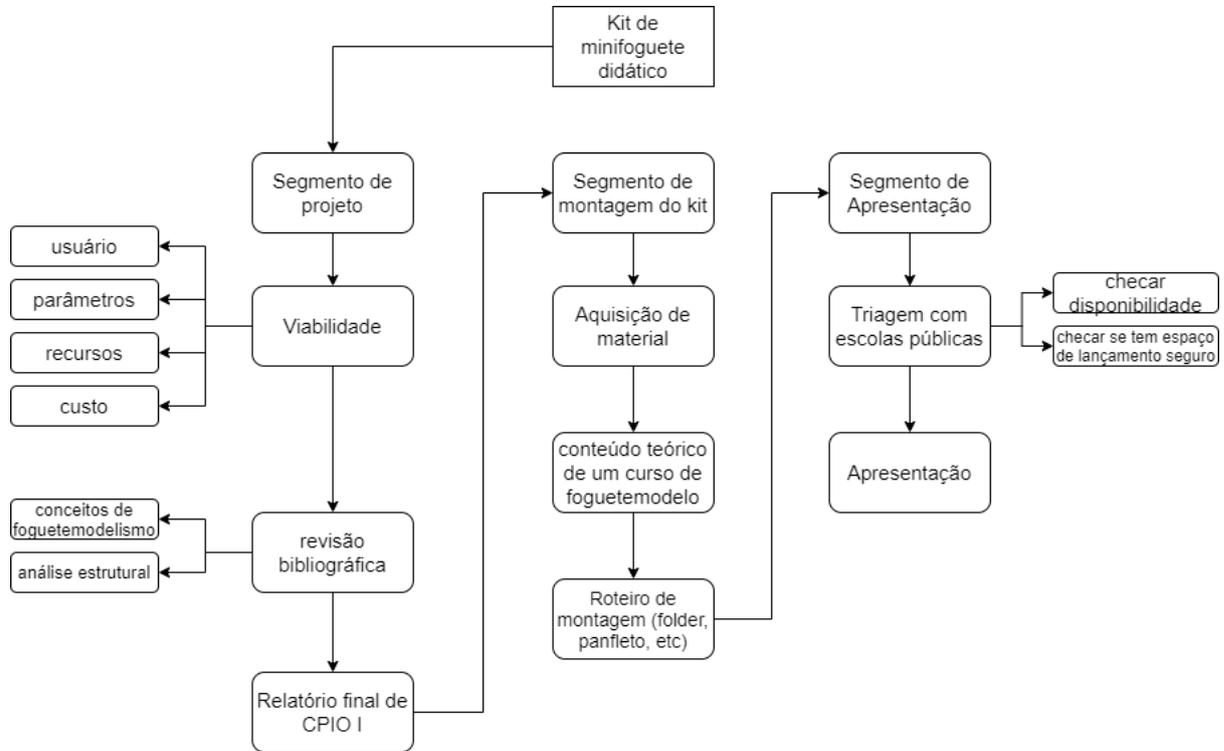
#### 3.1 Restrições de projeto

O projeto está sujeito a aplicações financeiras para a obtenção dos materiais para elaboração dos kits. O custo médio de cada kit didático é aproximadamente 5 reais, contando com os itens principais. Para isso, estamos submetidos às restrições monetárias da UFSM, contando com a ajuda de servidores de dentro e fora da instituição, além de aplicação própria das desenvolvedoras do projeto.

Além disso, planejou-se apresentações presenciais para os estudantes, em uma didática simplificada dos principais conceitos de foguete-modelismo, montagem dos protótipos e lançamento destes. Essas apresentações serão realizadas apenas na volta das atividades das escolas e universidades pós pandemia da COVID-19. Para essas apresentações, será necessária autorização das escolas e professores para as atividades com os alunos.

### 3.2 Gestão de projeto

Figura 1 – Estrutura Organizacional de Projeto



Fonte: Autor

### 3.3 Especificação dos materiais

Os materiais escolhidos para a confecção de minifoguetes foram pensados para que crianças maiores de 12 anos pudessem manusear com a supervisão de um responsável, além de ser de baixo custo devido às condições financeiras dos alunos e demais instituições públicas. Esses materiais são usuais em nosso dia a dia, como canudos, borrachas, papelão e fita crepe, com a exceção do sistema de propulsão e ignição. Para isso, utilizaremos um tipo de fogo de artifício, o foguete de vara (apito), skibs e baterias de 9V.

## 4 Conceitos Fundamentais

Nesta seção serão apresentados diversos conceitos fundamentais para a compreensão do funcionamento do kit de minifoguete.

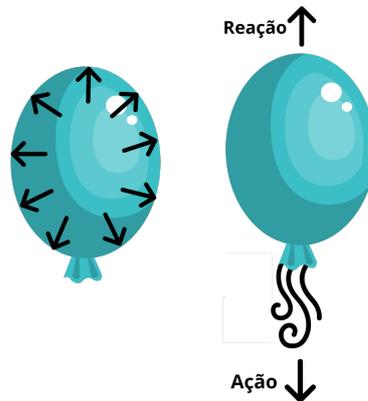
### 4.1 *Como os Foguetes Funcionam*

Pode-se dizer que o comportamento dos minifoguetes (MF) é semelhante ao de um foguete real, onde ambos se deslocam na vertical expelindo o fluxo de gás à alta velocidade. Assim, o princípio que permite o movimento dos minifoguetes - e foguetes reais também - é a Terceira Lei de Newton, lei a qual diz que toda força de ação produz uma força de reação de mesma magnitude, mas com sentido oposto. Aplicando este princípio aos foguetes, pode-se interpretar que a ejeção dos gases dos foguetes, provindos da queima do combustível, causa uma força de reação no sentido contrário ao da ejeção. Essa força de reação, por sua vez, é chamada de empuxo.

Uma boa analogia para associar o conceito de ação e reação com o movimento de um foguete, é imaginar um balão de festa. Segundo o Teorema de Bernoulli, um fluido tende sempre a se mover da região de maior pressão para a região de menor pressão. Portanto, como o ar está comprimido dentro do balão, por consequência, a pressão dentro dele é maior do que a pressão fora dele. Essa diferença de pressão faz com que, quando libera alguma saída de ar, todo o fluido que estava dentro da bexiga seja expelido pelo ponto de fuga.

Dessa forma, o ar liberado exerce uma força de ação no sentido da saída e, como consequência, surge uma força de reação sobre o balão que o desloca para o sentido contrário ao da saída do ar. A Figura 2 exemplifica esse processo.

Figura 2 – Força exercida pelo ar sobre a bexiga.



Fonte: Autor.

Uma demonstração interessante que pode animar as explicações sobre o funcionamento do foguete, é o experimento conhecido como "Teleférico de Newton". Este experimento consiste em apresentar de forma lúdica a lei de Ação e Reação, proposta por Newton, e pode ser realizada com materiais simples, como barbante, canudinho plástico e um balão de festa.

A montagem é feita passando o barbante no interior do canudinho e fixando cada ponta do barbante em alguma extremidade. Logo após fazer isso, com o auxílio de alguma fita adesiva, deve fixar o balão cheio ao canudinho conforme apresentado na Figura 3. Dessa forma o aparato estará pronto, e soltando a ponta da bexiga será possível ver que o movimento do balão é no sentido contrário ao sentido que o ar está sendo expulso.

Figura 3 – Experimento Teleférico de Newton.

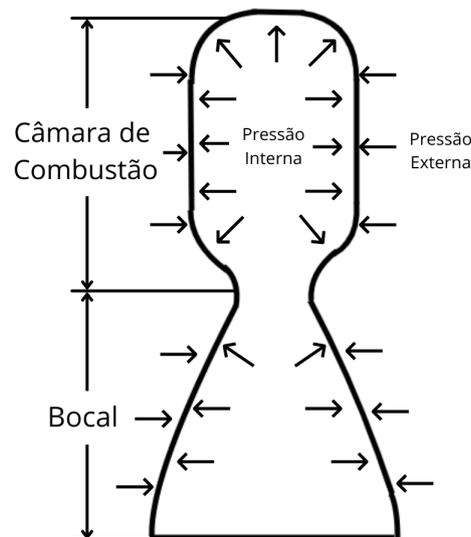


Autor: Desconhecido.

Retornando ao funcionamento dos foguetes, por mais tentadora que seja a lógica, os foguetes não funcionam “empurrando os gases contra o ar”. Até porque, se fosse dessa forma, eles não poderiam operar no vácuo do espaço, visto que não teriam ar para o impulsionar. Para entender então de onde vem a força de ação, pode-se utilizar outra analogia.

O que acontece nos foguetes é que, devido a queima do combustível, as partículas dos gases ficam comprimidas na câmara de combustão a elevadas pressões, conforme a figura 4. A diferença de pressão interna com a pressão externa potencializa a ejeção das partículas, fazendo com que o gás seja expelido em altas velocidades pelo bocal.

Figura 4 – Diferença de Pressão na Câmara de Combustão

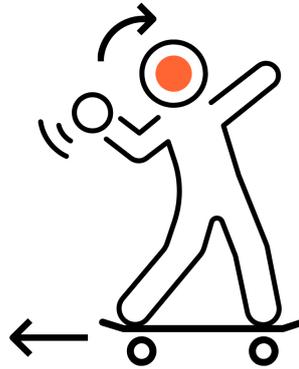


Fonte: Adaptado de MARCHI, C. H, 2020.

Pelo princípio da conservação do momento linear, as moléculas dos gases de escape saem do bocal do foguete muito rápido, o que lhes dá muito impulso. Como resultado, o foguete se move na direção oposta do escapamento com a mesma potência total.

Para entender esse fenômeno basta imaginar uma situação completamente hipotética onde uma pessoa em pé em um skate, e essa pessoa esteja jogando uma bola de boliche. O que acontecerá é que a bola vai avançar e a pessoa no skate se moverá para trás. A figura 5 exemplifica o que iria ocorrer.

Figura 5 – Exemplo momento linear



Fonte: Autor.

Seguindo essa linha de raciocínio, se esse objeto for jogado com mais força (consequentemente com mais velocidade), a rapidez com que o corpo e o skate da pessoa iriam para direção oposta ao arremesso seria maior também.

#### 4.1.1 Classificações dos Minifoguetes

Os minifoguetes podem ser classificados em dois tipos, sendo eles: Espaço modelo, foguete modelo, minifoguete educativo ou minifoguete comercial; e Minifoguete experimental.

O primeiro tipo de MF utiliza, na maioria das vezes, componentes prontos que podem ser adquiridos por algum fornecedor na forma de kit. Portanto, a sua construção se refere apenas à montagem, o que contribui para que ele seja bastante utilizado como uma ferramenta de ensino.

Já o segundo tipo, os MF experimentais, são completamente desenvolvidos por quem deseja construir, ou seja, não possuem componentes industrializados. Normalmente esse tipo de MF é utilizado em competições e o seu custo e complexidade são maiores do que os MF do primeiro tipo.

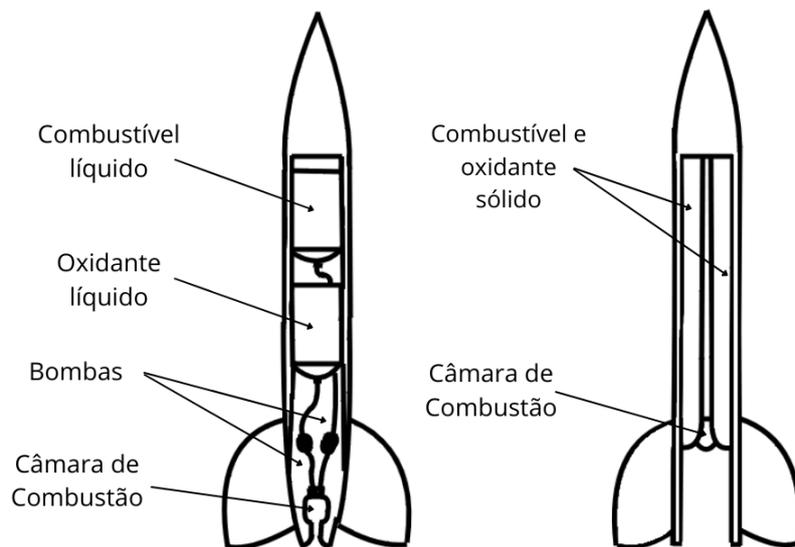
#### 4.2 Motor-Foguete

No caso dos minifoguetes, os três tipos de motor-foguete mais utilizados são a propelente líquido, sólido e híbrido. Contudo, como o motor a propelente sólido necessita

de menos aparatos para controlar seu fluxo de ejeção de gases, ele apresenta um menor custo e menor complexidade de construção. Características bem atrativas para o caso de um kit de minifoguete de baixo custo, tornando mais viável o uso deste tipo de motor ao invés dos outros citados.

A figura 6 mostra a estrutura interna de motores de combustão líquida e sólida, com seus respectivos componentes. É perceptível que a quantidade de componentes da primeira figura é maior do que da segunda figura, ressaltando que a utilização de propelentes sólidos é menos complexa.

Figura 6 – Diferenças entre Motor-Foguete a Propelente Líquido e Sólido



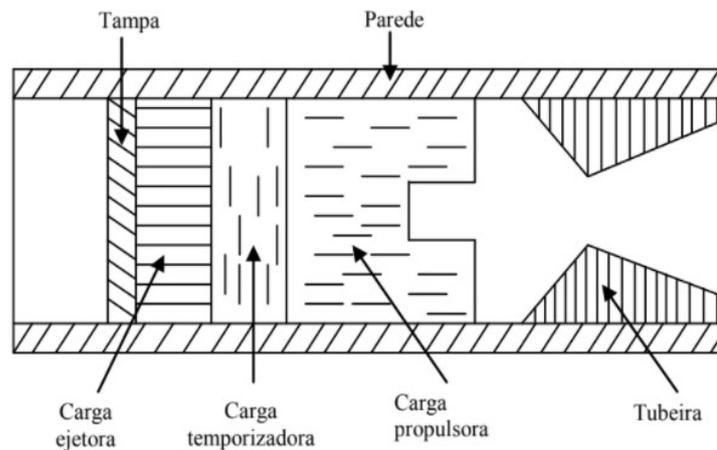
Fonte: Autor.

Dessa forma, como o presente trabalho busca um kit didático, o motor utilizado será com propelente sólido, visto que sua complexidade é menor quando comparada com os outros tipos citados. Neste capítulo, portanto, serão apresentados tópicos referentes à motores-foguete com propelente sólido, bem como seus componentes estruturais, seu funcionamento e os parâmetros para classificação destes motores.

#### 4.2.1 Componentes do Motor-Foguete

A figura 7 apresenta a distribuição dos componentes básicos de um motor-foguete para Minifoguetes.

Figura 7 – Componentes do motor-foguete de espaçomodelo



Fonte: MARCHI, C. H., 2020.

Cujas funções desses componentes são:

- Parede: responsável por revestir o motor;
- Carga Propulsora: responsável por gerar o empuxo após ser consumida. Normalmente é um bloco maciço conhecido como grão propelente;
- Tubeira: Tem finalidade de aumentar a pressão dos gases que resultam da queima do propelente;
- Carga Ejetora: é usada para ejetar o sistema de paraquedas;
- Carga Temporizadora: é usada para dar um tempo entre a queima das cargas ejetoras e a carga propulsora;
- Sistema de Ignição: responsável por iniciar a queima do propelente.

Vale ressaltar que existem motores sem as cargas temporizadora e ejedora, eles são chamados de motores tipo *booster*. O kit desenvolvido no presente trabalho utilizara este tipo de motor por ser mais simples.

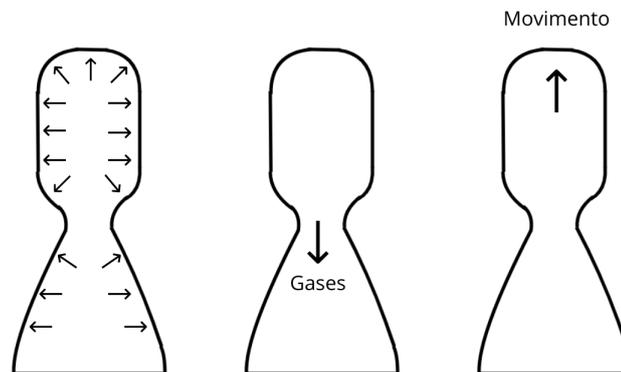
#### 4.2.2 Funcionamento do Motor-Foguete a Propelente Sólido

Como apresentado anteriormente, um dos componentes do motor é a carga propulsora. No caso dos minifoguetes, essa carga se trata de um bloco sólido com formato cilíndrico chamado grão propelente. A composição química do grão é baseada em dois componentes principais: o combustível que gera energia na forma de calor quando reage com oxigênio; e o oxidante que fornece o oxigênio para a mistura.

Para que este grão seja consumido e o MF inicie a decolagem, é necessário uma fonte externa de calor para ignitar o propelente. Esse ignitor pode ser uma fonte de calor ou uma corrente elétrica que gera um curto e circuito e iniciando a queima do propelente.

Durante a queima do propelente, os gases resultantes se expandem em altas temperaturas, produzindo pressão em todas as superfícies internas do motor conforme a figura 8. As pressões que atuam nas laterais irão se anular visto que possuem as mesmas magnitudee, mas sentidos opostos. Entretanto, devido a presença da tubeira, as pressões no sentido vertical não irão se anular, visto que não terá força no sentido oposto para contrapor com a força exercida pela parte superior do motor.

Figura 8 – Pressão Exercida pelos Gases



Fonte: Autor

Dessa forma, os gases tendem a sair pela extremidade aberta, e, devido a alta pressão na parte interna do motor, a velocidade da ejeção dos gases será potencializada.

Para entender o porquê a pressão interna é alta, basta assumir o gás resultante da queima do propelente como um gás ideal. Sabe-se que, pela lei dos gases ideais, a pressão exercida por um gás é proporcional a sua densidade e temperatura absoluta. Assim, um

acrécimo na temperatura causa um aumento na pressão. A relação matemática dessa lei é apresentada na equação 1.

$$P = \rho RT \quad (1)$$

Onde  $P$  é a pressão interna do motor,  $\rho$  é a densidade do gás utilizado,  $R$  a constante específica do gás, e  $T$  a temperatura do gás.

### 4.2.3 Empuxo

A ejeção dos gases em alta velocidade gera o que chamamos de força de empuxo, a qual é o princípio pelo qual minifoguetes se movem. Buscando entender de onde vem essa força, devemos considerar o momento linear das partículas do propelente.

De maneira simplificada, o momento linear de uma partícula é o produto entre a sua massa e a sua velocidade. Matematicamente, o momento linear é expresso como:

$$\vec{Q} = m \vec{v} \quad (2)$$

A partir da equação 2, temos que, no instante  $t_0$ , o grão propelente possui uma massa  $m_p(t)$ , velocidade  $\vec{v}_q(t)$  e um momento  $\vec{Q} = m \vec{v}$ . Ao iniciar a queima do propelente, a massa do grão é consumida e, portanto, em um intervalo de tempo  $\Delta t$  a combustão consome uma taxa constante de massa  $\Delta m$ .

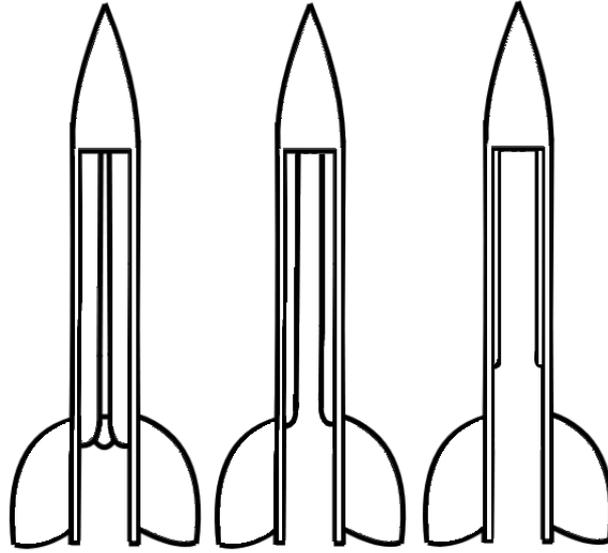
A variação de massa gera um incremento na velocidade durante um certo período de tempo e, por consequência, surge uma força  $\vec{E}$  com a mesma direção que o fluxo de ejeção dos gases. Força a qual é conhecida com o empuxo gerado pela queima do propelente. A figura 9 representa a relação da diminuição da massa com a magnitude da força  $\vec{E}$  causada pelo incremento da velocidade.

Podemos calcular o empuxo através da equação simplificada, dada por:

$$\vec{E} = v_e f_m \quad (3)$$

Onde  $v_e$  é a velocidade de ejeção dos gases e  $f_m$  é o fluxo mássico. Percebe-se que apenas a velocidade e fluxo de massa influenciam no valor de  $\vec{E}$  e, portanto, para aumentar o empuxo basta aumentar a velocidade de saída ou o fluxo de massa.

Figura 9 – Relação do Consumo de Massa com Empuxo



Fonte: Autor.

Levando em conta essa diferença de pressão que existe na câmara de combustão e a pressão ambiente, o empuxo pode ser calculado pela seguinte expressão

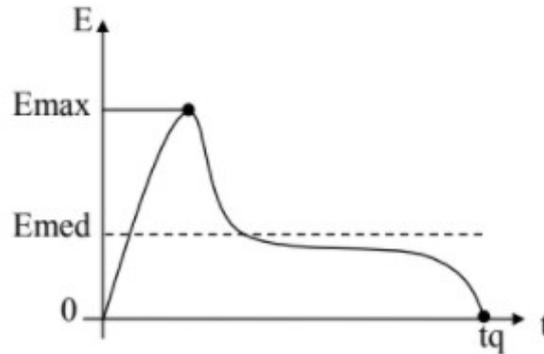
$$\vec{E} = v_e f_m + A_s(P_{int} - P_{ext}) \quad (4)$$

Onde  $A_s$  é a área de saída do bocal,  $P_{int}$  a pressão interna e  $P_{ext}$  a pressão externa.

#### 4.2.4 Curva de Empuxo

A curva de empuxo é uma maneira gráfica de representar a força propulsiva ( $\vec{E}$ ) produzida pelo motor-foguete a cada instante de tempo (t) (MARCHI, C. H., 2020). A figura 10 exemplifica uma curva de empuxo típica de motor-foguete de minifoguetes.

Figura 10 – Curva de empuxo típica de um motor-foguete de um espaçomodelo.



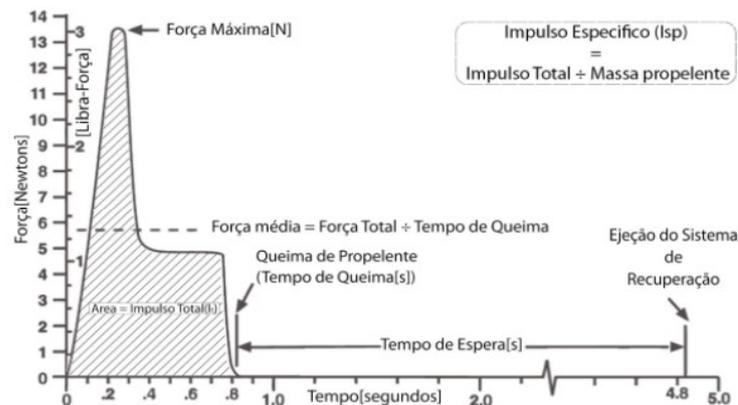
Fonte: MARCHI, C. H., 2020.

Essa curva é um dos elementos mais comuns para as especificações de motores. Pois, por meio de uma análise da curva em questão, é possível extrair parâmetros importantes que descrevem a capacidade do motor-foguete.

#### 4.2.5 Parâmetros da Curva de Empuxo

A ilustração das informações mais importantes que podem ser extraídas a partir da curva de empuxo pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Ilustração dos pontos de interesse do gráfico Impulso x Tempo.



Fonte: Adaptado de ESTES, 2008.

Antes de buscar entender cada um desses parâmetros, convém apresentar o conceito de impulso. Por definição, o impulso é a quantidade de movimento total produzida pelo motor durante o período de queima. Matematicamente, temos que o impulso total é o empuxo integrado pelo tempo de queima, expressão a qual é dada pela equação 5.

$$I_t = \int_0^{t_q} E(t_q) dt_q \quad (5)$$

Onde o símbolo  $t_q$  representa o tempo de queima do grão-propelente.

Retornando ao gráfico, logo no começo da queima é possível encontrar a força máxima, que é conhecida também como empuxo máximo ( $E_{max}$ ). Em seguida,  $E_{max}$  se reduz para um patamar próximo da força média e permanece assim até o fim da queima do propelente. Essa força média é conhecida como empuxo médio ( $E_{med}$ ), o qual é definido pela equação 6

$$E_{med} = \frac{I_t}{t_q} \quad (6)$$

Sabendo a massa total de propelente do motor ( $M_p$ ), é possível obter a velocidade média de ejeção dos gases na saída da tubeira do motor ( $c$ ) por meio da equação 7.

$$c = \frac{I_t}{M_p} \quad (7)$$

Um conceito importante na análise de performance dos motores é o impulso específico ( $I_s$ ), o qual é dado por:

$$I_s = \frac{I_t}{M_p \cdot g} = \frac{c}{g} = \frac{E_{med} \cdot t_q}{M_p \cdot g} \quad (8)$$

Onde  $g$  é a aceleração gravitacional ao nível do mar.

Por fim, podemos obter também o fluxo de massa médio ( $f_m$ ) que é a quantidade de massa de propelente consumida por unidade de tempo. Ele é definido por:

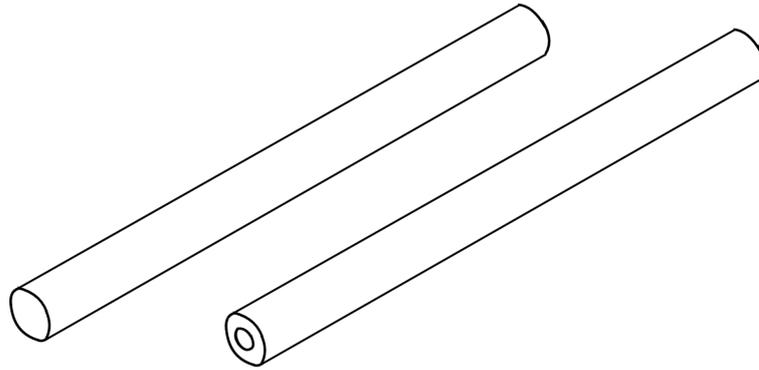
$$f_m = \frac{M_p}{t_q} \quad (9)$$

#### 4.2.6 Grão Propelente

Existem diversos fatores que podem influenciar no formato da curva de empuxo. Um desses fatores é a forma geométrica do grão-propelente, pois isso tem efeito na velocidade de queima e, por consequência, no impulso gerado pelo motor.

O formato do grão é cilíndrico para maximizar a eficiência volumétrica do motor. A parte central do motor pode ser completamente preenchida ou possuir uma cavidade central. Os dois casos onde o centro é preenchido ou oco são apresentados na figura 12.

Figura 12 – Grão propelente com e sem cavidade central



Fonte: Autor.

A presença ou não dessa cavidade influencia diretamente na performance do motor, isso acontece por dois motivos:

- Aumento da área superficial de queima: como a quantidade de empuxo é diretamente proporcional à quantidade de propelente queimado. Então quanto maior for a superfície, maior será a massa consumida, e com a presença de uma cavidade a área superficial da queima aumenta;
- Aumento da estabilidade do minifoguete: sem a cavidade, a queima inicia de baixo para cima, fazendo com que o centro de massa (CM) do minifoguete varie muito durante a queima. Essa mudança do CM pode causar grandes instabilidades.

#### 4.2.7 Classificação dos Motores

Os motores são classificados de acordo com a sua classe, ou seja, de acordo com a capacidade do motor de produzir impulso. A Associação Nacional de Espaçomodelismo (National Association of Rocketry - NAR) categoriza as classes por impulso: Micro Impulso (Classe 1/8 A), Baixo Impulso (Classes 1/4 A até D), e assim por diante. Essas classificações, junto com seus respectivos impulsos, podem ser vistas em resumo na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos motores.

Classe do Motor	Impulso Total (N.s)	Categoria
1/8 A	0,00 a 0,3125	Micro Impulso
1/4 A	0,3126 a 0,625	
1/2 A	0,626 a 1,25	
A	1,26 a 2,50	Baixo Impulso
B	2,51 a 5,00	
C	5,01 a 10,00	
D	10,01 a 20,00	Impulso Médio
E	20,01 a 40,00	
F	40,01 a 80,00	
G	80,01 a 160,00	

Fonte: *National Association of Rocketry* (NAR), 2004.

O motor utilizado no presente trabalho é da classe 1/2 A visto que o seu impulso total varia de 0,626 a 1,25 Ns. Além disso, de acordo com a NAR, os motores de espaçomodelos são classificados com um código do tipo:

### Letra Número 1 – Número 2

Onde a letra indica a classe de impulso total ( $I_t$ ) do motor, o número 1 indica o valor do empuxo médio ( $E_{méd}$ ) do motor, e o número 2 indica a duração da queima da carga temporizadora.

Como exemplo, considere o seguinte código: **B9 – 3**; temos que a classe de impulso total é B, ou seja, tem um impulso total no intervalo de 2,51 a 5,00 N.s. Sabemos também que o número 1 é 9, ou seja, o empuxo médio é de aproximadamente 9N. E por fim, o número 2 é assume o valor 3, o que significa que a duração da queima da carga temporizadora é de aproximadamente 3 segundos.

#### 4.3 Aerodinâmica de Foguetemodelos

Aerodinâmica é a ciência que estuda as forças atuantes em corpos sólidos se deslocando em fluídos. Para foguetemodelos, a força mais incisiva é o arrasto. Porque diferentemente de aviões, foguetes são objetos lançados verticalmente e se mantêm pelo empuxo gerado pelo motor e, portanto, não precisam produzir sustentação para se manterem em voo. Na realidade, a sustentação gerada serve para restabelecer a estabilidade no veículo, todavia, isso será detalhado na próxima seção. Tornando ao arrasto, essa força é justamente a que age contra o empuxo do foguete, pois, como prevê a 3ª Lei de Newton, toda ação

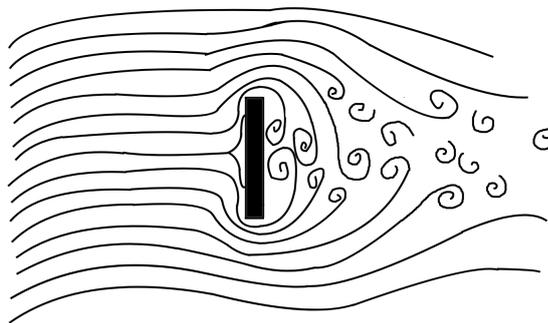
gera uma reação. Assim, é de suma importância que o MF tenha superfícies que gerem o menor arrasto possível para fazer uso mais eficiente do combustível.

#### 4.3.1 Arrasto Aerodinâmico

Todos arrastos atuam em oposição à direção do movimento e por consequência diminuem a velocidade do corpo. Existem diferentes tipos de arrasto, a seguir, os mais relevantes para o foguetemodelismo estão listados.

- Arrasto de forma: se deve a geometria do objeto. Na Figura 13 é possível perceber que a geometria da partícula é um fundamental atuante, contra ou a favor, do arrasto. Alguns formatos são mais eficientes aerodinamicamente, justamente por diminuir o arrasto;

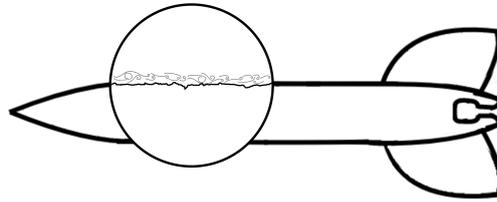
Figura 13 – Arrasto de Forma



Fonte: Autor.

- Arrasto de fricção: se deve a superfície do objeto. A rugosidade do material que compõe MF. Com isso, ao se ter um material com uma superfície mais rugosa, como um plástico, é esperado que seja menos eficiente no combate ao arrasto do que um material cerâmico por exemplo;

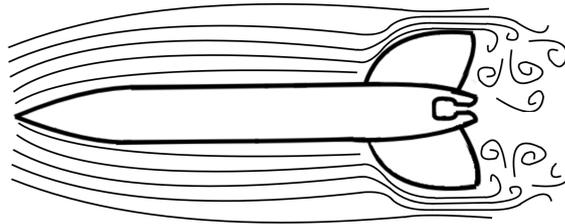
Figura 14 – Arrasto de Fricção



Fonte: Autor.

- Arrasto de base: ocorre devido a baixa pressão traseira no MF. Ocorre deslocamento do fluido da parte de maior pressão (a superfície do tubo foguete) para a de menor pressão (a tubeira), como prevê o Teorema de Bernoulli.

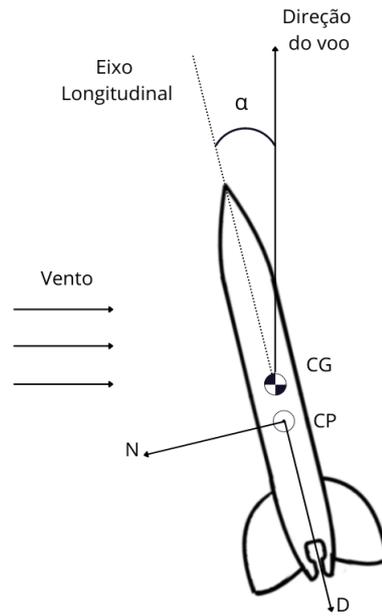
Figura 15 – Arrasto de Base



Fonte: Autor.

- Arrasto induzido: ocorre devido ao ângulo de inclinação causado pelo vento, deslocando o MF do seu eixo longitudinal.

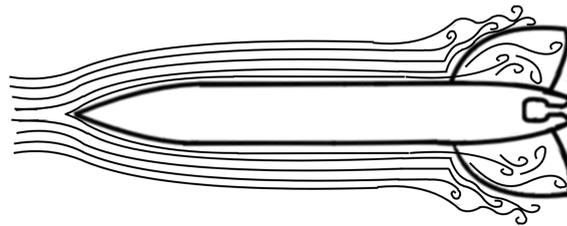
Figura 16 – Arrasto Induzido



Fonte: Autor.

- Arrasto de interferência: provém da interação do fluido na região entre tubo-foguete e empenas, que gera diferença de pressão entre as superfícies.

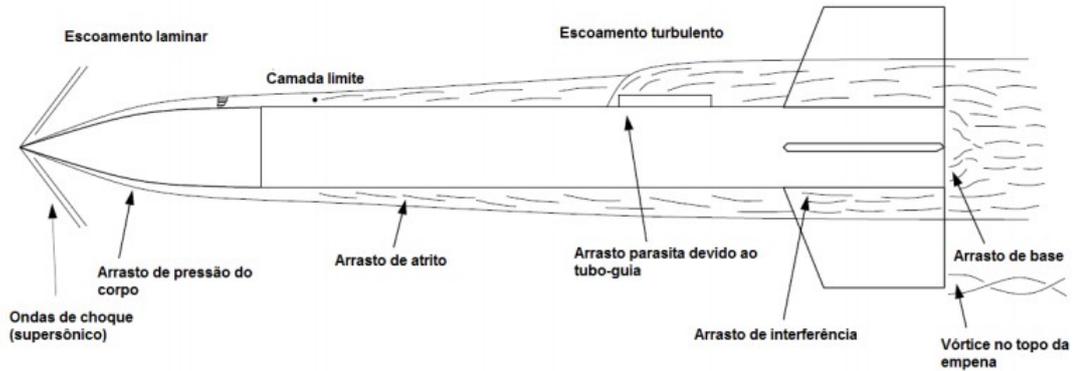
Figura 17 – Arrasto de Interferência



Fonte: Autor.

A Figura 18 apresenta todas as forças a que um espaçomodelo pode estar submetido.

Figura 18 – Forças de Arrasto atuantes em um Minifoguete



Fonte: Adaptado de NISKANEN (2013, p. 42).

A força de Arrasto é governada pela seguinte equação:

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (10)$$

Onde,

$C_D$  = Coeficiente de Arrasto (adimensional)

$\rho$  = massa específica do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V$  = velocidade do MF ( $\text{m}/\text{s}$ )

$A$  = área de referência ( $\text{m}^2$ )

Essa equação mostra que quanto maior a área de referência e a velocidade, maior será o arrasto aerodinâmico.

#### 4.3.2 Fatores que afetam o $C_D$

a) Tipo de escoamento: se o regime de escoamento for laminar, o  $C_D$  é menor, enquanto para o regime de escoamento turbulento muito mais arrasto é gerado;

b) Número de empenas: as empenas garantem a estabilidade vertical do MF. A quantidade varia de acordo com cada projeto, mas deve-se sempre garantir a simetria, e não aumentar consideravelmente o arrasto de base. Para MF normalmente é usado de 2 a 4 empenas;

c) Rugosidade da superfície: quanto menos lisa é a superfície, menor o atrito de fricção;

d) Tamanho e espessura das empenas: a empenna deve ser grande o suficiente para garantir a estabilidade, mas não tão grossa a ponto de afetar de gerar quantidades

consideráveis de arrasto de base; por isso, para MF é comum o uso de empenas aperfiladas, além de simplificar o projeto atende satisfatoriamente aos critérios de estabilidade;

e) Ângulo de ataque  $\alpha$ : quanto menor o ângulo de ataque, menor será a componente do Arrasto, pois assim é menor a necessidade do uso das empenas para retornar o MF a sua posição de equilíbrio, isso será melhor detalhado adiante;

g) Razão entre comprimento total e diâmetro máximo do MF: quanto menor a razão, menor o arrasto (MARCHI, 2020)

### 4.3.3 Sustentação

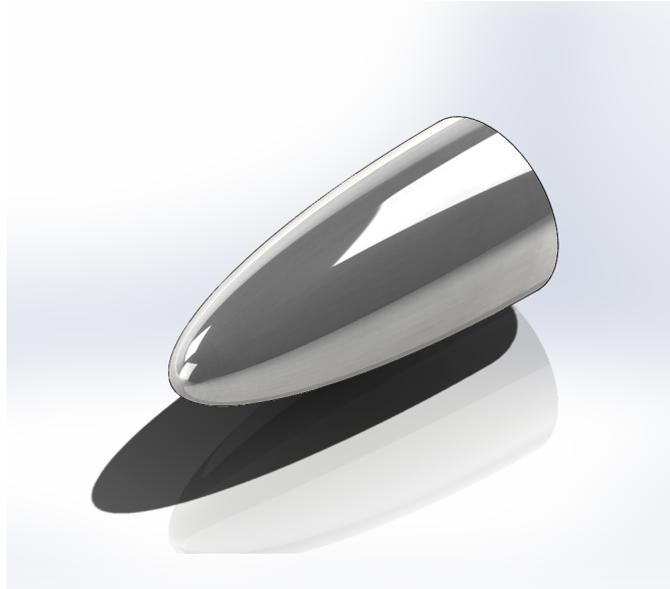
A sustentação é a componente normal da força em relação a direção do escoamento. Essa força não será analisada no presente relatório em virtude do fato de foguetes por serem axissimétricos terem sustentação igual a zero, sendo o impulso e o empuxo responsáveis pela trajetória desses projéteis (PALMERIO, 2017).

### 4.3.4 Efeito Aerodinâmico dos Modelos do Nariz

O aspecto aerodinâmico mais influenciado pelo cone do nariz de um MF é o arrasto, e também conhecido como resistência do ar. Quanto mais o objeto sofrer com essa força, mais impulso ele necessitará para levantá-lo.

Quando o ar colide com uma superfície reta, ele tende a produzir uma grande força contra o deslocamento da partícula. Foguetes que se deslocam com velocidades superiores a velocidade do som, o nariz ideal são os que possuem a ponta mais pontiaguda. No caso de um MF, que se desloca em regime subsônico, a melhor forma do nariz é uma curva arredondada, isso se deve à diminuição do arrasto e aumento da eficiência nesse regime (NEI).

Figura 19 – Nariz elíptico



Fonte: CROWELL, 1996.

#### 4.3.5 Diâmetro do Tubo-Foguete

Como mostrado na Equação 10, o arrasto depende da seção transversal do objeto. Por isso, foguetes com diâmetro maior tendem a ter mais arrasto, uma vez que o tamanho do corpo sólido é maior e há mais ar sendo empurrado. Portanto, fazer um MF o mais estreito possível é a melhor forma de reduzir o arrasto (NEI). Com o kit, os estudantes poderão montar MF com diferentes diâmetros e assim poder observar isso na prática, pois quanto menor a força de oposição ao movimento, mais alto o veículo chegará.

#### 4.3.6 Tubo Guia

O Tubo Guia se trata de um tubo preso externamente ao tubo-foguete, como o da Figura 20. Ele é usado para o lançamento de MF em rampa de lançamento. Com o movimento do MF, a guia da rampa desliza por dentro do tubo-guia.

Figura 20 – Espaçomodelo Sondinha II em sua rampa de lançamento



Fonte: MARCHI, 2020.

#### 4.4 Estabilidade de Foguetemodelos

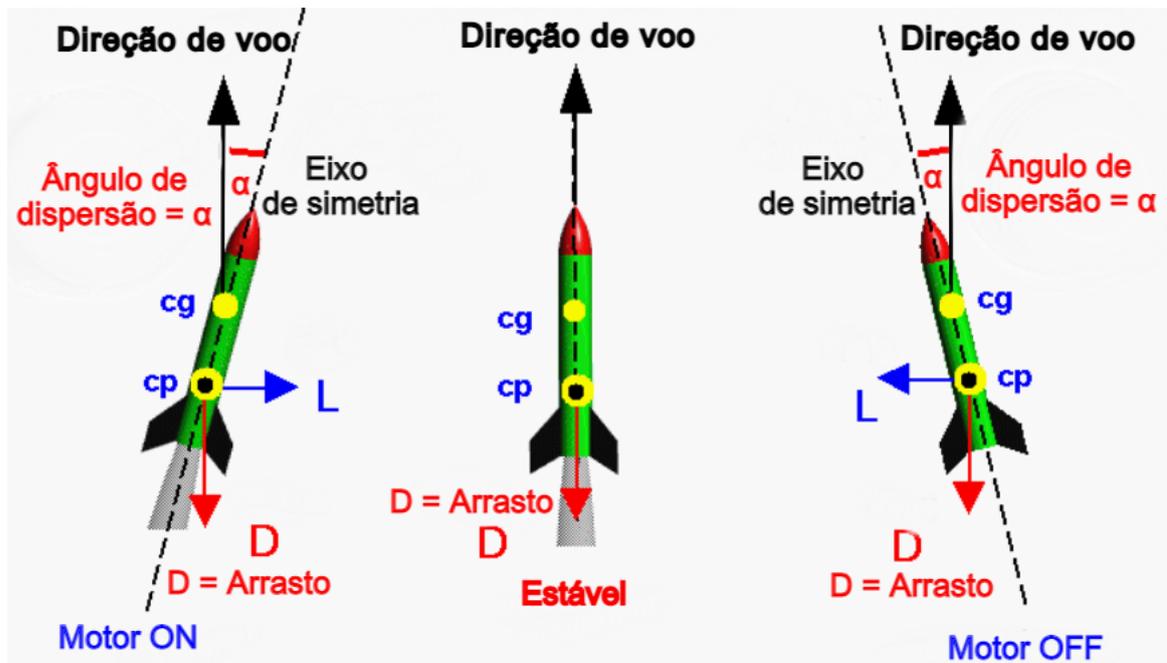
Enquanto um MF está voando, ele sofre oscilações na estabilidade, que podem ser causadas por rajadas de vento, pelo impulso. E essas oscilações podem até mesmo mudar a atitude de voo. Como qualquer objeto em voo vertical, um foguete gira em torno do seu CG, ou seja, entorno do seu centro de gravidade, onde é aplicada a força da gravidade de todo o corpo, mostrado em amarelo na figura 21. Essa rotação faz com que o eixo de foguete seja inclinado em algum ângulo "a". Sempre que ele estiver inclinado, será gerada

força de sustentação pelo corpo do veículo e pelas empenas. Por sua vez, essa força de sustentação influenciará na trajetória do MF.

Para um MF estável, o centro de pressão deve estar localizado abaixo do centro de gravidade. Para aumentar a estabilidade do veículo: adicione peso ao nariz, pois assim a tendência a rotacionar no eixo lateral; aumente a área das aletas, pois assim será gerada mais sustentação quando houver inclinação levando o MF a recuperar a estabilidade mais rapidamente.

#### 4.4.1 Efeito do vento e da variação

Figura 21 – Direção de voo de um MF



Fonte: Adaptado de BENSON, 2021.

Na figura acima, há três casos em que a direção do voo do MF é exatamente vertical, apesar de parecer contraintuitivo. No centro o foguete não sofre perturbação e, portanto, está alinhado com o eixo longitudinal. Dessa forma o arrasto está distribuído ao longo desse mesmo eixo e a força de sustentação não é gerada. Nesse caso, a sustentação e o arrasto produzem torque no sentido anti-horário. Por isso, a tubeira do foguete vai balançar para a direita sob a ação de ambas as forças e o nariz se moverá para a esquerda, tornando o foguete estável novamente. O mesmo acontece para o caso à direita da figura, salvo as direções de desvio, de torque (horário) e a direção de movimentação da cauda. Em ambos

os caso a sustentação e o arrasto movem o nariz de volta para a direção do voo. Isso é chamado de força restauradora porque reestabelecem o veículo à sua posição inicial.

A força restauradora existe pois o CG está acima do CP, tanto quando o motor está ligado quanto quando não está – o CP é o ponto onde as forças aerodinâmicas agem – por isso, a tubeira do foguete vai balançar para a direita sob a ação de ambas as forças e o nariz se moverá para a esquerda.

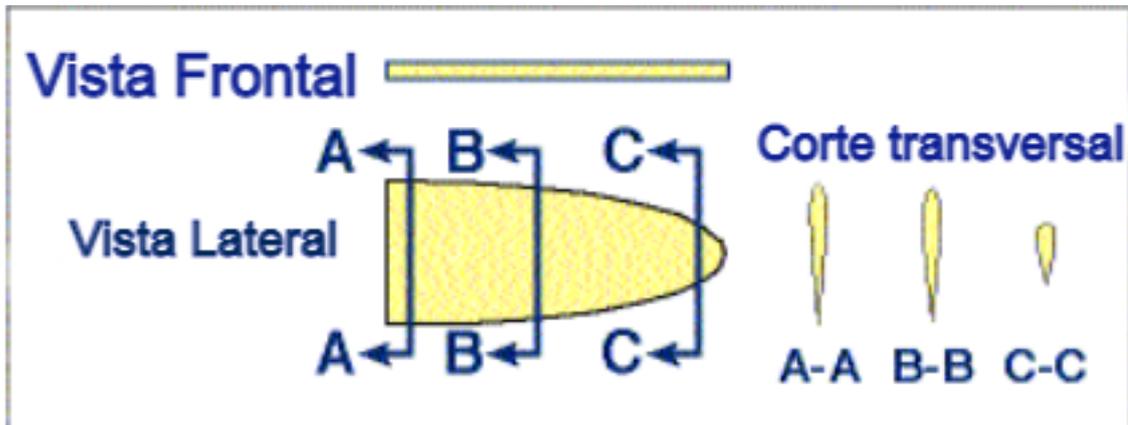
Assim, se o CP estiver a frente do CG as forças de sustentação e arrasto manterão as direções apresentadas na figura, mas o sentido do torque é invertido. Isso é chamado de força de desestabilização. Qualquer pequeno deslocamento nesse caso faz com que o deslocamento aumente ao invés de haver tendência de retornar à posição de equilíbrio (BENSON, 2021).

#### 4.4.2 Geometrias de Empenas

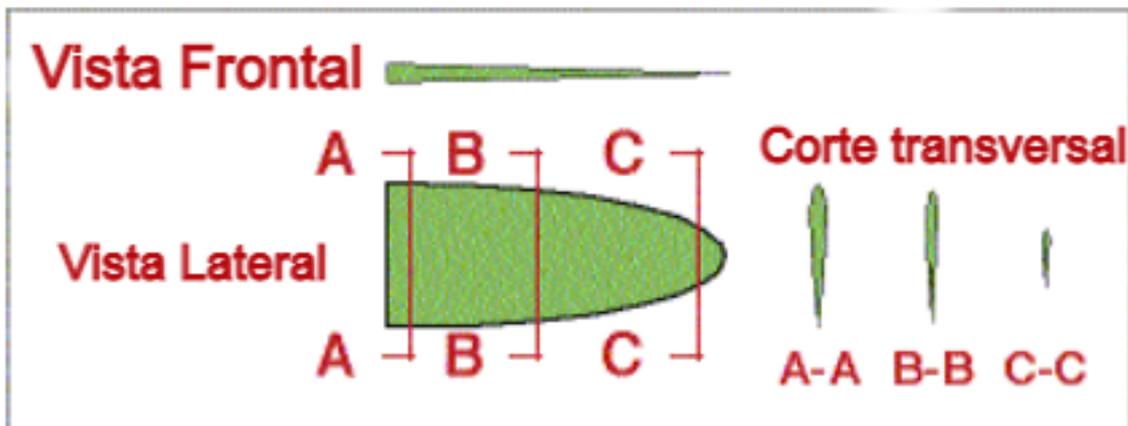
O arrasto induzido ocorre apenas quando as empenas criam sustentação. Mas como dito antes, se o foguete segue alinhado com o eixo longitudinal, a geração dessas forças não ocorre. Assim, o arrasto induzido tende a ser próximo de zero. Por isso, é provável que o MF tenha as mesmas forças de arrasto induzido independente do formato da aleta.

Contudo, o arrasto de perfil está sempre presente. Esse arrasto é uma combinação do arrasto de fricção gerado pela superfície das empenas com o arrasto de base causado pelas diferenças de pressão entre o corpo do foguete e a traseira dele. Essa força é gerada por vários fatores, como acabamento da superfície da aleta, o aerofólio usado, área das empenas, com comprimento da corda da empena e a velocidade que o MF se desloca.

Figura 22 – Afilamento



## PERFIL TÍPICO DE EMPENA



## PERFIL IDEAL DE EMPENA

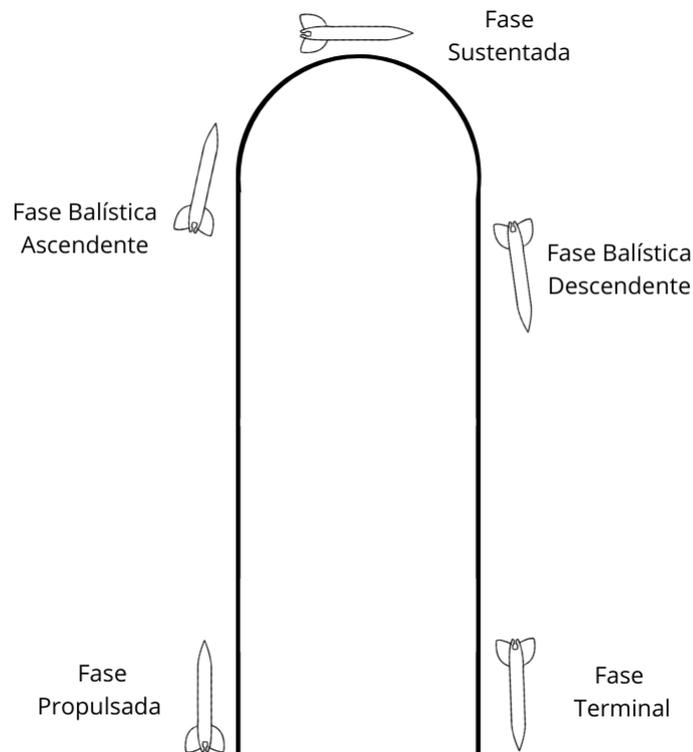
Fonte: Adaptado de *Apogee Components*, 2016.

No caso de empennas com afilamento, à medida que a superfície reduz o tamanho, o número de Reynolds diminui, com isso a criação de sustentação na região da ponta é menor quando comparado a raiz. Portanto, a adoção dessa configuração não é tão eficiente quanto a sem afilamento, uma vez que a sustentação criada para restabelecer a estabilidade será menor. Para compensar essa diferença seria factível aumentar o tamanho da aleta, mas isso geraria mais arrasto de perfil e portanto não seria eficiente. Outro problema sobre o uso de afilamentos quando se trata de empennas perfiladas é que é construtivamente difícil deixar o formato constante ao longo de toda a superfície. E embora isso não seja facilmente observado em MF por crianças e adolescentes é por isso, e também por ser mais viável economicamente, que para o Kit de MF serão usadas empennas aperfiladas.

#### 4.5 Trajetória de Foguetemodelos

Assim que o MF é lançado, ele segue uma trajetória que é dividida em quatro etapas principais, as quais estão ilustradas na Figura 23. Os pontos importantes a respeito da trajetória serão discutidos durante o presente capítulo.

Figura 23 – As principais fases do trajeto de voo.



Fonte: Autor.

##### 4.5.1 Fases do Voo

A subdivisão ou etapas da trajetória do MF divide-se em:

- 1) Fase Propulsada: é a fase onde o foguete está em funcionamento, ou seja, tem duração equivalente à queima de combustível, e é a etapa que define o ponto mais alto alcançado pelo MF (apogeu).
- 2) Fase Balística: é a fase onde o motor-foguete não está em funcionamento e não há sistema de recuperação ativo. Esta fase divide-se em:
  - 2.1) Ascendente: MF continua subindo até o apogeu por inércia (sem a força de empuxo exercida pelo motor).

- 2.2) Descendente: MF em queda-livre a partir do apogeu até ser ativado o sistema de recuperação
- 3) Fase Sustentada: é a fase onde o MF ativa o sistema de recuperação (paraquedas).
- 4) Fase Terminal: é a fase onde a força de arrasto do sistema de recuperação se igual à força gravitacional e, portanto, o MF continua em queda mas com velocidade constante.

#### 4.6 *Análise de Voo de Foguetemodelos*

Em competições de lançamentos de minifoguetes experimentais, uma das características do minifoguete que aumenta a pontuação da equipe é o quão alto o MF foi, ou seja, o quão grande foi o seu apogeu. Como competições possuem mais investimentos financeiros, a forma de calcular o apogeu, normalmente, é feita por sensores de altitude instalados no próprio MF. Entretanto, como o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um MF de baixo custo, a inclusão de um sensor de altitude é inviável.

Para casos onde não é possível determinar o apogeu com sensores, são utilizados métodos analíticos. Portanto, durante este capítulo serão apresentados alguns métodos que podem ser empregados para estimação do valor do apogeu atingido sem o uso de equipamentos sofisticados a bordo do MF. Fica a cargo do leitor a escolha de qual dos métodos será utilizado para a determinação do apogeu.

A presente seção foi desenvolvida a fim de promover o interesse dos alunos por competições, incentivando-os a procurar mais sobre equipes de competições. Além disso, entender os fatores que influenciam na eficiência dos MF, como, por exemplo, os efeitos da espessura do tubo-foguete, a quantidade de empenas, o formato do nariz, entre outros tópicos que foram discutidos durante a fundamentação teórica. Entendendo esses pontos, os estudantes serão capazes de otimizar os seus próprios foguetes, com intuito de atingir uma máxima eficiência e alcançar altos apogeus.

##### 4.6.1 Método Ideal 1

O método ideal serve para realizar uma estimativa de apogeu desconsiderando alguns fatores externos que podem influenciar no valor do apogeu real. Portanto, para

o primeiro método ideal, desprezando o arrasto e a força sustentadora exercida pelo paraquedas, o apogeu é dado por:

$$H = \frac{g t_I^2}{2} \quad (11)$$

Onde  $g$  é a aceleração gravitacional,  $t_I$  é o tempo de voo entre a decolagem e o impacto e  $H$  o apogeu estimado do MF.

Outra simplificação para o uso desta equação é que o voo é apenas vertical, sem deslocamento horizontal. Além disso, desconsidera-se a fase propulsada.

#### 4.6.2 Método Ideal 1

Para o segundo método ideal, as simplificações são as mesmas, entretanto, utiliza-se outro valor para o tempo, resultando na seguinte equação:

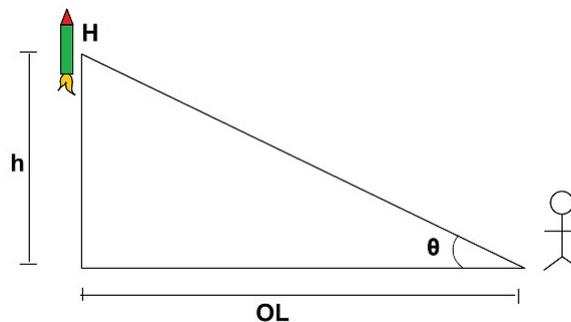
$$H = \frac{g}{2} (t_H)^2 \quad (12)$$

Onde  $t_H$  é a o tempo de voo cronometrado entre a decolagem e o apogeu.

#### 4.6.3 Método A

Considerando que o MF siga uma trajetória vertical, sem deslocamento horizontal, pode-se medir o apogeu por meio de uma relação trigonométrica simples extraída a partir da Figura 24.

Figura 24 – Vista lateral entre o observador e o apogeu do minifoguete.



Fonte: Autor.

Onde  $\theta$  é o ângulo entre a reta que vai da posição onde está o observador até a posição do apogeu, e  $OL$  é a distância entre a posição do observador ( $O$ ) até o ponto de lançamento ( $L$ ) do MF.

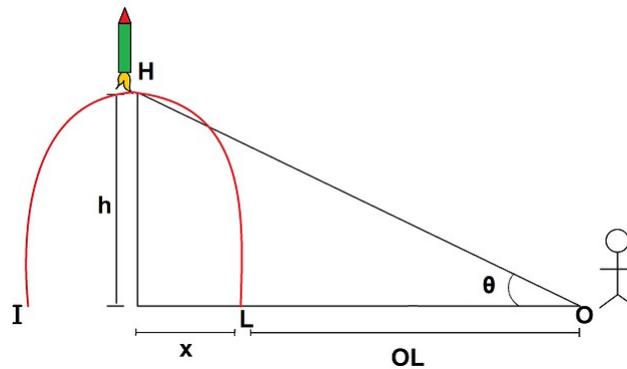
A relação trigonométrica que dá o valor do apogeu é  $tg(\theta) = \frac{h}{OL}$ , e isolando  $h$  encontramos a equação para o cálculo do apogeu, dada por:

$$h = \overline{OL}tg(\theta) \quad (13)$$

#### 4.6.4 Método B

A falha do método A se dá pela simplificação do voo ser apenas vertical, o que na prática não ocorre. Dessa forma, o método B busca solucionar esse problema considerando que há movimento horizontal. A Figura 25 exemplifica a visão lateral da trajetória percorrida pelo MF, a qual está indicada pela parábola em vermelho.

Figura 25 – Vista lateral entre o observador e o apogeu do minifoguete.



Fonte: Autor.

Sabendo que  $O$  é a posição do observador,  $L$  o ponto de lançamento e  $I$  o ponto onde o MF caiu após a operação, pode-se calcular o apogeu como:

$$h = tg(\theta) \sqrt{(\overline{OL} + x)^2 + \left(\frac{\overline{LI}}{2} \text{sen}(\beta)\right)^2} \quad (14)$$

#### 4.6.5 Método C

Seguindo o mesmo raciocínio que o método B apresentado na seção anterior, o método C busca corrigir o parâmetro que mede a distância entre a plataforma de lançamento e o apogeu. Ou seja, ao invés de utilizar a expressão  $\frac{\overline{LI}}{2}$  utiliza-se  $\frac{t_H}{t_I}\overline{LI}$ . Onde  $t_H$  é o tempo de voo entre a decolagem e o apogeu e  $t_I$  é o tempo entre a decolagem e o impacto. Portanto, a equação 14 fica:

$$h = tg(\theta)\sqrt{(\overline{OL} + x)^2 + \left(\frac{t_H}{t_I}\overline{LI}\text{sen}(\beta)\right)^2} \quad (15)$$

#### 4.6.6 Medições dos Lançamentos

Apresentados os métodos para o cálculo do apogeu, buscaremos agora apresentar a forma com que se obtém os parâmetros necessários para realizar estes cálculos. Vale ressaltar que, durante as apresentações nas escolas, esses métodos serão demonstrados de maneira didática.

Devem ser medidos os seguintes parâmetros antes e depois do voo do minifoguete:

$\overline{OL}$  Distância entre o observador e a plataforma de lançamento

$\overline{LI}$  Distância entre a plataforma de lançamento e o ponto de impacto após a queda do MF

$\gamma$  ângulo entre  $\overline{LN}$  e  $\overline{LO}$

$\lambda$  ângulo entre  $\overline{LN}$  e  $\overline{LI}$

$\theta$  ângulo lateral entre o observador e o apogeu (24)

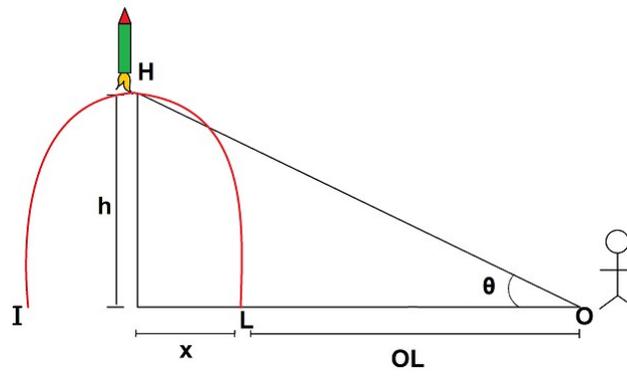
$t_H$  tempo de voo entre a decolagem e o apogeu

$t_I$  tempo entre a decolagem e o impacto

$\beta = 180^\circ + \gamma - \lambda$

A Figura 26 apresenta a relação entre os parâmetros necessários.

Figura 26 – Variáveis envolvidas na análise de voo.



Fonte: Autor.

## 5 Concepção do kit

### 5.1 *Custo de Produção*

A média de custo de um pacote com 12 unidades do apito de vara (fogo de artifício selecionado para a montagem) é de 20 reais (R\$ 1,66 por motor), ou vendidos separadamente, a custo médio de 2 reais. As borrachas ponteiadas podem ser adquiridas individualmente nas papelarias por aproximadamente R\$ 0,30. Fitas adesivas e folhas de papel também são encontrados em papelarias nos mais diferentes valores. Os itens do sistema de ignição podem ser utilizados em vários lançamentos. A bateria tem valor médio de R\$ 25, e o fio e skib variam em diferentes lugares.

### 5.2 *Caracterização do Motor*

O motor utilizado para a confecção do kit foi o apito de vara, um tipo de fogo de artifício que é facilmente encontrado em lojas de varejo. A figura 27 mostra a embalagem do motor utilizado para os testes estáticos, testes os quais estão disponíveis no site [www.foguete.ufpr.br](http://www.foguete.ufpr.br) no item "Testes Estáticos".

Figura 27 – Embalagem Apito de Vara



Fonte: MARCHI, C. H., 2016.

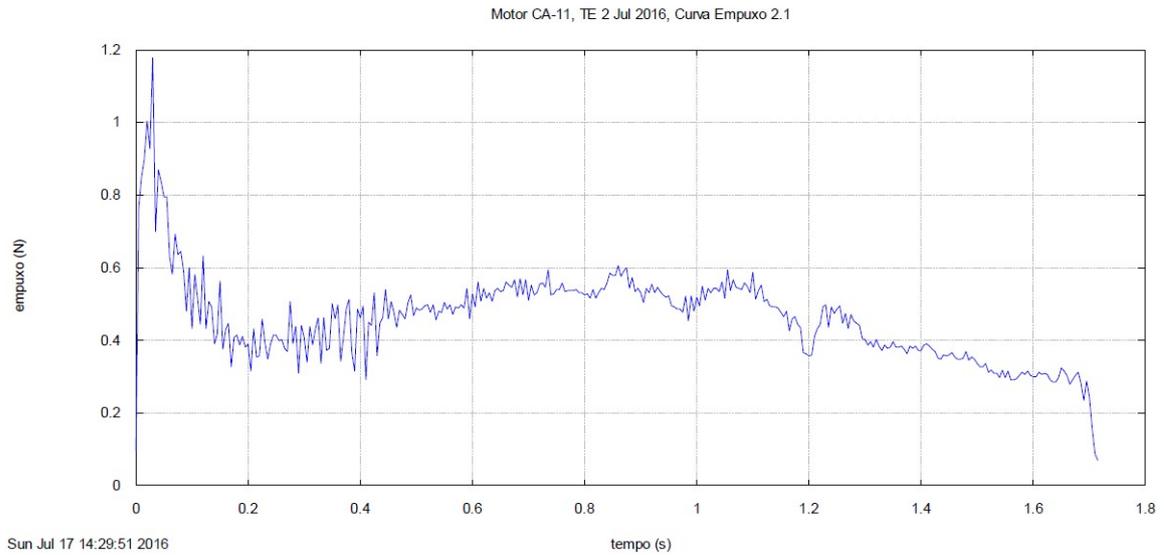
Os resultados dos testes estáticos podem ser visualizados na tabela 2, e uma das curvas de empuxo está apresentada na figura 28 como forma de exemplificar os valores apresentados na tabela.

Tabela 2 – Resultados Testes Estáticos Motor 1/2A0.5 – 0

Motor	$I_t$ (Ns)	Classe	$t_q$ (s)	$I_s$ (s)	$E_{med}$ (N)	$E_{max}$ (N)
CA-9	0,89	1/2A	1,875	21,4	0,45	1,00
CA-10	0,97	1/2A	1,895	23,0	0,51	1,07
CA-11	0,79	1/2A	1,715	20,7	0,46	1,18
CA-12	0,68	1/2A	1,620	18,6	0,41	0,96
CA-13	1,03	1/2A	2,060	22,4	0,50	1,33

Fonte: MARCHI, C. H., 2016.

Figura 28 – Curva de Empuxo Motor CA-11.



Fonte: MARCHI, C. H., 2016.

Dessa forma, com os devidos testes pode-se concluir que a classe real do motor é  $1/2A0.5 - 0$ , classificando-o como um motor de baixo impulso, visto que o seu impulso total varia de 0,626 a 1,25 Ns. Além disso, o empuxo médio é de aproximadamente 0,5N e não há a presença de carga temporizadora.

### 5.3 Etapas de Montagem

A montagem do minifoguete didático está dividida em 7 seções, que são explicadas detalhadamente no anexo A - Elaboração do kit:

- Montagem do corpo
- Corte das empenas
- Preparação do motor-foguete
- Integração do nariz com o tubo-foguete
- Integração das empenas
- União do tubo foguete e nariz com o motor e empenas
- Sistema de ignição

## 6 Conclusão

O ensino do foguetemodelismo nas escolas é uma excelente abordagem para impulsionar o programa espacial brasileiro, uma vez que populariza o estudo da indústria aeroespacial e incide na atração de jovens para a pesquisa científica, engenharia e astronáutica.

Por isso, a proposta experimental visa possibilitar que estudantes do ensino fundamental conheçam conceitos de física newtoniana e que os do ensino médio apliquem conceitos das Leis de Newton para um sistema de massa variável, além de introduzir conteúdos básicos de mecânica dos fluídos, estabilidade e desempenho em MF através da alteração de algumas superfícies. Assim, o ministrante do experimento poderá apresentar o projeto como uma proposta lúdica levando esses conceitos para a realidade das crianças e adolescentes.

Futuramente, no fim do cenário pandêmico, pretende-se aplicar tal metodologia para os estudantes de escolas públicas da região de Santa Maria, promovendo assim a divulgação das ciências espaciais de forma acessível para todos. Através de minicursos e palestras ministradas pelas integrantes do projeto, almeja-se estimular o interesse dos alunos pelo foguetemodelismo.

## Referências<sup>1</sup>

MILLIGAN, Tim V. *Technical Publication 16: What Type of Fin Shape is Best?*. Colorado Springs (Colorado, EUA): Apogee Components, 2016.

BENSON, Tom. *Rocket Stability*. NASA Oficial: Tom Benson, 13 de maio de 2021.

CRISTELLO, Josmar Baruffaldi. MENDES, Rafael de Moura Ferreira. **Otimização de Motores com Combustível Sólido para Minifoguetes**. Orientador: Alexandre Silva de Lima. 2017. Graduação - Engenharia Mecânica, Departamento de Educação Superior, Centro Federal de Educação Tecnológica Suckow da Fonseca (CEFET), Rio de Janeiro, 2017.

CROWELL, G. A. *The descriptive geometry of nose cones* — Kaunas University of Technology. Departamento universitário em Kaunas (Lituânia) 1996.

ESTES ROCKET LAB. *Model Rocket Engines*. ESTES, 2008.

GRUBIC, N., BADOVINAC, S., JOHRI, A. M. (2020). *Student mental health in the midst of the COVID-19 pandemic: A call for further research and immediate solutions*. International Journal of Social Psychiatry, 66(5), 517-518.

MARCHI, C. H. **Projeto e teste de minifoguete**. Curitiba: UFPR, 2020. Apostila. Disponível em <http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/apostila/>

MARCHI, C. H. **Desenvolvimento de kit didático de minifoguetes para difusão e popularização da Astronáutica**. Curitiba: UFPR, 2011.

MEETER, M., BELE, T., DEN HARTOGH, C., BAKKER, T., DE VRIES, R. E., PLAK, S. (2020). *College students' motivation and study results after COVID-19 stay-at-home orders*. PsyArxiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/kn6v9>

NAR. *National Association of Rocketry*. Disponível em: <<http://www.nar.org/>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

NISKANEN, S. *Open Rocket technical documentation*. 2013

PALMÉRIO, Ariovaldo Felix. **Introdução à Tecnologia de Foguetes** - São José dos Campos/SP: SindCT, 2017.

*The NASA Explorer Institute (NEI). Adventures in Rocket Science*. Huntsville (Alabama, EUA): *Educator Guide*, 2008. Acesso em 19 de Julho de 2021.

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

## Anexo A – Elaboração do kit

ATENÇÃO: A construção desse minifoguete deverá ser acompanhada sempre de um adulto responsável.

### 1 Lista de materiais

- Fita crepe 48 mm
- Fita crepe 18 mm
- Apito de vara - Fogo de artifício (potência de motor  $\frac{1}{2}A$ )
- Uma folha de papel A4
- 1 canudo de refrigerante
- 1 protetor de bolo ou outro papelão liso fino
- Uma borracha ponteira para lápis
- Skib
- Bateria 9V
- Fio  $1\text{ mm}^2$  de 10m de comprimento

### 2 Montagem

- Montagem do tubo-foguete  
Enrole a folha de papel em sentido horizontal, com 12mm de diâmetro, e cole um pedaço de fita para fixar.
- Corte das empenas  
Para as três empenas, corte o protetor de bolo em 38mm de largura e 25mm de envergadura;
- Preparação do motor-foguete
  1. Retire a vara do fogo de artifício e quaisquer outros papéis e adesivos da embalagem;

2. Descarte a bomba, para que não haja explosões.

- Integração do nariz com o tubo-foguete

Junte a borracha na ponta do corpo do foguete com fita crepe;

- Integração das empenas

Prepare um transferidor na ponta do motor. Certifique-se de colocar as empenas com  $120^\circ$  entre as elas para um melhor desempenho, deixe a 3mm da borda do estopim.

- União tubo foguete e nariz com o motor e empenas

1. Aproveite o espaço disponível do motor para colocar o corpo e prenda com fita crepe, deixe o mais alinhado possível;

2. Para o tubo guia, corte um canudo ao meio e anexe ao corpo do foguete, no meio.

Isso servirá para manter o minifoguete preso em uma vara e permanecer em uma trajetória reta no lançamento.

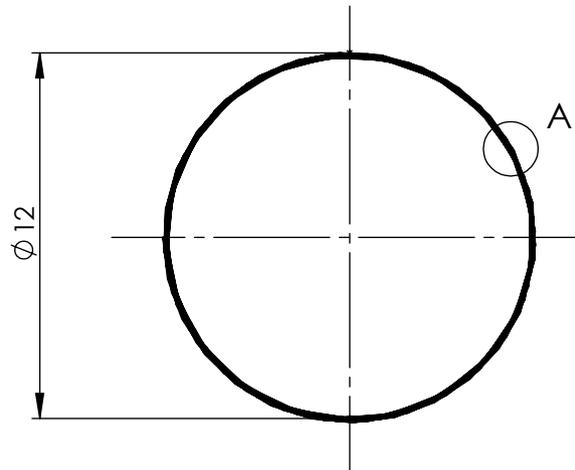
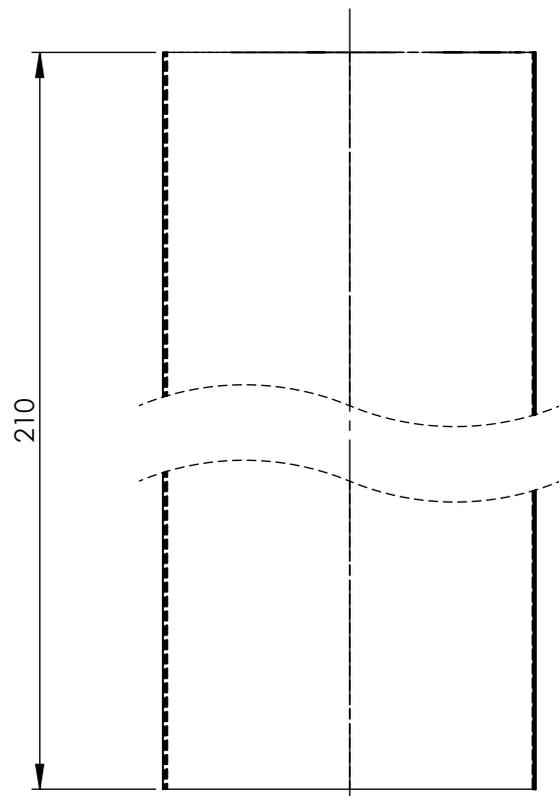
- Sistema de ignição

Unir o fio ao skib e conectá-lo na carga propulsora. A outra extremidade desse fio deverá ser conectada na bateria **somente** na hora do lançamento a uma distância segura (10 m) do minifoguete.

## **Anexo B – Desenhos técnicos do Minifoguete**

A seguir, foram realizados os desenhos técnicos dos componentes do minifoguete, individuais e a respectiva integração destes. Cabe ressaltar que as medidas de massa das peças são apenas aproximações.

INTERVALO CLASSE		TABELA DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS				ÂNGULO
		6 a 30	30 a 120	120 a 400	400 a 1000	
	FINO	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5°
⊗	MÉDIO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°
	GROSSO	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±2°



DETALHE A  
ESCALA 20 : 1

	NOME	ASSINATURA	DATA
DES.	NICOLE		18/08/2021
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

1960

MATERIAL:  
Papel Sulfite (A4)

PESO: 0,005 Kg

TÍTULO:  
CORPO MINI FOGUETE

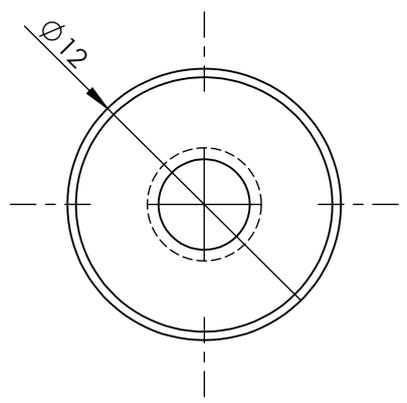
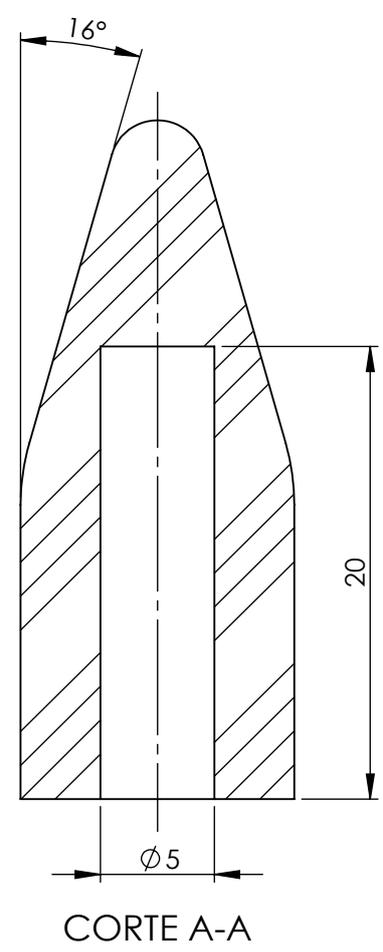
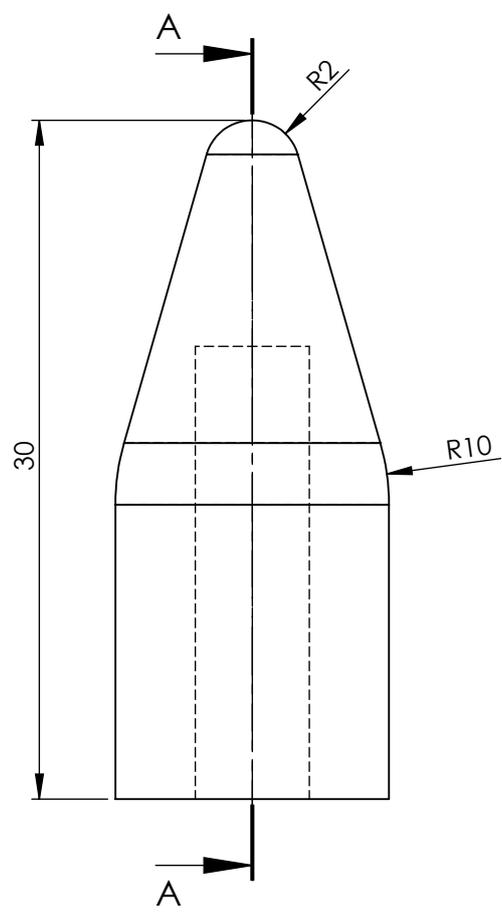
DES. Nº  
**MF001**

ESCALA: 4:1

REVISÃO: A

A4

INTERVALO CLASSE		TABELA DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS				ÂNGULO
		6 a 30	30 a 120	120 a 400	400 a 1000	
	FINO	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5°
⊗	MÉDIO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°
	GROSSO	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±2°



	NOME	ASSINATURA	DATA
DES.	NICOLE		18/08/2021
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			



MATERIAL:  
Borracha natural

PESO: 0.001 Kg

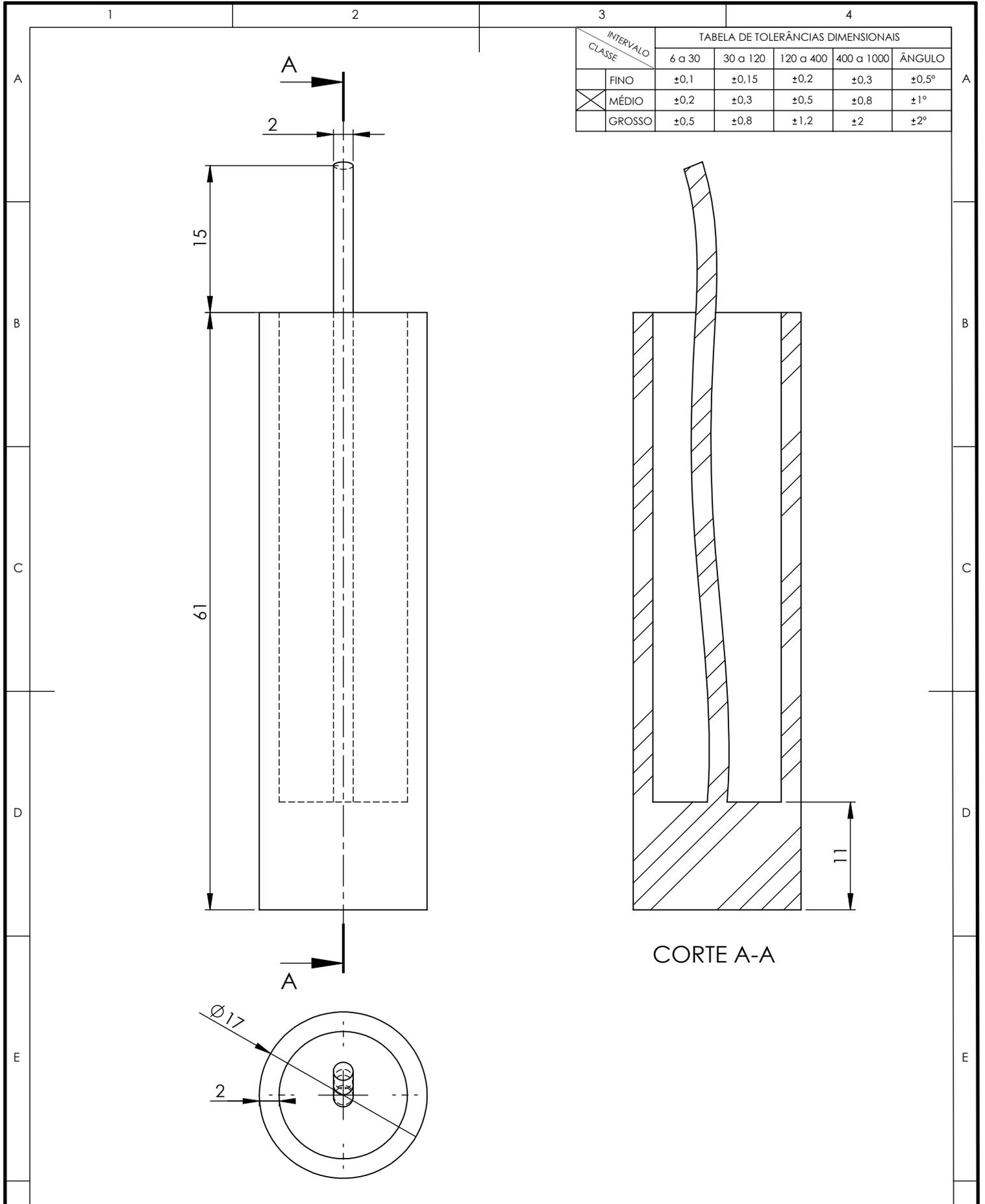
TÍTULO:  
**NARIZ MINI FOGUETE**

DES. Nº  
**MF002**

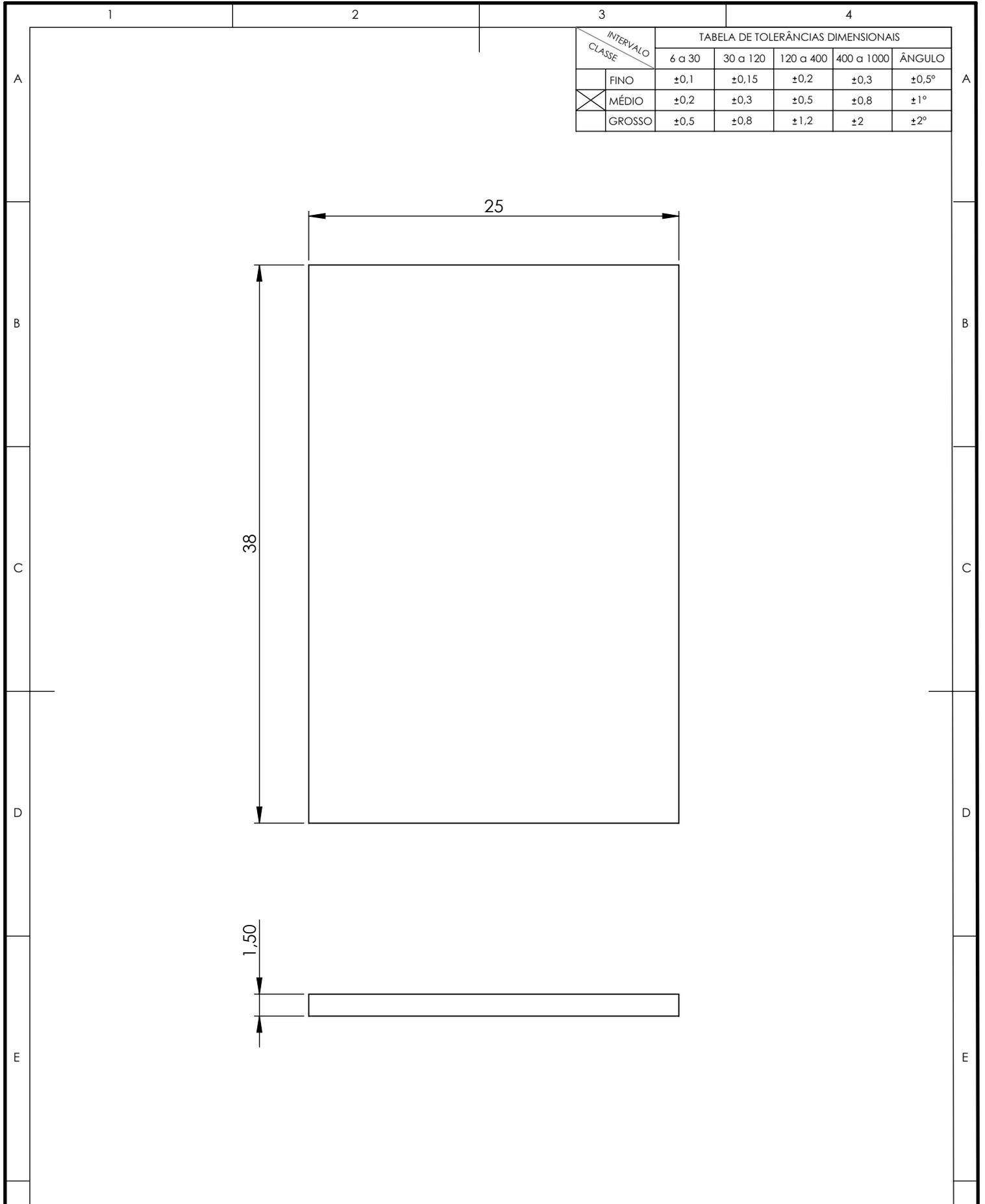
ESCALA: 3:1

REVISÃO: A

A4



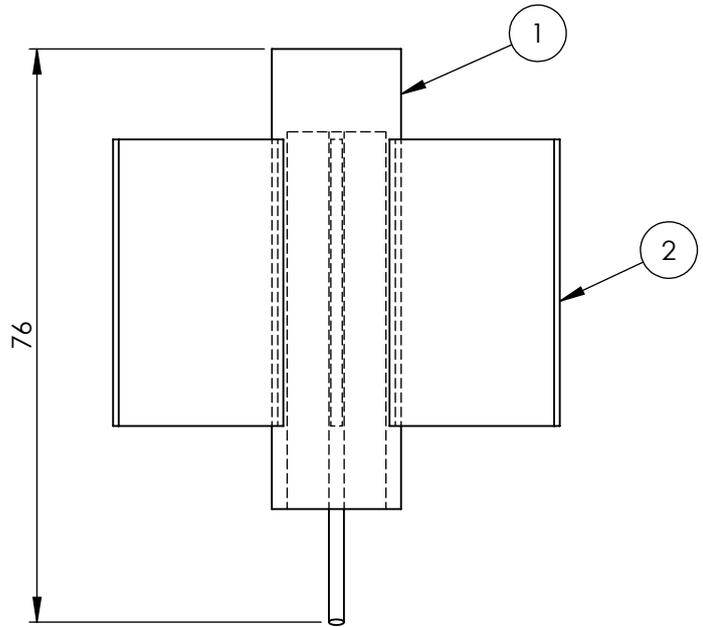
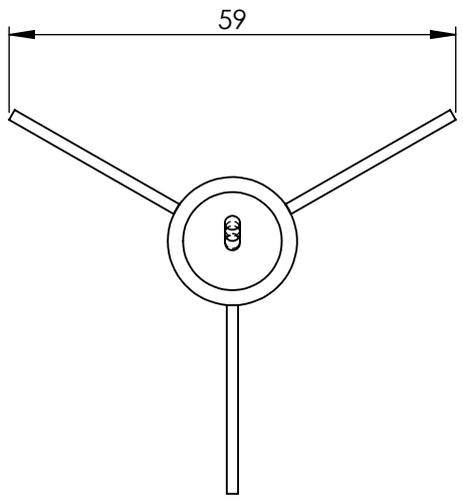
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA		TÍTULO:	
VERIF.	NICOLE		18/08/2021		MOTOR	
APROV.						
MANUF.						
QUALID.						
				MATERIAL:	DES. Nº	A4
				Fogo de artifício	MF003	
				PESO: 0,006 Kg	ESCALA: 2:1	REVISÃO: A



INTERVALO CLASSE		TABELA DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS				
		6 a 30	30 a 120	120 a 400	400 a 1000	ÂNGULO
	FINO	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5°
⊗	MÉDIO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°
	GROSSO	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±2°

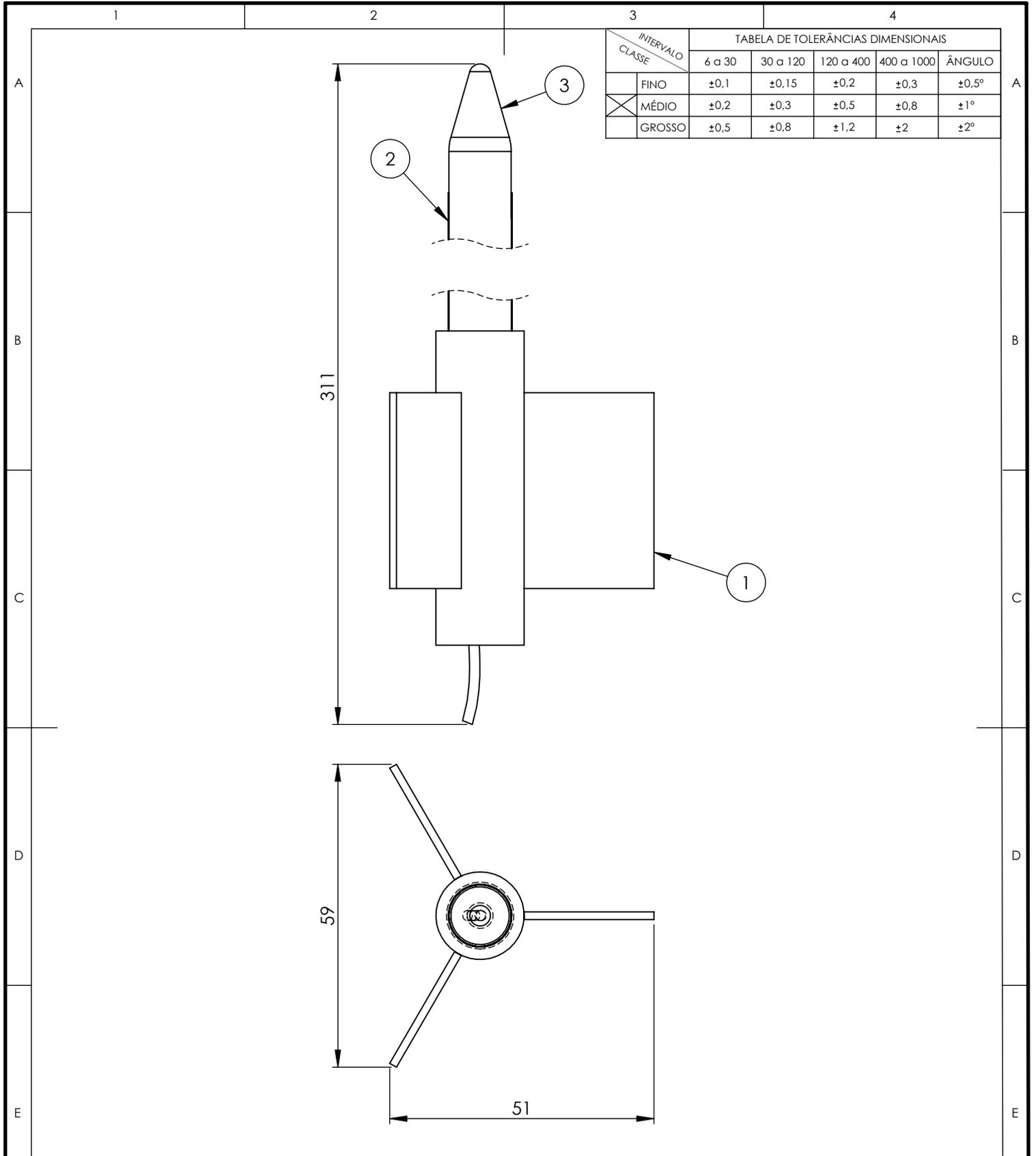
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA		TÍTULO:	
VERIF.	NICOLE		18/08/2021		ALETA	
APROV.						
MANUF.						
QUALID.						
				MATERIAL:	DES. Nº	
				Papel canelado	MFO04	A4
				PESO: 0,002 Kg	ESCALA: 3:1	REVISÃO: A

INTERVALO CLASSE		TABELA DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS				
		6 a 30	30 a 120	120 a 400	400 a 1000	ÂNGULO
	FINO	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5°
⊗	MÉDIO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°
	GROSSO	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±2°



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	MF003	MOTOR	1
2	MF004	ALETA	3

DES.	NOME	ASSINATURA	DATA		TÍTULO:	
VERIF.	NICOLE		18/08/2021		MOTOR COMPLETO	
APROV.						
MANUF.						
QUALID.						
MATERIAL:				DES. Nº	MF301	A4
PESO: 0,012 Kg				ESCALA: 1:1	REVISÃO: A	



INTERVALO CLASSE		TABELA DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS				
		6 a 30	30 a 120	120 a 400	400 a 1000	ÂNGULO
	FINO	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5°
⊗	MÉDIO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°
	GROSSO	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±2°

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	MF301	MOTOR COMPLETO	1
2	MF001	CORPO MINI FOGUETE	1
3	MF002	NARIZ MINI FOGUETE	1

DES.	NOME	ASSINATURA	DATA		TÍTULO:  <b>MINI FOGUETE</b>		
VERIF.	NICOLE		18/08/2021				
APROV.					DES. Nº  <b>MF401</b>		
MANUF.							A4
QUALID.							
MATERIAL:				PESO: 0,0165 Kg		ESCALA: 1:1	
						REVISÃO: A	