



**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO  
DE DESEMPENHO DE COMBUSTÍVEIS  
SÓLIDOS A BASE DE PARAFINA  
APLICADOS À FOGUETES E MÍSSEIS**

Por,  
**Lucas Zampietro Taddei**

Brasília, Novembro de 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS A BASE DE PARAFINA APLICADOS À FOGUETES E MÍSSEIS

POR,

**Lucas Zampietro Taddei**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico

### **Banca Examinadora**

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras

UnB/ENM (Orientador)

Prof. Dr. Olexy Shinkarenko

Dr. Fábio Ganância

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Brasília, Novembro de 2019

### **Dedicatória**

Este trabalho é dedicado à minha família, que sempre me incentivou a buscar os meus objetivos e sonhos e me deu totais condições para isso.

## Agradecimentos

Ao concluir um trabalho que significa o fim de um ciclo e o começo de outro para mim, é importante destacar todas as pessoas que me apoiaram, me ajudaram e me incentivaram nessa jornada quase eterna que está sendo a minha passagem pela UnB. Primeiramente, preciso agradecer aos meus pais. Obrigado por me darem sempre tudo o que esteve ao alcance de vocês sem medir esforços, mas principalmente educação, amor, carinho, respeito e toda a dedicação desse mundo. Eu sou quem sou e cheguei onde cheguei devido à vocês. Assim como meus pais, meu irmão merece todos os meus agradecimentos. Obrigado por ser esse cara que me inspira com a sua determinação e por me garantir que posso contar com você à qualquer momento. À minha avó e ao resto da minha família que nunca deixaram de me apoiar, muito obrigado. À pessoa que esteve ao meu lado nos momentos bons, ruins, importantes, engraçados, chatos e nunca deixou de me apoiar, Geovana, milhões de muito obrigados. Você me levantou quando eu precisei, me deu as broncas que precisei ouvir, os puxões de orelha que precisei levar e o amor que nem sei se merecia ganhar. Você é muito importante pra mim e também para os resultados que alcancei durante esses três anos em que pudemos conviver até agora, obrigado. Aos companheiros de curso que me fizeram evoluir e me ajudaram a estudar e a aprender cada dia mais, meus sinceros agradecimentos. Afinal, ninguém se forma sozinho! Não posso deixar de agradecer ao meu Professor Orientador Carlos Gurgel, que acreditou na minha capacidade e me deu a oportunidade de realizar esse trabalho. Agradeço também aos doze amigos que nunca deixaram de me apoiar independente da situação, valendo também para a minha grande jornada estudando engenharia para me tornar um engenheiro mecânico. Por fim, agradeço à mim mesmo por nunca ter desistido. Passei por momentos difíceis, caí inúmeras vezes, mas sempre levantei e fui atrás do meu objetivo, que é me tornar um engenheiro mecânico.

## **Resumo**

Este trabalho apresenta, primeiramente, uma revisão técnico-científica do estado da arte da parafina sólida como combustível de alto desempenho para motor foguete e estado-reator, passando por métodos de avaliação de grãos de combustível compostos desse material. Além disso, propõe e avalia um método de fabricação para combustível sólido à base de parafina e, por fim, avalia a possibilidade de inserção de cera de carnaúba como aditivo para a parafina na composição dos grãos. Ensaio foram propostos e realizados, como a utilização de um grão de parafina com 5% de cera de carnaúba em sua composição para combustão em uma bancada conceituada de testes, avaliação da presença de bolhas de ar no interior do grão de combustível, aumento ou decréscimo da dureza e da taxa de regressão de corpos de prova possuindo cera de carnaúba em diversas concentrações como aditivo juntamente à parafina e a comparação de 2 métodos de fabricação de grãos com o método proposto. Os resultados obtidos foram positivos para a utilização da cera de carnaúba como aditivo e para a utilização do método de fabricação utilizando a bancada proposta e construída, encorajando a inserção de ceras vegetais na pesquisa da otimização de grãos de combustível sólido para utilização em motores de propelentes híbridos para foguetes e estado-reatores.

**PALAVRAS CHAVE: Parafina, Foguete Híbrido, Cera de Carnaúba, Métodos de Fabricação, Aditivos Para Parafina.**

## **Abstract**

This work presents, at first, a technical-scientific review of the state of the art of solid paraffin as a high-performance fuel for rocket engines and ramjets, going through methods of evaluation for fuel grains composed of this material. In addition, it proposes and evaluates a manufacturing method for paraffin-based solid fuel and, finally, evaluates the possibility of inserting carnauba wax as an additive for paraffin in the grain composition. Tests were proposed and carried out, such as the use of a paraffin grain with 5 % of carnauba wax in its composition for combustion in a reputable test bench, evaluation of the presence of air bubbles inside the fuel grain, increase or decrease in hardness and regression rate of specimens containing carnauba wax in various concentrations as an additive together with paraffin and the comparison of 2 methods of grain production with the proposed method. The results obtained were positive for the use of carnauba wax as an additive and for the use of the manufacturing method using the proposed and constructed bench, encouraging the insertion of vegetable waxes in the search for optimization of solid fuel grains used in hybrid propellant engines for rockets and ramjets.

**KEYWORDS: Paraffin, Hybrid Rocket, Carnauba Wax, Manufacturing Methods, Paraffin Additives.**

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E MOTIVAÇÃO . . . . .	1
1.1.1 Parafina Como Combustível Sólido em Foguetes Híbridos . . . . .	3
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO . . . . .	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
2.1 FUNCIONAMENTO DE FOGUETES . . . . .	5
2.1.1 Propulsão Híbrida . . . . .	6
2.2 <i>RAMJET</i> . . . . .	8
2.3 TEORIA CLÁSSICA DA COMBUSTÃO HÍBRIDA . . . . .	10
2.4 TEORIA NÃO-CLÁSSICA DA COMBUSTÃO HÍBRIDA . . . . .	12
2.5 IMPULSO ESPECÍFICO . . . . .	14
2.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS . .	15
2.6.1 Taxa de Regressão . . . . .	15
2.6.1.1 Cálculo Experimental da Taxa de Regressão . . . . .	16
2.6.1.2 Cálculo Teórico da Taxa de Regressão . . . . .	17
2.6.1.3 Taxa de Regressão da Parafina . . . . .	18
2.6.2 Dureza . . . . .	19
2.6.2.1 Dureza e Microdureza Vickers . . . . .	21
2.6.3 Homogeneidade . . . . .	22
2.6.4 Geometria de Grão . . . . .	22

---

2.7	PARAFINA . . . . .	22
2.7.1	Propriedades . . . . .	23
2.8	CERA DE CARNAÚBA . . . . .	24
2.8.1	Cera de Carnaúba Como Aditivo . . . . .	25
2.8.2	Propriedades . . . . .	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E MATERIAIS</b>	<b>26</b>
3.1	FABRICAÇÃO DE GRÃOS . . . . .	26
3.1.1	Métodos de Fabricação de Grãos Funcionais . . . . .	26
3.1.1.1	Método de Fabricação 1 . . . . .	27
3.1.1.2	Método de Fabricação 2 . . . . .	28
3.1.1.3	Método de Fabricação Proposto . . . . .	28
3.1.2	Bancada de Fabricação de Grãos Funcionais . . . . .	29
3.1.2.1	Elementos do Sistema . . . . .	30
3.1.2.1.1	Resumo de Componentes . . . . .	31
3.1.2.2	Funcionamento da Bancada . . . . .	31
3.1.2.3	Aceleração Centrífuga . . . . .	32
3.1.3	Relação Massa-Dimensão do Grão Funcional . . . . .	33
3.1.4	Corpos de Prova para Ensaio de Dureza . . . . .	34
3.1.5	Corpos de Prova para Estudo de Taxa de Regressão . . . . .	35
3.2	ENSAIOS . . . . .	37
3.2.1	Ensaio de Combustão Preliminar . . . . .	37
3.2.1.1	Bancada de Testes de Combustão . . . . .	38
3.2.2	Passos Pós Solidificação . . . . .	40
3.2.3	Investigação de Bolsas de Ar . . . . .	40
3.2.3.1	Definição do Volume de Cada Seção Transversal . . . . .	41
3.2.3.2	Passo à Passo do Ensaio . . . . .	42
3.2.4	Ensaio de Combustão com Foco em Taxa de Regressão . . . . .	42
3.2.5	Ensaio de Microdureza Vickers . . . . .	43
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>46</b>
4.1	COMBUSTÃO PRELIMINAR . . . . .	46
4.2	MÉTODOS DE FABRICAÇÃO . . . . .	47



---

4.2.1	Método de Fabricação 1 . . . . .	47
4.2.2	Método de Fabricação 2 . . . . .	50
4.2.3	Método de Fabricação Proposto . . . . .	54
4.2.4	Investigação de Bolhas de Ar . . . . .	56
4.3	DUREZA . . . . .	57
4.4	TAXA DE REGRESSÃO . . . . .	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
5.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros . . . . .	63
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

1	Esquema de funcionamento de um motor híbrido (LACAVA; BARROS, 2010) . . .	2
2	<i>SpaceShipTwo</i> , da <i>Virgin Galactic</i> , ( <a href="https://futurism.com/virgin-galactic-spaceshiptwo-vss-unity-fifth-test-flight">https://futurism.com/virgin-galactic-spaceshiptwo-vss-unity-fifth-test-flight</a> ) . . . . .	2
3	Aeronave SR-71 Blackbird ( <a href="https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-030-DFRC.html">https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-030-DFRC.html</a> ) . . . . .	3
4	Esquemas de FPL e FPS . . . . .	6
5	Esquema da Configuração Híbrida [ <a href="http://www.machinedesign.com">www.machinedesign.com</a> (Com Adaptações)]	7
6	Teste de Motor com Propelente Híbrido [Jose Stevens/SPG] . . . . .	7
7	Teste de Míssil <i>Ramjet</i> com Combustível Sólido [ <a href="https://www.thehindubus.com">https://www.thehindubus.com</a> ] . . . . .	9
8	Esquema de Combustão em <b>Ramjets</b> com Combustível Sólido e Oxidante Líquido [Krishnan e George 1998] (adaptado) . . . . .	9
9	Esquema de Combustão em Propelentes Híbridos [Gomes, Rocco e Rocco 2015] (adaptado) . . . . .	11
10	Comportamento da taxa de regressão em função da magnitude de $G_O$ (PASTRONE, 2012) . . . . .	12
11	Camada líquida e gotículas reagentes com o fluxo de oxidante. (CASTANOS, 2012) (Adaptado) . . . . .	13
12	Camada líquida formada na combustão de combustíveis como a parafina. (KARABEYOGLU; ALTMAN; CANTWELL, 2002) (Adaptado) . . . . .	14
13	Tabela com resultados experimentais de $a$ e $n$ e suas aplicações - (PASTRONE, 2012) . . . . .	18
14	Exemplo de tabela de comparação de durezas - [ <a href="http://www.mitsubishicarbide.com/">http://www.mitsubishicarbide.com/</a> ]	20
15	Tabela utilizada para a conversão de medidas de impressão à escalas de dureza. [Fonte: (CALLISTER, 2008)] . . . . .	21
16	Parafina em Forma Granulada Utilizada no Trabalho . . . . .	23
17	Parafina em Forma Granulada Utilizada no Trabalho . . . . .	23

18	Palmeira Carnaúba. [Fonte: <a href="http://www.cerratinga.org.br/carnauba/">http://www.cerratinga.org.br/carnauba/</a> ] . . . . .	24
19	Cera de Carnaúba em Forma Granulada . . . . .	25
20	Processo adotado para definição do melhor método de fabricação . . . . .	27
21	Projeto Renderizado da Bancada de Construção de Grão . . . . .	29
22	Bancada de Construção de Grão . . . . .	30
23	Polias utilizadas para transmissão de potência do motor elétrico para o eixo de acionamento da bancada de fabricação de grãos . . . . .	33
24	Pequeno tubo de plástico utilizado para a fabricação de corpos de prova . . . . .	35
25	Pavio utilizado para ensaios de análise de taxa de regressão . . . . .	36
26	Exemplos de corpos de prova utilizados para estudo de taxa de regressão . . . . .	36
27	Bancada de Testes de Combustão . . . . .	38
28	Bancada de Testes de Combustão, Foto Real, [Furiatti e Alves, 2019] . . . . .	39
29	Aparato de Aquisição e Leitura de Dados, Foto Real, [Furiatti e Alves, 2019] . . . . .	40
30	Configuração utilizada para a definição do volume das seções transversais de grãos . . . . .	42
31	Equipamento utilizado para ensaios de microdureza . . . . .	43
32	Corpos de prova utilizados na primeira rodada de ensaios de microdureza Vickers . . . . .	44
33	Corpos de prova utilizados na primeira rodada de ensaios de microdureza Vickers . . . . .	45
34	Grão antes do ensaio . . . . .	46
35	Grão após o ensaio . . . . .	47
36	Teste de Combustão Realizado na Bancada da FGA, [Furiatti e Alves, 2019] . . . . .	47
37	Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 1 . . . . .	48
38	Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 1 . . . . .	48
39	Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 1 . . . . .	49
40	Grão produzido pelo Método de Fabricação 1 após tentativa de furo com broca . . . . .	49
41	Bolhas de ar no grão produzido pelo Método de Fabricação 1 . . . . .	50
42	Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 2 . . . . .	51
43	Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 2 . . . . .	52
44	Tubo de PVC e tubo interno para criação do furo passante do Método de Fabricação 2 . . . . .	53
45	Visão próxima do grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 2 . . . . .	54
46	Grão fabricado utilizando Método de Fabricação Proposto . . . . .	55

---

47	Grão fabricado utilizando Método de Fabricação Proposto . . . . .	55
48	Grão fabricado utilizando Método de Fabricação Proposto . . . . .	55
49	Resultado para o corpo de prova de parafina pura na primeira rodada de ensaios	58
50	Resultado para o corpo de prova de cera de carnaúba pura na primeira rodada de ensaios . . . . .	58
51	Resultado para o corpo de prova com 5% de cera de carnaúba na primeira rodada de ensaios . . . . .	59
52	Curva Microdureza Vickers <i>VS</i> Concentração de Cera de Carnaúba . . . . .	60
53	Resultado da segunda rodada de ensaios para a cera de carnaúba pura . . . . .	61

## LISTA DE TABELAS

1	Dimensões desejadas para um grão funcional . . . . .	27
2	Especificações do Motor Elétrico da Bancada de Fabricação de Grãos . . . . .	31
3	Massa de parafina a ser vazada para a tubo de PVC de fabricação de acordo com o método utilizado . . . . .	34
4	Dimensões do recipiente utilizado para aferição de volume . . . . .	41
5	Resultados obtidos após fabricação de grão utilizando o Método de Fabricação 1, anteriores à tentativa de furo com broca . . . . .	50
7	Resultados obtidos após fabricação de grão utilizando o Método de Fabricação 2	52
8	Resultados obtidos após fabricação de grão utilizando o Método de Fabricação Proposto . . . . .	56
9	Resultados obtidos nos ensaios de cada seção do grão fabricado pelo método 2 . .	56
10	Resultados obtidos nos ensaios de cada seção do grão fabricado pelo método proposto . . . . .	56
11	Resultados obtidos após primeira rodada de ensaios de dureza. Escala de medida: HV . . . . .	57
12	Resultados obtidos após segunda rodada de ensaios de dureza. Escala de medida: HV . . . . .	59
14	Dados do primeiro teste de queima . . . . .	61
16	Dados do segundo teste de queima . . . . .	62
18	Dados do terceiro teste de queima . . . . .	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$\dot{m}$	Vazão Mássica
$\dot{r}$	Taxa de Regressão
$A_c$	Área da Câmara de Combustão
$A_e$	Área da Saída
$A_n$	Área do Bocal
$a_{cp}$	Aceleração Centrípeta
$c_p$	Calor Específico à Pressão Constante
$D_{eg}$	Diâmetro Externo do Grão
$D_e$	Diâmetro Externo
$D_{ig}$	Diâmetro Interno do Grão
$D_i$	Diâmetro Interno
$E$	Empuxo
$F$	Força
$g$	Aceleração da Gravidade
$G_{ar}$	Vazão Mássica de Oxidante por Unidade de Área
$I_{sp}$	Impulso Específico
$L_g$	Comprimento do Grão
$p_0$	Pressão Ambiente
$p_e$	Pressão na Saída
$r$	Raio
$t$	Tempo

$V_e$  Velocidade de Gases na Saída

### **Símbolos Gregos**

$\omega$  Velocidade de Rotação

$\omega_{med}$  Velocidade de Rotação Média

# CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E MOTIVAÇÃO

Os foguetes surgiram no oriente, mais especificamente na China, após o início da utilização da pólvora. Eram utilizados primeiramente para funções bélicas, em forma dos conhecidos mísseis. Somente em meados do século 20, os princípios de funcionamento dos foguetes começaram a ser estudados e realmente compreendidos e, a partir daí, novas aplicações vieram à tona. A evolução dessa tecnologia, paralelamente ao amadurecimento da possibilidade de viagens espaciais, fez com que foguetes com ambições maiores começassem a ser desenvolvidos. Anos depois, ainda surgiram os satélites e, com eles, a necessidade de colocá-los em órbita, impulsionando ainda mais o desenvolvimento tecnológico dessa maneira de movimentar veículos.

Após o significativo avanço de foguetes com propelentes sólidos (FPS) e líquidos (FPL), foram desenvolvidos os motores híbridos, que utilizam combustível em estado diferente do oxidante e, caracterizado em sua forma clássica pela presença de combustível sólido e oxidante líquido, são o foco deste trabalho. Propelentes híbridos são reconhecidos por apresentar algumas vantagens em relação aos seus "concorrentes" FPS e FPL. Segundo (OIKNINE, 2006), podemos citar como benefício a segurança de um combustível sólido separado de seu oxidante, tornando a possibilidade de explosões significativamente menores e facilitando, além da manufatura, o manuseio e armazenamento. Assim, o custo envolvendo todos esses processos é também menor. Ainda segundo o autor, os foguetes com propelentes híbridos (FPH) possuem a possibilidade de religamento do motor, como é feito, por exemplo, em um de automóvel. Esses fatos, atrelados à possibilidade de utilização de diferentes combustíveis e aditivos que podem elevar o rendimento, baratear os custos e serem ecologicamente menos danosos, justificam o interesse na pesquisa e desenvolvimento dos FPH.

Levando em consideração todas as vantagens apresentadas, percebe-se ao analisar a bibliografia sobre o tema que esse tipo de tecnologia ainda não possui espaço significativo no campo aeronáutico. Segundo (KARABEYOGLU, 2008), uma das explicações possíveis para isso é que, devido ao fato de a indústria já parecer confortável com as tecnologias existentes, poucos e pequenos grupos de profissionais que estudam propulsão de foguetes estão voltados para estudos



com propelentes híbridos, o que justifica a falta de maturidade dessa tecnologia. A Figura 1 mostra um esquema simplificado de funcionamento de um motor híbrido.

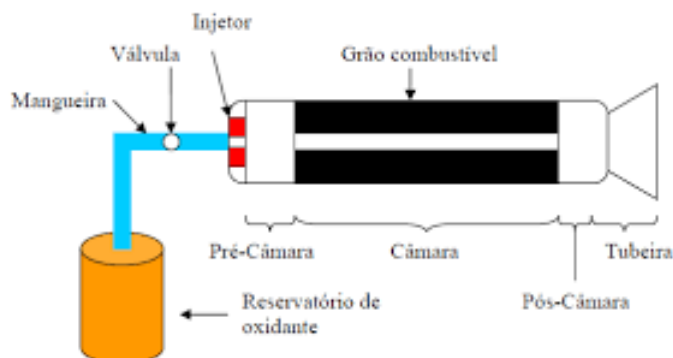


Figura 1: Esquema de funcionamento de um motor híbrido (LACAVAL; BARROS, 2010)

Recentemente alguns grupos vêm apostando e alcançando sucesso com a tecnologia híbrida, corroborando a afirmação positiva quanto ao futuro promissor no estudo desse tipo de motor. A companhia americana *Virgin Galactic* tem como objetivo proporcionar às pessoas a possibilidade de uma viagem espacial comercial. Seu veículo chamado *SpaceShipTwo*, exibido na Figura 2, é movimentado até a altitude de 50 mil pés pela aeronave *WhiteKnightTwo* e então se desprende para acionar seu motor híbrido, composto por combustível sólido e oxidante líquido, seguindo para entrar em órbita. A companhia ressalta em seu website (<https://www.virgingalactic.com/learn/>), comprovando o destacado anteriormente como uma qualidade, que o seu motor híbrido pode ser desligado e religado rapidamente e com segurança a qualquer momento do voo, tanto em órbita quanto no interior da atmosfera.



Figura 2: *SpaceShipTwo*, da *Virgin Galactic*, (<https://futurism.com/virgin-galactic-spaceshiptwo-vss-unity-fifth-test-flight>)

Assim como nos foguetes, a tecnologia híbrida pode também ser utilizada em *ramjets*. Esse tipo de motor à jato é bem compacto e não possui partes móveis, sendo muito utilizado em aplicações que não dispõem de muito espaço para alocação do sistema de propulsão, como mísseis. Apesar de serem utilizados majoritariamente em armamentos bélicos, podem ser en-

contrados também em alguns aviões, como SR-71 Blackbird, mostrado na Figura 3.



Figura 3: Aeronave SR-71 Blackbird (<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-030-DFRC.html>)

A maior diferença encontrada entre o motor híbrido de foguetes e de *ramjets* é o oxidante utilizado. Enquanto nos foguetes o oxidante é armazenado no interior de sua fuselagem e pode ser selecionado de acordo com a aplicação e rendimento, os *ramjets*, devido ao pequeno espaço disponível para alocação de sistemas internos, utilizam o ar atmosférico.

### 1.1.1 Parafina Como Combustível Sólido em Foguetes Híbridos

Os maiores problemas encontrados na utilização de combustíveis sólidos em sistemas de propulsão híbridos atualmente estão na qualidade estrutural do grão e na baixa taxa de regressão apresentada por eles. Recentemente, estudos como o de (PISCITELLI et al., 2018) vem mostrando que um material interessante para a resolução desses empecilhos é a parafina. Ela pode apresentar taxa de regressão até quatro vezes superior à do tradicional combustível sólido HTPB e, segundo (PISCITELLI et al., 2018) forma uma camada líquida hidrodinamicamente instável em sua superfície de fusão, o que é benéfico para a queima, e, em seguida, aumenta a taxa de regressão com o arrastamento de gotículas da interface líquido-gás. Porém, o material ainda peca em qualidade estrutural. Segundo (VEALE et al., 2017), a parafina é um material quebradiço, possui baixa resistência e corre o risco de apresentar falhas durante as condições extremas em que é submetida durante o lançamento de um foguete. Em contrapartida, sua utilização, em conjunto com a maneira com que os grãos são fabricados, pode proporcionar a qualidade estrutural necessária, além de permitir a adição de aditivos que são capazes de aprimorar ainda mais essa característica.

O que torna a parafina ainda mais motivadora para utilização é que, além da aplicação em foguetes, estudos como o de (AZEVEDO, 2018b) tem apresentado resultados interessantes do seu emprego como combustível sólido também para motores *ramjet*.

Somando todas essas informações, chega-se à conclusão de que o estudo da utilização da parafina como combustível sólido de motores híbridos é oportuno, tendo como espaço para pesquisa o sistema de fabricação e a utilização de aditivos que buscam o aumento da qualidade estrutural dos grãos propelentes.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como finalidade, primeiramente, fazer uma revisão técnico-científica do estado da arte da parafina sólida como combustível de alto desempenho para motor foguete e estado-reator. Ademais, propor um método de fabricação de grãos de combustível sólidos a base de ceras de origem fóssil e/ou vegetal com qualidade estrutural aceitável para a aplicação em motores de foguetes com propulsão híbrida. Finalmente, sugerir e avaliar a utilização da cera de carnaúba como aditivo à parafina, buscando atingir qualidade estrutural ainda superior.

## CAPITULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 FUNCIONAMENTO DE FOGUETES

A propulsão à jato é um meio de locomoção onde um corpo é acelerado por meio de uma força de reação causada pelo momento gerado a partir da ejeção de matéria. Usando esse conhecimento como base, foguete é uma classe de propulsão à jato que produz impulso ejetando matéria, conhecida como propelente, armazenada anteriormente em um veículo voador (SUTTON; BIBLARZ, 2010).

A fonte de energia mais utilizada na propulsão em foguetes é a combustão. A energia interna dos gases em alta pressão e temperatura, produtos da queima de propelentes químicos, é convertida em energia cinética quando os gases são acelerados à velocidades supersônicas através de um bocal na extremidade do corpo do veículo (SUTTON; BIBLARZ, 2010). A Terceira Lei de Newton é a responsável pela criação de um impulso no veículo, gerando uma força no sentido contrário ao dos gases expelidos.

O estado físico do propelente utilizado define a classificação do foguete. As mais utilizadas são as de Propelente Líquido e Propelente Sólido.

Na configuração líquida, um combustível na forma líquida é armazenado em uma estrutura separada do oxidante, também no estado líquido, e, durante o funcionamento do foguete, é injetado na câmara de combustão sob alta pressão. Produtos da combustão, os gases a alta pressão e temperatura são gerados e, conforme explicado no parágrafo anterior, geram o impulso responsável pela movimentação do veículo. FPL's exigem um sistema complexo de tubulações, bombas, válvulas e turbinas, além da própria estrutura da câmara de combustão, o que torna sua manufatura e utilização complicadas e mais caras.

Já na configuração sólida, o propelente é armazenado na fase sólida em uma geometria conhecida como grão. Esse grão é composto pela mistura combustível e oxidante e também é responsável por fazer o papel de câmara de combustão, razão pela qual possui um ou mais furos centrais passantes. A queima do propelente acontece de dentro pra fora e é caracterizada pela taxa de regressão dos materiais utilizados. Novamente, conforme explicado anteriormente, os gases da queima são os responsáveis pela geração do impulso que movimenta o veículo. Não

é necessária a utilização de válvulas, tubulações, bombas e turbinas, tornando a manufatura e utilização mais simples. Por outro lado, o fato de o grão conter tudo o que é necessário para que aconteça o processo de combustão causa um aumento significativo no perigo de explosão, tornando o manuseio e o armazenamento processos perigosos e caros.

Na Figura 4, exemplos simplificados de sistemas de FPL e FPS.

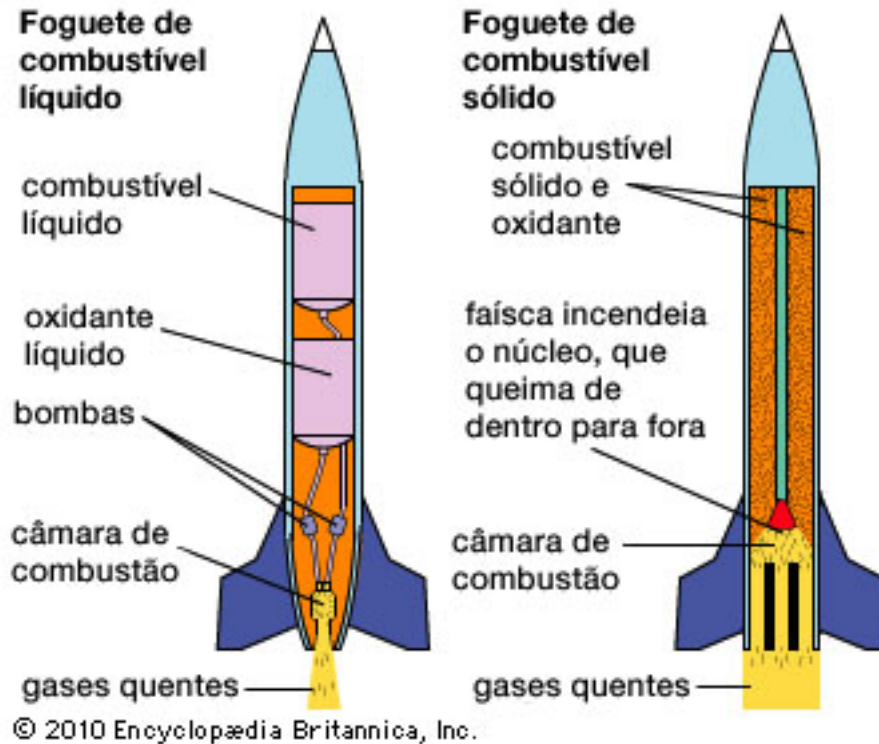


Figura 4: Esquemas de FPL e FPS

### 2.1.1 Propulsão Híbrida

Segundo (SUTTON; BIBLARZ, 2010), o que caracteriza um foguete com propulsão híbrida é a utilização de combustível e oxidante em estados físicos diferentes. A combinação mais comumente utilizada é a de oxidante em estado líquido e combustível em estado sólido, denominada configuração clássica. Além disso, o par de propelentes é armazenado em câmaras separadas. Diferentemente da configuração sólida, na configuração híbrida o grão de combustível sólido possui exclusivamente a substância combustível e, semelhantemente, seu interior, com um ou mais furos passantes, é utilizado como câmara de combustão. Em relação ao oxidante, sua injeção na câmara de combustão é feita de maneira semelhante a da configuração líquida, por intermédio de bombas e tubulações.

Ainda segundo (SUTTON; BIBLARZ, 2010), o propelente mais utilizado em sistemas de propulsão híbrida é a combinação oxigênio líquido e combustível HTPB (Hidroxila Terminada Polibutadieno) sólido. Apesar de sua larga utilização em FPS's, o HTPB não possui desempenho adequado para a tecnologia híbrida, visto que sua taxa de regressão não atinge valores desejáveis.

Na imagem Figura 5 está representado um foguete com propulsão híbrida clássico (oxi-

dante líquido e combustível sólido).

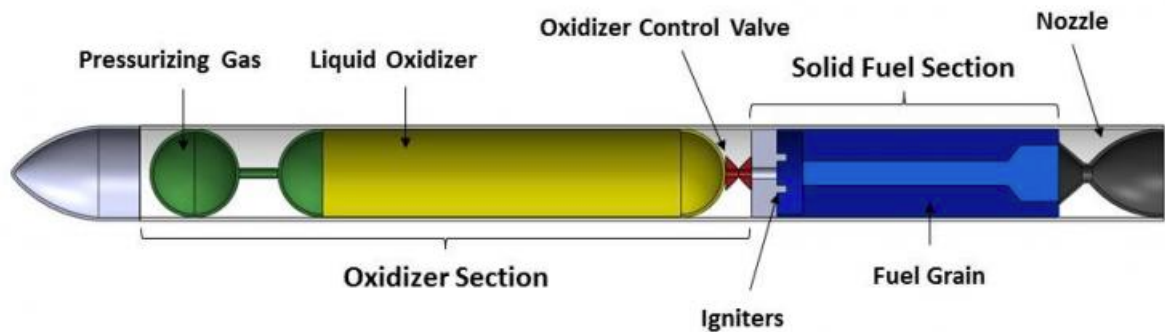


Figura 5: Esquema da Configuração Híbrida [www.machinedesign.com (Com Adaptações)]

Como ilustração do funcionamento real de um FPH, a Figura 6 mostra um teste deste tipo de propelente em bancada feita para ensaios.



Figura 6: Teste de Motor com Propelente Híbrido [Jose Stevens/SPG]

Na introdução deste trabalho, foram citadas algumas vantagens a respeito da utilização de propelentes híbridos em relação aos FPS e FPL. À seguir, são enumeradas estas e outras vantagens, além de desvantagens.

#### VANTAGENS:

- Segurança: o armazenamento de combustível e oxidante em locais diferentes torna o risco de uma explosão consideravelmente baixo;
- Propriedades estruturais do grão: combustíveis sólidos utilizados em FPH tornam possível a utilização de aditivos no grão buscando melhorias estruturais, o que não é interessante em combustíveis sólidos de FPS devido à sua mistura com o oxidante;

- Danos ambientais: devido a possibilidade da utilização de aditivos, é possível gerar uma combustão com menos ou até mesmo sem produtos danosos ao meio ambiente;
- A taxa de regressão apresentada em novos materiais utilizados em FPH, como a parafina, é superior à dos propelentes já estudados, como o HTPB.

#### DESVANTAGENS:

- Baixa taxa de regressão: os materiais tradicionalmente utilizados nesse tipo de motor, como o HTPB, possuem baixa taxa de regressão;
- A baixa taxa de regressão faz com que as geometrias de grão sejam complexas, com muitas portas de combustão, resultando em comprometimento da integridade do grão;
- Razão oxidante-combustível: a razão O/F pode sofrer variações ao longo do comprimento do grão devido ao aumento da porta de combustão;
- A queima desse propelente ocorre por uma chama de difusão. Esse tipo de queima pode ocasionar num baixo nível de mistura de oxidante-combustível, tendo como consequência uma possível perda na eficiência de impulso específico.

## 2.2 *RAMJET*

As aplicações sugeridas neste trabalho que miram foguetes podem também ser transferidas para motores *ramjet*. Esse é um motor a jato, mas extremamente compacto quando comparado aos outros tipos por não possuir compressor e turbina. Assim como nos motores de foguetes, pode conter dois tipos de propelentes, os sólidos e os líquidos. Diferentemente dos foguetes, nos propelentes sólidos o combustível e o oxidante não são armazenados misturados no mesmo grão. Portanto, enxerga-se uma semelhança entre esse tipo de *ramjet* e o FPH e este estudo pode ser aplicado à ambos os tipos de motores. Na Figura 7, um exemplo de utilização desse tipo de motor é ilustrado num teste de míssil.



Figura 7: Teste de Míssil *Ramjet* com Combustível Sólido  
[\[https://www.thehindubus.com\]](https://www.thehindubus.com)

Os *ramjets* também queimam através de uma chama de difusão, evaporando o combustível sólido em sua superfície interna e fazendo-o se misturar com o oxidante em escoamento para produzir mais chama. Assim como nos foguetes, características como taxa de regressão do combustível sólido, impulso específico e empuxo gerados são de suma importância para o sucesso do motor. A Figura 8 apresenta um esquema do desenho dos motores de *ramjets* sólidos, explicitando a criação da chama de difusão.

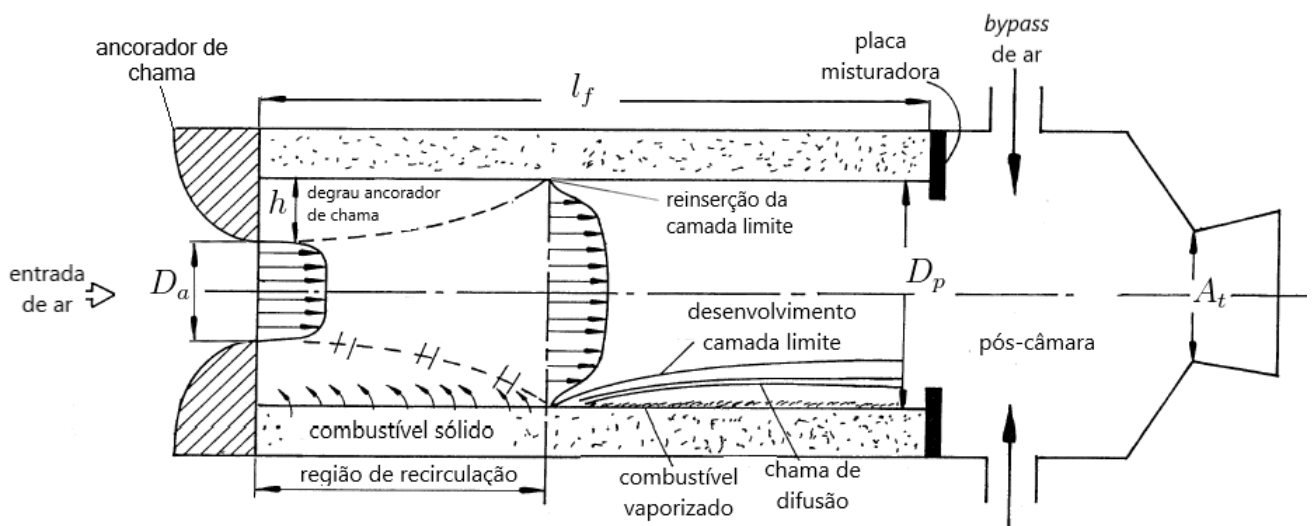


Figura 8: Esquema de Combustão em **Ramjets** com Combustível Sólido e Oxidante Líquido  
 [Krishnan e George 1998] (adaptado)



## 2.3 TEORIA CLÁSSICA DA COMBUSTÃO HÍBRIDA

De acordo com (HUMBLE, 1995), a combustão que ocorre em foguetes híbridos se diferencia daquela dos foguetes sólidos e dos líquidos. Nas configurações tradicionais, um elemento pequeno de volume na câmara de combustão contém uma mistura uniforme de combustível e oxidante. Já nos foguetes híbridos, a queima acontece com uma chama de difusão macroscópica. Nessa combustão, a razão oxidante-combustível (O/F) não é uniforme e varia ao longo do comprimento da zona de chama.

Segundo (SUTTON; BIBLARZ, 2010), como não há oxidante no grão sólido de combustível, a combustão ocorre na forma gasosa, o que ocasiona numa taxa de regressão significativamente diferente da encontrada em FPS.

Em seu estudo, (THEBA; VEALE; BEMONT, 2017) afirma que combustíveis sólidos de propelentes híbridos queimam por um processo de combustão resultante de fenômenos de sublimação, pirólise e vaporização, que são processos lentos e resultam nas baixas taxas de regressão experimentadas por combustíveis clássicos, como o HTPB. Ainda segundo esse estudo, uma solução adotada para mitigar esse problema é a utilização de múltiplas portas de combustão, aumentando a superfície de queima.

Nos casos mais comuns, um grão de combustível de propelente híbrido é inflamado por uma fonte de calor externa, ocasionando a gaseificação da superfície interna do material em sua extremidade dianteira. Simultaneamente, a adição do fluxo de oxidante faz com que a chama se espalhe e o motor é completamente acionado. Em alguns casos especiais de combustíveis sólidos, a ignição pode ser feita espontaneamente às condições normais de temperatura e pressão somente com o *spray* do oxidante.

(MARXMAN, 1965) afirma que a combustão em propelentes híbridos se dá pela chama de difusão turbulenta. Nesse modelo, as reações ocorrem em uma faixa infinitesimal da chama, onde há a formação de uma camada limite turbulenta, conhecida como "Frente de Chama". A transferência de calor da chama para a superfície sólida do combustível faz com que ocorra sua vaporização, ocasionando o processo de combustão.

A Figura 9 ilustra o processo de combustão:

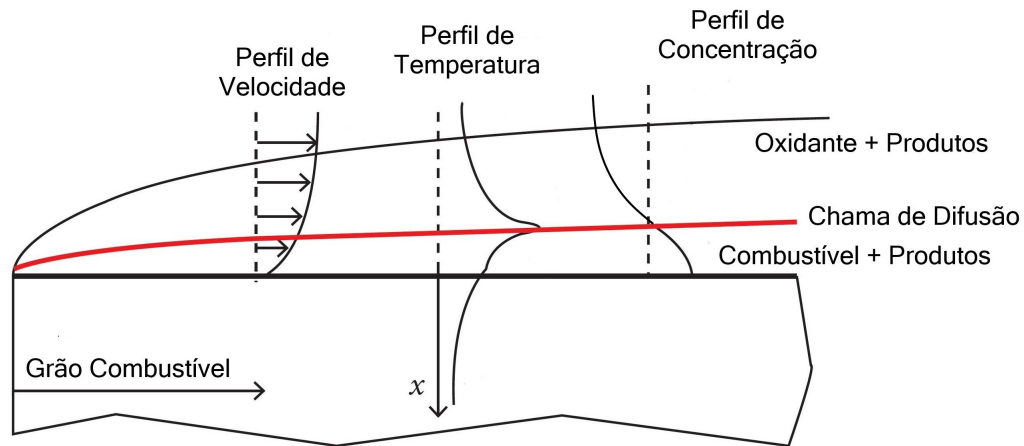


Figura 9: Esquema de Combustão em Propelentes Híbridos [Gomes, Rocco e Rocco 2015] (adaptado)

Ao observar o perfil de temperatura na imagem, percebe-se que na chama de difusão é apresentada a maior magnitude. Conforme dito no parágrafo anterior, o grão combustível e o combustível evaporado possuem temperatura inferior. Acima da chama, a temperatura possui níveis inferiores novamente, dessa vez no fluxo de oxidante, que escoou à altas velocidades.

A concentração de combustível e oxidante na mistura é variável. A curva nos mostra que, quanto mais distante do grão, menor é a quantidade de combustível e maior a de oxidante, sendo a primeira máxima na superfície do grão e a segunda no centro do escoamento. No ponto da chama, existe a razão estequiométrica perfeita para que ela aconteça e, segundo (SUTTON; BIBLARZ, 2010), sua largura é função da taxa com que a reação de oxidação ocorre.

Segundo (MARXMAN; WOOLDRIDGE; MUZZY, 1964), a combustão de combustíveis em propelentes híbridos é modelada como uma chama difusa turbulenta, onde as reações ocorrem internamente à camada limite formada.

Conforme pode ser visto na Figura 9, acima da superfície do grão combustível, mas ainda dentro da camada limite, é formada a chama de difusão e, abaixo dela, uma camada de vapor de combustível, produto de um processo de sublimação. Essa camada de combustível líquido está a uma temperatura baixa em relação à chama, tornando-se uma espécie de isolante térmico. Assim, a transferência de calor da chama para a superfície do grão é dificultada. A magnitude dessa dificuldade pode ser apontada como uma das caracterizadoras da alta ou baixa taxa de regressão do combustível em questão, já que, segundo (MARXMAN; WOOLDRIDGE; MUZZY, 1964), é essa transferência de energia térmica da chama para a superfície do grão a causadora da evaporação do combustível antes que ele se misture com o oxidante para dar continuidade à combustão.

O trabalho de (PASTRONE, 2012), se baseando em (MARXMAN; WOOLDRIDGE; MUZZY, 1964), mostra que a taxa de regressão de um combustível é controlada por essa transferência de energia térmica para o grão. Assim, aplicando um balanço de fluxos à superfície interna do combustível, encontra-se o que é exibido na Equação 1, em que  $\dot{r}$  representa a taxa de regressão,  $\rho_F$  a densidade do combustível,  $\dot{q}$  o fluxo total de calor recebido pelo grão e,  $\Delta H_{v,eff}$ ,

a energia térmica necessária para a sublimação de uma unidade de massa de combustível.

$$\dot{r} \rho_F = \frac{\dot{q}}{\Delta H_{v,eff}} \quad (1)$$

Ainda segundo (PASTRONE, 2012), mas também de acordo com (SUTTON; BIBLARZ, 2010), a taxa de regressão é função direta também da vazão mássica no interior da câmara de combustão. Seu comportamento em função desta variável pode ser visto na Figura 10.

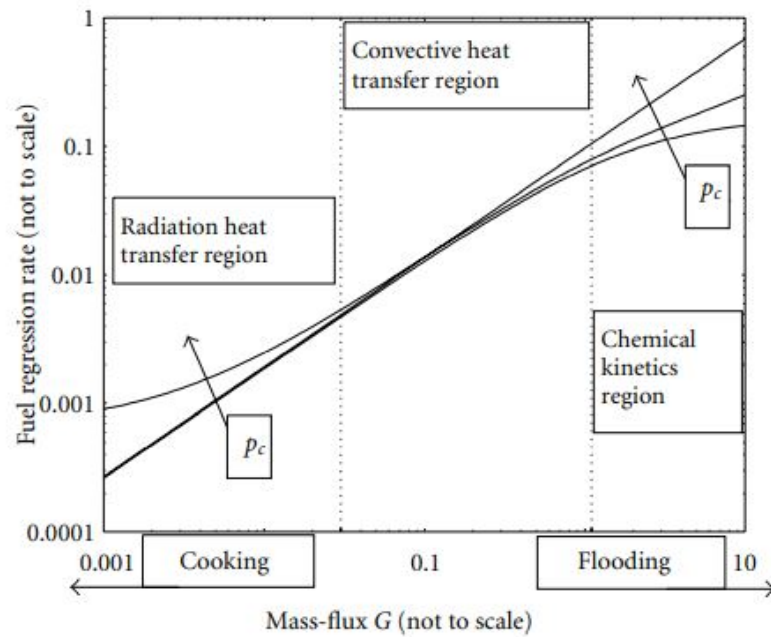


Figura 10: Comportamento da taxa de regressão em função da magnitude de  $G_O$  (PASTRONE, 2012)

## 2.4 TEORIA NÃO-CLÁSSICA DA COMBUSTÃO HÍBRIDA

Lembrando que, segundo (PISCITELLI et al., 2018), a parafina forma uma camada líquida hidrodinamicamente instável em sua superfície de fusão, é necessário complementar a teoria de combustão híbrida com as propriedades de queima de combustíveis com essa característica, conhecidos no inglês como *Liquefying Fuels*. Como explica (DOMINGOS, 2019), a Teoria Não-Clássica da Combustão Híbrida tem como objetivo definir como ocorre a combustão de propelentes com combustíveis que possuem as características de queima da parafina, sendo constituída pela Teoria Clássica Da Combustão Híbrida e pela adição do fenômeno de entrada de gotículas de combustível na zona de combustão. Vale ressaltar que esses são processos modelados pela teoria clássica da transferência de calor.

(KARABEYOGLU; ALTMAN; CANTWELL, 2002) afirma que o efeito do arrastamento das gotículas de líquido instáveis para a chama de combustão é um aumento na taxa de regressão do combustível sem que haja alteração nas características termodinâmicas dos propelentes ou de parâmetros de combustão, como a taxa O/C. Segundo (CASTANOS, 2012), a causa desse

aumento na taxa de regressão é o fato de essa camada líquida ser extremamente fina, com baixas viscosidade e tensão superficial. Essas características, quando somadas ao fluxo de oxidante na porta de combustão, torna a camada instável. Gotas de combustível líquido decolam de sua camada de origem e penetram no fluxo de oxidante, aumentando significativamente a taxa de transferência de massa de combustível. É importante ressaltar que nem todos os combustíveis formadores de camada líquida na combustão têm como consequência um aumento na taxa de transferência de massa. Em alguns casos, como no polietileno de alta densidade (HDPE), a camada líquida formada possui viscosidade elevada, impedindo que gotículas decolem para o fluxo de oxidante.

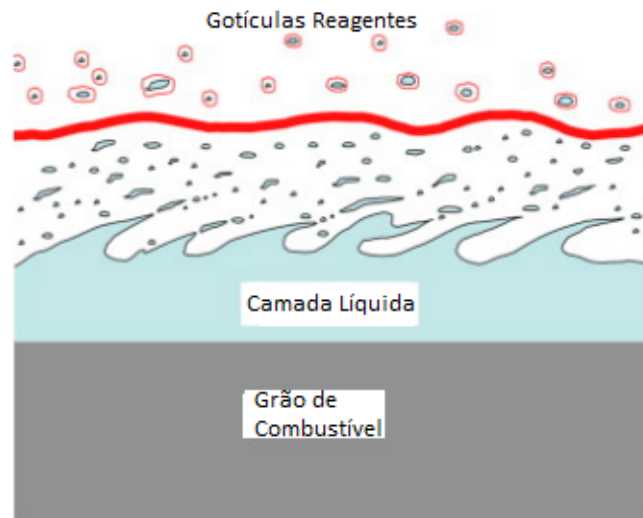


Figura 11: Camada líquida e gotículas reagentes com o fluxo de oxidante.  
(CASTANOS, 2012) (Adaptado)

Conforme explica (DOMINGOS, 2019), se baseado no estudo de (KARABEYOGLU; ALTMAN; CANTWELL, 2002), as dimensões dessa camada líquida formada durante a combustão de combustíveis como a parafina são função do balanço de energia nas interfaces sólida e líquida. Na Figura 12 é possível identificar como se dá o desenvolvimento térmico no grão de combustível. É evidenciado que a transferência de calor se dá por duas maneiras, tanto por convecção, representada por  $\dot{Q}_c$ , quanto por radiação, representada por  $\dot{Q}_r$ .

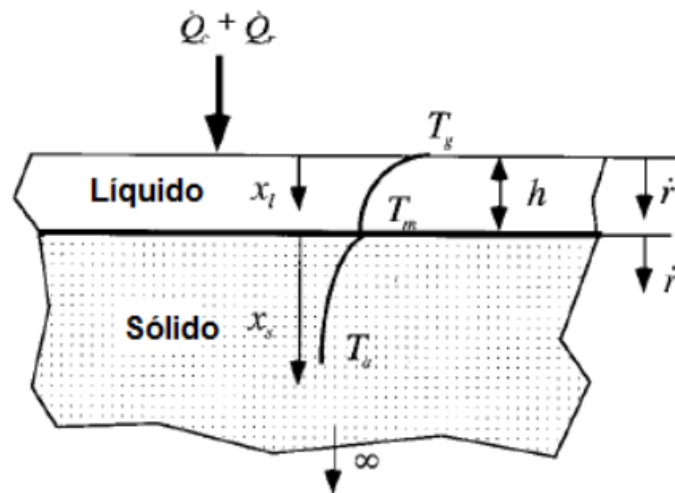


Figura 12: Camada líquida formada na combustão de combustíveis como a parafina. (KARABEYOGLU; ALTMAN; CANTWELL, 2002) (Adaptado)

Como comentado por (CASTANOS, 2012), a altura  $h$  da camada líquida de combustível é uma das variáveis causais de sua instabilidade, tornando o cálculo para sua estimativa importante.

A partir de simplificações e premissas como a uniformidade de propriedades do material independente do estado físico e taxa de regressão uniforme, (KARABEYOGLU; ALTMAN; CANTWELL, 2002) realiza cálculos que concluem que, caso a absorção do calor proveniente da radiação seja de ordem baixa ( $\ll 1$ ) por parte do material em fase líquida, a espessura  $h$  dessa camada líquida é função da relação entre o fluxo de calor radioativo e o fluxo de calor convectivo, podendo ser expressa como

$$h = \delta_l \ln \left[ 1 + \frac{C_l \Delta T_1}{h_m - h_v (\dot{Q}_r / \dot{Q}_w)} \right] \quad (2)$$

No caso contrário, se a absorção de calor radiativo for de ordem alta ( $\gg 1$ ), mostrando um comportamento opaco pela camada líquida, a proporção entre os fluxos radioativo e convectivo ( $\frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_c}$ ) não afeta a espessura dessa camada. Assim, a espessura  $h$  é expressa analiticamente como

$$h = \delta_l \ln \left[ 1 + \frac{C_l \Delta T_1}{h_m} \right] \quad (3)$$

## 2.5 IMPULSO ESPECÍFICO

O Impulso Específico ( $I_{sp}$ ) é uma das características mais importantes do motor que gera empuxo para a movimentação do corpo a que está acoplado. Ele é basicamente função do empuxo e da força da gravidade local. A obtenção do empuxo é a representada na Equação 4:

$$E = \dot{m} v_e \quad (4)$$

Assim, é fácil perceber que os valores de  $I_{sp}$  podem mudar de acordo com a altitude, que provoca mudanças na força da gravidade, e com a velocidade de saída dos gases de exaustão do motor, que possuem influência no valor do empuxo gerado. A equação utilizada para obter o Impulso Específico é a Equação 5:

$$I_{sp} = \frac{E}{\dot{m} g} \quad (5)$$

É interessante para um motor a jato ou de foguete que o valor de  $I_{sp}$  seja sempre o mais elevado possível, pois como é inversamente proporcional ao fluxo mássico no interior do motor, um número alto para ele faz com que a quantidade de combustível gasto para a geração de um mesmo valor de empuxo seja menor. O sistema fica mais barato, possivelmente mais leve e mais eficiente do ponto de vista termodinâmico.

## 2.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

### 2.6.1 Taxa de Regressão

A taxa de regressão nada mais é que a velocidade radial de queima do grão de combustível (BERTOLDI, 2007) e é representada pelo símbolo  $\dot{r}$ . Em foguetes com propulsão híbrida que utilizam combustível sólido, essa queima é feita de dentro para fora, visto que os grãos possuem furo(s) central(is) em que flui o escoamento de oxidante e é utilizado como câmara de combustão. Essa afirmação pode ser corroborada ao observar-se as Figuras 34 e 35 da Subseção 3.2.1, do Capítulo 3 deste trabalho. Por ser uma medida de velocidade, essa propriedade do material possui a unidade de  $\frac{mm}{s}$ .

De acordo com o essa definição, fica claro que a taxa de regressão é fundamental para alguns aspectos do motor, já que a vazão mássica  $\dot{m}$ , de gases produtos de combustão na saída do sistema de propulsão é função da quantidade de combustível queimado, assim como suas pressão e temperatura. Dentre os aspectos funções da taxa de regressão mais importantes, podem ser destacados o Impulso Específico, o Empuxo e o tempo possível de voo do veículo movimentado por esse sistema de propulsão.

Segundo (SUTTON; BIBLARZ, 2010), fatores que afetam o desenvolvimento da camada limite do grão de combustível afetam diretamente características de sua taxa de regressão. Entre esses fatores, podem ser citadas a pressão e temperatura do gás, a composição do grão, a taxa do fluxo mássico de oxidante na porta de combustão e o comprimento e diâmetro da porta de combustão.

### 2.6.1.1 Cálculo Experimental da Taxa de Regressão

Há algumas maneiras conhecidas para o cálculo da taxa de regressão de um combustível sólido de maneira experimental. A primeira e mais simples, consiste em realizar a medição do diâmetro interno do grão antes e após o ensaio de combustão e relacioná-lo com o seu tempo de duração. Assim, a seguinte relação é obtida:

$$\dot{r} = \frac{D_{i,2} - D_{i,1}}{t} \quad (6)$$

Em que  $D_{i,2}$  representa o diâmetro interno ao final da queima,  $D_{i,1}$  o diâmetro interno no início e  $t$  o tempo de queima.

A segunda maneira se dá relacionando a diferença do peso do grão antes e após o ensaio com o seu tempo de duração e, segundo (KUMAR, 2014), é o mais utilizado em pesquisas da área. Uma fórmula simples pode ser descrita para esse cálculo, apresentada na Equação 7, onde  $\Delta m_g$  representa a variação de massa do grão e  $t$  o tempo despendido no ensaio.

$$\dot{r} = \frac{\Delta m_g}{t} \quad (7)$$

As duas primeiras maneiras de medição esbarram em um problema: para que sejam medidas as condições do grão após o ensaio, visto que o a combustão se propaga até que o combustível ou o oxidante seja completamente exaurido, é necessário que este seja interrompido. Dados importantes que talvez alterariam a taxa de regressão medida poderiam ser coletados para aquele ensaio, mas se perdem devido à pausa. Além disso, conforme motores de escala elevada vão sendo utilizados, as medições se tornam cada vez mais trabalhosas.

Há claramente uma divergência de unidades da taxa de regressão entre as duas primeiras maneiras de cálculo. Porém, caso haja a necessidade de comparação entre elas, é simples fazer uma transformação de unidades utilizando valores de densidade, massa e volume.

Uma terceira maneira conhecida para o cálculo da taxa de regressão de forma experimental é através da curva de pressão na câmara de combustão medida pela bancada de ensaios. De acordo com (KUMAR, 2014), este método leva vantagem em relação aos outros dois primeiros pois permite que em um só teste seja apresentada uma curva da taxa de regressão *vs* vazão de oxidante. Ainda segundo (KUMAR, 2014), para que o cálculo da taxa de regressão seja feito, primeiramente é necessário que se obtenha o valor da massa de combustível queimado. Para isso, utiliza-se a Equação 8, onde  $c_{ds}$  representa o coeficiente de descarga na saída da câmara de combustão,  $P_s$ , a pressão da câmara de pós-combustão,  $A_{ts}$ , a área da garganta na saída da câmara de pós combustão e,  $C_O^*$ , a velocidade característica do oxidante.

$$\dot{m}_O = \frac{c_{ds} P_s A_{ts}}{C_O^*} \quad (8)$$

Além da  $\dot{m}_O$ , a Equação 9 apresenta valores necessários para o cálculo da taxa de regressão.

A variável  $\dot{m}_f$  representa a vazão mássica de combustível e é dada pela Equação 9, onde  $P_c$  representa a pressão da câmara de combustão e  $A_t$  a área da seção da garganta do bocal.

$$\dot{m}_f = \frac{P_c A_t}{C^*} - \dot{m}_O \quad (9)$$

Aplicando os resultados de  $\dot{m}_O$  e  $\dot{m}_f$  na Equação 10, chega-se ao valor desejado para a taxa de regressão. Nesta equação,  $\rho_f$  representa a densidade do combustível,  $d_p$ , o diâmetro inicial da câmara de combustão e,  $L_g$ , o comprimento do grão.

$$\dot{r} = \frac{\dot{m}_f}{\pi \rho_f d_p L_g} \quad (10)$$

### 2.6.1.2 Cálculo Teórico da Taxa de Regressão

É possível também prever o valor de  $\dot{r}$ . Conforme explicado por (PASTRONE, 2012), (MARXMAN; WOOLDRIDGE; MUZZY, 1964) mostra que, primeiramente, a taxa de regressão é governada pela taxa de transferência de calor de convecção, que por sua vez depende do fluxo mássico ( $G$ ) no interior da porta de combustão. Após derivar a taxa de transferência de calor para uma camada turbulenta, foi proposta uma relação simplificada em que a radiação térmica é negligenciada, mostrada na Equação 11.

$$\dot{r} \rho_F \propto B^{0,32} G^{0,8} x^{-0,2}, \quad 5 < B < 100 \quad (11)$$

A incógnita  $B$  é chamada de *Blowing Parameter* e representa a taxa entre a energia térmica do fluxo principal em relação à superfície. A variável  $x$  nada mais é do que a posição axial, revelando os efeitos do crescimento da camada limite em relação à transferência de calor.

De acordo com (PASTRONE, 2012), a taxa de regressão pode ser considerada constante ao longo do eixo do grão combustível e correlações semi-empíricas baseadas na vazão mássica de oxidante adentrando a porta de combustão, como  $G_O = \frac{\dot{m}_O}{A_e}$ , a taxa de regressão de um combustível sólido pode ser dada pela Equação 12, em que  $G_O$  representa a vazão mássica de oxidante por unidade de área e os valores de  $a$  e  $n$  são obtidos via experimentos, dependem de das dimensões do motor, das dimensões da porta de dimensão/diâmetro interno do grão, da geometria do injetor de oxidante e de características do fluxo. Valores obtidos experimentalmente são mostrados na tabela da Figura 13.

$$\dot{r} = a G_O^n \quad (12)$$



Legend	System	Propellants	$a$ ( $m^{1+2n} kg^{-n} s^{n-1}$ )	$n$	Note	Reference	$G_0$ ( $kg/m^2/s$ )
Fuel/additives							
B	Pure HTPB	GOX/HTPB	$2.85 \cdot 10^{-5}$	0.681	—	[4]	35–280
W	Paraffin	GOX/Wax	$9.10 \cdot 10^{-5}$	0.690	—	[5]	20–120
WAI	Paraffin/13% Silbal	GOX/fuel	$9.40 \cdot 10^{-5}$	0.766	—	[6]	150–300
C	Cryo	GOX/CH <sub>4</sub>	$4.14 \cdot 10^{-5}$	0.830	—	[7]	3–30
S1	Pure HTPB	GOX/fuel	—	—	baseline, [8, Figure 11]	[8]	80–150
S12	HTPB/13% Al325	GOX/fuel	—	—	[8, Figure 11]	[8]	80–120
S13	HTPB/13% ALEX	GOX/fuel	—	—	coated, [8, Figure 11]	[8]	70–120
Hb	Pure HTPB	GOX/HTPB	$8.7 \cdot 10^{-5}$	0.530	baseline	[9]	50–400
HAI	HTPB/Al	GOX/fuel	$1.4 \cdot 10^{-5}$	0.930	—	[9]	50–400
HAP	HTPB/AP	GOX/fuel	$3.8 \cdot 10^{-5}$	0.710	—	[9]	50–400
HAPAI	HTPB/Al/AP	GOX/fuel	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0.97	—	[9]	50–400
Swirl/grain geometry							
VX	Vortex	GOX/HTPB	$1.93 \cdot 10^{-4}$	0.540	—	[10]	60–110
V	End-burning + Swirl	GOX/PMMA	$3.45 \cdot 10^{-5}$	0.778	—	[11]	40–60
Vb	End-burning + Swirl	GOX/PMMA	$1.45 \cdot 10^{-5}$	0.749	no swirl	[11]	40–60
V	End-burning + Swirl	GOX/PMMA	$5.96 \cdot 10^{-5}$	0.641	—	[11]	10–20
Vb	End-burning + Swirl	GOX/PMMA	$2.76 \cdot 10^{-5}$	0.581	no swirl	[11]	10–20
RU	Radial	GOX/HTPB	$9.20 \cdot 10^{-5}$	0.570	upper disk	[12]	30–70
RL	Radial	GOX/HTPB	$1.00 \cdot 10^{-4}$	0.700	lower disk	[12]	30–70
CA	CAMUI	GOX/PE	$2.40 \cdot 10^{-5}$	0.800	(11), $\alpha' = 3$	[13]	200–700

Figura 13: Tabela com resultados experimentais de  $a$  e  $n$  e suas aplicações - (PASTRONE, 2012)

Ainda de acordo com (PASTRONE, 2012), a taxa de regressão não deve ser simplesmente calculada pela Equação 12 devido à fatores como a ação da transferência de calor por radiação e as variações de propriedades de fluidos sobre a camada limite. Desta maneira, para um estudo mais fiel, a derivação de uma nova relação de taxa de regressão torna-se necessária. (CHIAVERINI et al., 2001) realiza essa derivação, obtendo a relação exposta na Equação 13, em que  $L_g$  representa o comprimento do grão de combustível,  $D_h$  o diâmetro da porta de combustível e  $\theta$  um fator de temperatura, constituindo a taxa com que afeta uma chama média a temperatura da superfície.

$$\frac{\dot{r} \rho_F}{G} = 0,0155 \left( \frac{D_h}{L_g} \right)^{0,3} \theta^{0,6} Re_D^{-0,2} \quad (13)$$

### 2.6.1.3 Taxa de Regressão da Parafina

(KARABEYOGLU; ALTMAN; CANTWELL, 2002) afirma que o modelo de taxa de regressão desenvolvido para combustíveis sólidos que criam uma camada líquida de material acima de sua superfície sólida durante a combustão, como a parafina, é composto pela teoria clássica da gaseificação e adiciona a entrada de gotículas de combustível na zona de combustão, resultando num mecanismo de transferência de massa. Neste trabalho, a Seção 2.4 exibe com detalhes esses processos.

O estudo de (AZEVEDO, 2018a), utilizando testes experimentais, concluiu que a taxa de regressão específica da parafina pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\dot{r} = 0,611 G_{ar}^{0,340} \quad (14)$$

Percebe-se que a estrutura da relação apresentada por (AZEVEDO, 2018a) segue a da Equação 12, corroborando a afirmação de (PASTRONE, 2012) de que a estrutura da Equação 13 é pouco utilizada para caracterizações práticas.

### 2.6.2 Dureza

Dureza é uma propriedade mecânica intrínseca de um material que consiste em uma medida de sua resistência a uma deformação plástica localizada. A maneira mais comum de medir a dureza é através do forçamento de um pequeno penetrador contra a superfície do material ensaiado. A profundidade final resultante é medida e ligada à um valor de dureza. Quanto mais macio for um material, mais profunda será a impressão do penetrador e menor o seu índice de dureza. Naturalmente, quando menos macio for o material, maior será o seu índice de dureza. Deve-se tomar cuidado com as escalas e índices de dureza, pois elas são valores relativos e comparativos, não possuem caracterização absoluta. Diversos tipos de ensaios são feitos e cada um possui uma escala própria (CALLISTER, 2008).

Ainda segundo (CALLISTER, 2008), os ensaios de dureza são os ensaios mecânicos mais comuns. São simples, baratos e constituídos por métodos não destrutivos, o que torna um corpo ensaiado ainda passível de utilização em sua aplicação na maior parte dos casos.

Segundo (NORTON, 2013), as três escalas de dureza mais utilizadas são:

- *Brinell*: utiliza uma esfera de carbetto de tungstênio de 10mm de diâmetro, sobre a qual se aplica uma carga entre  $500kgf$  e  $3000kgf$ ;
- *Rockwell*: utiliza uma esfera de  $\frac{1}{16}in$  de diâmetro ou uma ponta de diamante em forma de cone com ângulo de 120 graus;
- *Vickers*: utiliza uma pirâmide de diamante para o ensaio.

A indicação do índice de dureza dos materiais é feita por um número seguido pela letra H (proveniente do termo em inglês para dureza: *hardness*), acompanhada de uma letra que indica o método de ensaio utilizado para obtenção do primeiro valor. Por exemplo, 375 HB ou 396 HV (NORTON, 2013).

Ademais, essa propriedade mecânica é importante pois fornece conhecimento de resistências mecânicas e ao desgaste através do uso de tabelas de correlação, além de permitir um controle de qualidade nas condições e processos de fabricação (CANALE, 2000).

A dureza Brinell fornece uma maneira de estimar o limite de resistência à tração ( $S_{ut}$ ) de um material, utilizando a Equação 15.

$$S_{ut} \approx 3,45H_B \pm 0,2H_B \quad (15)$$

Um pouco mais adiante, pode-se citar motivos práticos para o acompanhamento dessa característica em um grão de combustível sólido. Não é difícil deduzir que durante o processo

de combustão de um foguete, a câmara de combustão suporta níveis intensos de compressão e, conseqüentemente, o combustível também. É desejável então que o propelente seja constituído de um material com alta resistência à compressão.

Apesar de não haver relação direta entre as resistências à tração e compressão, ao analisar curvas geradas em ensaios das duas características, percebe-se semelhança. Portanto, utilizando a relação 15, mostra-se que, quanto maior a dureza, maior a resistência à tração e, por semelhança, maior a resistência à compressão do material. Essa afirmação prova que é desejado para um grão de combustível sólido utilizado em foguetes híbridos que o seu nível de dureza deve ter um valor razoável para a aplicação.

Por mais que sejam utilizadas outras escalas de dureza que não a Brinell para a caracterização de combustíveis sólidos, compreende-se que, por tabelas como a mostrada na Figura 14, as escalas possuem valores que aumentam ou diminuem mutuamente para os mesmos materiais ensaiados, mesmo que de maneira não linear. Portanto, sabe-se que, se a dureza na escala Rockwell é alta para determinado material, na escala Vickers também será, assim como na escala Brinell, por exemplo.

## TABELA DE COMPARAÇÃO DE DUREZA

NÚMERO DA CONVERSÃO DE DUREZA DE AÇOS																												
Dureza Brinell (HB) Escala de 10mm Pré-Carga: 3.000 kgf		Dureza Rockwell								Resistência à Tração (Aproxim.)		Dureza Brinell (HB) Escala de 10mm Pré-Carga: 3.000 kgf		Dureza Rockwell								Resistência à Tração (Aproxim.)						
Esfera Standard	Esfera de Metal Duro	Dureza Vickers (HV)	Escala A Pré-Carga: 5kgf Ponta de Diamante (HRA)	Escala B Pré-Carga: 10kgf Escala 1/16" (HRB)	Escala C Pré-Carga: 15kgf Ponta de Diamante (HRC)	Escala D Pré-Carga: 100kgf Ponta de Diamante (HRD)	Dureza Shore (HS)	Mpa	Esfera Standard	Esfera de Metal Duro	Dureza Vickers (HV)	Escala A Pré-Carga: 5kgf Ponta de Diamante (HRA)	Escala B Pré-Carga: 10kgf Escala 1/16" (HRB)	Escala C Pré-Carga: 15kgf Ponta de Diamante (HRC)	Escala D Pré-Carga: 100kgf Ponta de Diamante (HRD)	Dureza Shore (HS)	Mpa	Esfera Standard	Esfera de Metal Duro	Dureza Vickers (HV)	Escala A Pré-Carga: 5kgf Ponta de Diamante (HRA)	Escala B Pré-Carga: 10kgf Escala 1/16" (HRB)	Escala C Pré-Carga: 15kgf Ponta de Diamante (HRC)	Escala D Pré-Carga: 100kgf Ponta de Diamante (HRD)	Dureza Shore (HS)	Mpa		
-	-	940	85.6	-	68.0	76.9	97	-	429	429	455	73.4	-	45.7	59.7	61	1510	-	-	429	429	455	73.4	-	45.7	59.7	61	1510
-	-	920	85.3	-	67.5	76.5	96	-	415	415	440	72.8	-	44.5	58.8	59	1460	-	-	415	415	440	72.8	-	44.5	58.8	59	1460
-	-	900	85.0	-	67.0	76.1	95	-	401	401	425	72.0	-	43.1	57.8	58	1390	-	-	401	401	425	72.0	-	43.1	57.8	58	1390
-	(767)	880	84.7	-	66.4	75.7	93	-	388	388	410	71.4	-	41.8	56.8	56	1330	-	-	388	388	410	71.4	-	41.8	56.8	56	1330
-	(757)	860	84.4	-	65.9	75.3	92	-	375	375	396	70.6	-	40.4	55.7	54	1270	-	-	375	375	396	70.6	-	40.4	55.7	54	1270
-	(745)	840	84.1	-	65.3	74.8	91	-	363	363	383	70.0	-	39.1	54.6	52	1220	-	-	363	363	383	70.0	-	39.1	54.6	52	1220
-	(733)	820	83.8	-	64.7	74.3	90	-	352	352	372	69.3	(110.0)	37.9	53.8	51	1180	-	-	352	352	372	69.3	(110.0)	37.9	53.8	51	1180
-	(722)	800	83.4	-	64.0	73.8	88	-	341	341	360	68.7	(109.0)	36.6	52.8	50	1130	-	-	341	341	360	68.7	(109.0)	36.6	52.8	50	1130
-	(712)	-	-	-	-	-	-	-	331	331	350	68.1	(108.5)	35.5	51.9	48	1095	-	-	331	331	350	68.1	(108.5)	35.5	51.9	48	1095
-	(710)	780	83.0	-	63.3	73.3	87	-	321	321	339	67.5	(108.0)	34.3	51.0	47	1060	-	-	321	321	339	67.5	(108.0)	34.3	51.0	47	1060
-	(698)	760	82.6	-	62.5	72.6	86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	(684)	740	82.2	-	61.8	72.1	-	-	311	311	328	66.9	(107.5)	33.1	50.0	46	1025	-	-	311	311	328	66.9	(107.5)	33.1	50.0	46	1025
-	(682)	737	82.2	-	61.7	72.0	84	-	302	302	319	66.3	(107.0)	32.1	49.3	45	1005	-	-	302	302	319	66.3	(107.0)	32.1	49.3	45	1005
-	(670)	720	81.8	-	61.0	71.5	83	-	293	293	309	65.7	(106.0)	30.9	48.3	43	970	-	-	293	293	309	65.7	(106.0)	30.9	48.3	43	970
-	(656)	700	81.3	-	60.1	70.8	-	-	285	285	301	65.3	(105.5)	29.9	47.6	-	950	-	-	285	285	301	65.3	(105.5)	29.9	47.6	-	950
-	(653)	697	81.2	-	60.0	70.7	81	-	277	277	292	64.6	(104.5)	28.8	46.7	41	925	-	-	277	277	292	64.6	(104.5)	28.8	46.7	41	925
-	(647)	690	81.1	-	59.7	70.5	-	-	269	269	284	64.1	(104.0)	27.6	45.9	40	895	-	-	269	269	284	64.1	(104.0)	27.6	45.9	40	895
-	(638)	680	80.8	-	59.2	70.1	80	-	262	262	276	63.6	(103.0)	26.6	45.0	39	875	-	-	262	262	276	63.6	(103.0)	26.6	45.0	39	875
-	630	670	80.6	-	58.8	69.8	-	-	255	255	269	63.0	(102.0)	25.4	44.2	38	850	-	-	255	255	269	63.0	(102.0)	25.4	44.2	38	850
-	627	667	80.5	-	58.7	69.7	79	-	248	248	261	62.5	(101.0)	24.2	43.2	37	825	-	-	248	248	261	62.5	(101.0)	24.2	43.2	37	825
-	-	677	80.7	-	59.1	70.0	-	-	241	241	253	61.8	100	22.8	42.0	36	800	-	-	241	241	253	61.8	100	22.8	42.0	36	800
-	601	640	79.8	-	57.3	68.7	77	-	235	235	247	61.4	99.0	21.7	41.4	35	785	-	-	235	235	247	61.4	99.0	21.7	41.4	35	785
-	-	640	79.8	-	57.3	68.7	-	-	229	229	241	60.8	98.2	20.5	40.5	34	765	-	-	229	229	241	60.8	98.2	20.5	40.5	34	765
-	-	640	79.8	-	57.3	68.7	-	-	223	223	234	-	97.3	(18.8)	-	-	-	-	-	223	223	234	-	97.3	(18.8)	-	-	-
-	578	615	79.1	-	56.0	67.7	75	-	217	217	228	-	96.4	(17.5)	-	33	725	-	-	217	217	228	-	96.4	(17.5)	-	33	725
-	-	607	78.8	-	55.6	67.4	-	-	212	212	222	-	95.5	(16.0)	-	-	705	-	-	212	212	222	-	95.5	(16.0)	-	-	705
-	555	591	78.4	-	54.7	66.7	73	2055	207	207	218	-	94.6	(15.2)	-	32	690	-	-	207	207	218	-	94.6	(15.2)	-	32	690
-	-	579	78.0	-	54.0	66.1	-	2015	201	201	212	-	93.8	(13.8)	-	31	675	-	-	201	201	212	-	93.8	(13.8)	-	31	675
-	534	569	77.8	-	53.5	65.8	71	1985	197	197	207	-	92.8	(12.7)	-	30	655	-	-	197	197	207	-	92.8	(12.7)	-	30	655
-	-	534	77.8	-	53.5	65.8	-	1985	192	192	202	-	91.9	(11.5)	-	29	640	-	-	192	192	202	-	91.9	(11.5)	-	29	640
-	-	533	77.1	-	52.5	65.0	-	1915	187	187	196	-	90.7	(10.0)	-	-	620	-	-	187	187	196	-	90.7	(10.0)	-	-	620
-	514	547	76.9	-	52.1	64.7	70	1890	183	183	192	-	90.0	(9.0)	-	28	615	-	-	183	183	192	-	90.0	(9.0)	-	28	615
-	-	514	76.9	-	52.1	64.7	-	1890	179	179	188	-	89.0	(8.0)	-	27	600	-	-	179	179	188	-	89.0	(8.0)	-	27	600

Figura 14: Exemplo de tabela de comparação de durezas - [http://www.mitsubishicarbide.com/]

### 2.6.2.1 Dureza e Microdureza Vickers

Para este trabalho, a escala de dureza Vickers é escolhida. Nos ensaios que retornam essa escala de magnitude, utilizam-se penetradores em formato piramidal, feitos de diamante. A impressão resultante na superfície do material é medida através de microscópios e, através da tabela presente na Figura 15, convertida em um valor de dureza (CALLISTER, 2008).

**Tabela 4.5 Técnicas de Ensaio de Dureza**

Ensaio	Penetrador	Forma da Impressão		Carga	Fórmula para o Número de Dureza <sup>a</sup>
		Vista Lateral	Vista Superior		
Breuil	Esfera de aço com 10 mm ou carbono de tungstênio			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			P	$HV = 1,854P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$HK = 14,2P/l$
Rockwell e Rockwell Superficial	Cone de diamante; esferas de aço com diâmetros de $\frac{1}{16}$ , $\frac{1}{8}$ , $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ in			60 kg	} Rockwell
				100 kg	
	150 kg	} Rockwell Superficial			
15 kg					
30 kg					
				45 kg	

<sup>a</sup>Para as fórmulas de dureza breviladas, P (a carga aplicada) está em kg, enquanto D, d, d<sub>1</sub> e l estão todos em mm.  
Fonte: Adaptado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.

Figura 15: Tabela utilizada para a conversão de medidas de impressão à escalas de dureza. [Fonte: (CALLISTER, 2008)]

Para a designação de números de dureza Vickers, o sufixo HV é utilizado. Por exemplo, segundo (RODRIGUES et al., 2017), a dureza Vickers do aço carbono 1060 é de aproximadamente 240 HV.

Devido ao nível extremamente baixo de dureza da parafina, torna-se necessária a utilização de um microdurômetro, que retorna a microdureza, para que a avaliação traga resultados condizentes. De acordo com (CALLISTER, 2008), a escala Vickers é apropriada para este tipo de ensaio devido à dimensão pequena do penetrador. A diferença prática entre a dureza e a microdureza é basicamente a carga de força utilizada para a penetração da endentação no material. No caso da microdureza, as cargas variam, geralmente, de 1 gf à 10 gf.

Espera-se que a dureza da parafina pura não tenha valor superior à 1 HV e que, com a adição de cera de carnaúba à sua composição, valores superiores sejam encontrados, sendo diretamente proporcionais à quantidade mássica do aditivo.

### 2.6.3 Homogeneidade

Um material homogêneo é aquele que possui propriedades uniformes em toda a sua extensão. Esse estado é raramente atingido em materiais reais, pois eles geralmente estão sujeitos à descontinuidades, precipitados, lacunas ou pequenos pedaços de material estranho, causas do processo de fabricação (NORTON, 2013).

Para o funcionamento ótimo de um grão de combustível sólido nos sistemas híbridos de combustão, é necessário que ele não possua intervalos físicos em sua composição, como bolhas de ar, furos, rasgos ou trincas. De maneira mais simples, é necessário que ele seja homogêneo para que o processo de combustão ocorra de maneira uniforme, sem adição de materiais estranhos ou excesso de ar proveniente de possíveis bolhas. Por isso, é extremamente importante considerar essa característica e estudar maneiras de fabricação de grão que possibilitem a maior taxa de homogeneidade possível.

### 2.6.4 Geometria de Grão

É importante que a geometria do grão, função única de seu processo de fabricação, possua as dimensões esperadas e necessárias de acordo com a decisão de projeto. Um grão com dimensões falhas ocasiona em um sistema de propulsão também falho. Esse processo de fabricação deve permitir a escolha das dimensões internas e externas, variando diâmetros e comprimentos.

## 2.7 PARAFINA

A parafina é utilizada, tanto como matéria prima ou como aditivo, em diversas aplicações. Entre elas, cita-se indústria de velas e ceras, flores artificiais e artesanato, impermeabilização de couros, telas, paredes e cartuchos de papel, isolante elétrico e extração de essências (QUIMIDROL, 2014b).

Ainda segundo (QUIMIDROL, 2014b), a parafina é um composto formado por misturas complexas de petróleo, constituído predominantemente de hidrocarbonetos saturados de cadeias carbônicas, sendo a maioria delas compostas por mais de 20 átomos de carbono.

Para este trabalho, a parafina foi obtida em estado sólido, nas formas exibidas pelas Figuras 16 e 17.



Figura 16: Parafina em Forma Granulada Utilizada no Trabalho



Figura 17: Parafina em Forma Granulada Utilizada no Trabalho

### 2.7.1 Propriedades

De acordo com (QUIMIDROL, 2014b), a parafina possui as seguintes propriedades, que são utilizadas para cálculos teóricos neste trabalho:

- Densidade:  $0,780 \text{ g/cm}^3$  (a  $80^\circ\text{C}$ )
- Ponto de Fusão:  $61,4^\circ\text{C}$

## 2.8 CERA DE CARNAÚBA

A Carnaúba (*Copernicia Prunifera*), exibida na Figura 18, é uma palmeira proveniente do Nordeste do Brasil.



Figura 18: Palmeira Carnaúba. [Fonte: <http://www.cerratinga.org.br/carnauba/>]

A cera de carnaúba é um exsudato (saída de líquidos orgânicos através das membranas celulares das folhas com o objetivo de evitar desidratação). É composta de ésteres de cadeia linear, álcoois, ácidos e hidrocarbonetos (WIDJLJONO; AGUSTIONO; IRNAWATI, 2009). É um composto altamente durável, além de possuir característica impermeável. Ela não pode ser dissolvida em água, mas outros tipos de solvente podem dissolvê-la, principalmente a partir dos 45 °C.

A cera tem usos em diversos produtos, como ceras automotivas e para pisos, tintas, vernizes, produtos para marcenaria e até mesmo em cosméticos, medicamentos e alimentos (QUIMIDROL, 2014a).

Segundo (WIDJLJONO; AGUSTIONO; IRNAWATI, 2009), a cera de carnaúba possui nível de dureza relativamente alto e é utilizada em processos específicos para aumentar tanto a dureza como o ponto de fusão da parafina.

O material utilizado neste trabalho é obtido na forma sólida granulada, conforme pode ser visto na Figura 19:



Figura 19: Cera de Carnaúba em Forma Granulada

### 2.8.1 Cera de Carnaúba Como Aditivo

Ao utilizar a cera de carnaúba como aditivo à parafina na fabricação de grãos de combustível sólido para aplicação em foguetes híbridos, espera-se verificar nos grãos aumento na viscosidade, nas temperaturas e entalpias de vaporização e fusão e também na dureza. Por se tratarem de ceras muito semelhantes, caso haja aumento na taxa de regressão, espera-se que seja ligeiro.

### 2.8.2 Propriedades

De acordo com (QUIMIDROL, 2014a), a cera de carnaúba possui as seguintes propriedades:

- Densidade:  $0,996 \text{ g/cm}^3$
- Ponto de Fusão: entre  $80$  e  $83 \text{ }^\circ\text{C}$



## CAPITULO 3

### METODOLOGIA E MATERIAIS

#### 3.1 FABRICAÇÃO DE GRÃOS

Os grãos de parafina fabricados para estudos neste trabalho possuem duas finalidades. A primeira, analisar os pontos positivos e negativos do método de fabricação proposto quando comparado à métodos de fabricação mais simples e definir o método com melhores resultados. A segunda, fazer comparações teóricas e práticas entre grãos de parafina pura e grãos de parafina com a adição de uma pequena porcentagem mássica de cera de carnaúba.

Tendo essas duas finalidades como ponto de partida, definiu-se que grãos de tamanho funcional (aqueles que poderiam ser utilizados para um ensaio na bancada apresentada na Subsubseção 3.2.1.1) serão fabricados somente para efeito de comparação dos métodos de fabricação. Para os ensaios comparativos dos efeitos da utilização da cera de carnaúba como aditivo, pequenos corpos de prova são o suficiente para que os ensaios propostos sejam realizados.

Durante a combustão, o grão de combustível pode ser afetado pela transferência de calor em forma de radiação proveniente da chama de difusão. Dessa maneira, não somente a superfície formadora da câmara de combustão, como também o seu interior, sofreria a fusão que forma a camada líquida hidrodinamicamente instável, o que afetaria o desempenho tanto do combustível quanto da queima em si.

##### 3.1.1 Métodos de Fabricação de Grãos Funcionais

Conforme descrito no segundo parágrafo da Seção 3.1, é chamado de grão funcional aquele que pode ser utilizado na bancada de testes apresentada na Subsubseção 3.2.1.1.

Três métodos de fabricação são apresentados para a obtenção de um grão no formato desejado. O objetivo de aplicar cada um dos métodos é provar que o proposto no trabalho é realmente o que traz resultados mais apropriados para a aplicação. Para isso, o processo definido no fluxograma apresentado na Figura 20 é adotado.

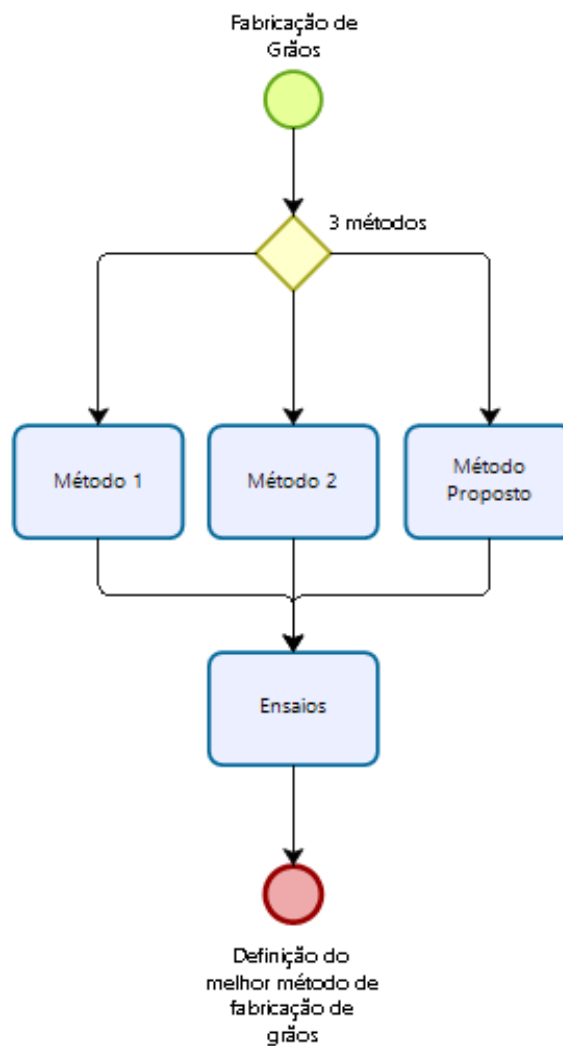


Figura 20: Processo adotado para definição do melhor método de fabricação

Todos os métodos tem como produto final um grão de parafina cilíndrico com um furo passante em seu sentido longitudinal, que faz o papel, como evidenciado na Subseção 2.1.1, de câmara de combustão. As dimensões finais selecionadas para este trabalho são exibidas na Tabela 1.

Comprimento - $L_g$ (mm)	Diâmetro Externo - $D_{eg}$ (mm)	Diâmetro Interno - $D_{ig}$ (mm)
207	73	20

Tabela 1: Dimensões desejadas para um grão funcional

### 3.1.1.1 Método de Fabricação 1

O método mais simples dos três apresentados, consiste em preencher totalmente um tubo de PVC com parafina líquida na temperatura de 70°C, tampá-lo e esperar até que a parafina solidifique somente com a troca de calor com o ambiente, sem agitar, aplicar rotação ou inserir

um dispositivo como um ventilador soprando vento no tubo. Após a solidificação total, furar o grão na direção longitudinal até que se obtenha um furo passante, utilizando furadeira e uma broca do tamanho desejado para o diâmetro interno.

O resultado esperado desse método é um grão quebradiço e com bolsas de ar internas em grande quantidade, além de conter possíveis trincas e falhas. Após um corte de seção transversal, espera-se um grão não homogêneo, com superfície bastante rugosa.

### 3.1.1.2 Método de Fabricação 2

Um pouco mais complexo que o primeiro, mas ainda simples, este método consiste em preencher um tubo de PVC com parafina líquida na temperatura de 70 °C, mas com a presença de um tubo cilíndrico de diâmetro igual a 20 mm em seu centro, tampá-lo e, novamente, esperar até que a parafina solidifique somente com a troca de calor com o ambiente, sem agitar, aplicar rotação ou inserir um dispositivo como um ventilador soprando vento no tubo.

Podem-se citar como evoluções em relação ao primeiro método o fato de se tornar desnecessária a utilização de um conjunto furadeira e broca para a abertura do furo, evitando possíveis trincas e falhas causadas pelas tensões consequentes do uso dessas ferramentas e diminuir a quantidade de processos mecânicos necessários para a finalização de um grão.

A menor quantidade de parafina utilizada faz acreditar que o tempo de solidificação seja menor que o do primeiro método, mas com a ressalva de que o material do tubo cilíndrico interno pode ser responsável por atrasar a transferência de calor com o ambiente, tornando o processo mais demorado.

Assim, o resultado esperado deste processo é um grão ainda quebradiço, mas com menos ocorrência de trincas e chance remota de falha estrutural. Porém, bolsas de ar e superfície não homogênea interna ainda são esperadas.

### 3.1.1.3 Método de Fabricação Proposto

Consiste em preencher parcialmente um tubo de PVC com parafina líquida na temperatura de 70 °C, tampá-lo e colocá-lo em rotação por aproximadamente 2 horas ou até que a parafina esteja completamente solidificada. A quantidade de parafina inserida no tubo varia de acordo com a dimensão desejada para o diâmetro do furo interno, sendo necessária a realização de cálculos conectando a massa inserida e as dimensões finais desejadas.

Assim como no Método de Fabricação 2, este torna desnecessária a utilização de furadeira e broca para obtenção do furo passante, o que novamente faz com que se espere um grão com menos trincas e sem falhas estruturais.

Espera-se também que, com a aplicação da rotação, as bolsas de ar sejam eliminadas: durante o processo de centrifugação, a parafina líquida, por possuir densidade elevada quando comparada ao ar, se mantém em contato com a superfície interna do tubo de PVC em rotação e expulsa o ar para o centro. Ademais, é previsto que o tempo de solidificação seja considerável.

mente menor devido à grande transferência de calor por convecção consequente do movimento de rotação e da menor massa de parafina utilizada quando em comparação com os outros métodos.

### 3.1.2 Bancada de Fabricação de Grãos Funcionais

Para que todos os métodos de fabricação pudessem ser realizados e testados, uma bancada de fabricação teve de ser projetada e construída. Conforme explicitado no método proposto no trabalho, uma rotação deve ser aplicada à parafina em estado líquido até que ela seja solidificada. Por isso, esta bancada funciona com base na teoria de força centrífuga. Composta por um tubo oco e um eixo conectado à um motor elétrico por meio de polias, seu objetivo é rotacionar a parafina em forma líquida para que o formato de um cilindro com furo seja mantido até que ela solidifique. Nas Figuras 21 e 22, estão uma renderização da bancada feita no software *Solid Works* e uma imagem real do projeto depois de pronto, respectivamente.

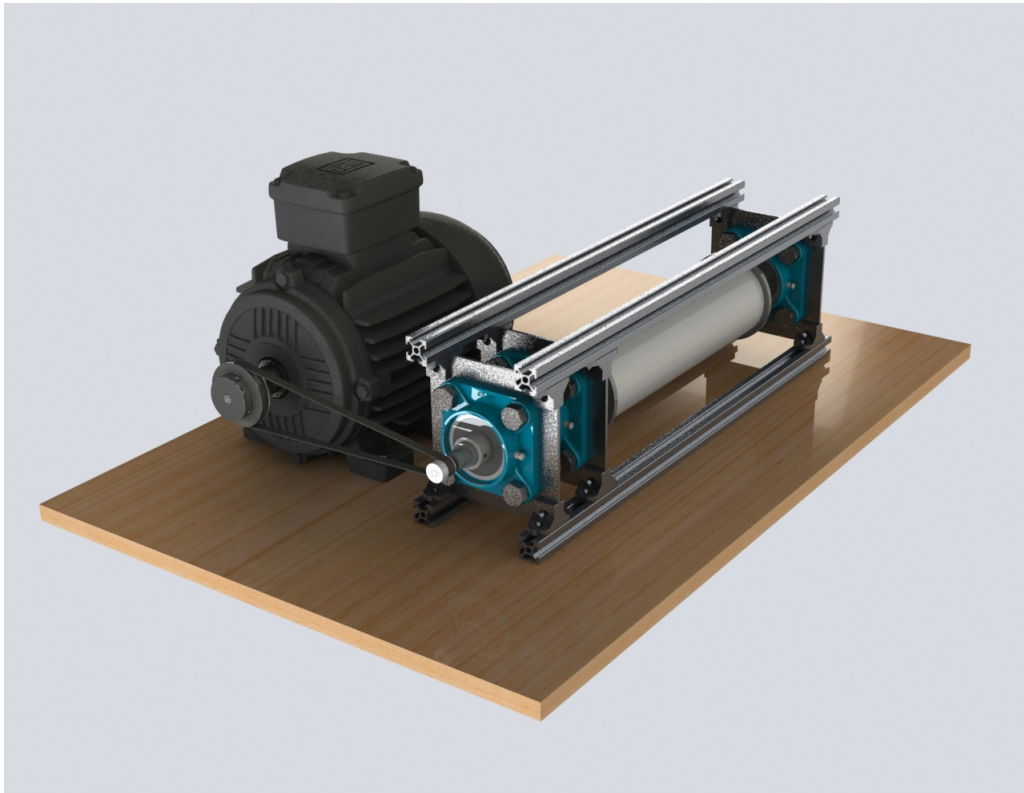


Figura 21: Projeto Renderizado da Bancada de Construção de Grão



Figura 22: Bancada de Construção de Grão

### 3.1.2.1 Elementos do Sistema

Como pode ser observado nas Figuras 21 e 22, a bancada de fabricação de grãos é composta por componentes variados, mas nada que se mostre um elemento estranho à projetos mecânicos. Sua base é uma plataforma de MDF, todo o sistema fica apoiado ali. Há 2 trilhos de sustentação parafusados diretamente na plataforma, servindo como suporte para 3 placas quadradas de alumínio, fixadas aos trilhos com a ajuda de cantoneiras. As 3 chapas de alumínio possuem a espessura de  $4\text{ mm}$ , uma dimensão selecionada buscando aumentar a rigidez do sistema, mas com a vantagem da massa moderada do material. Em cada chapa é parafusado um mancal de rolamento com a finalidade de sustentação dos eixos de acionamento e suporte. Cada eixo possui o diâmetro de  $20\text{ mm}$ , dimensão idêntica ao diâmetro interno do rolamento utilizado no mancal, e é feito do material tecnil, um tipo de nylon, devido à facilidade de usinagem e baixo custo.

O tubo de PVC, reservatório para o qual a parafina líquida é vazada durante o procedimento de fabricação, está compreendido entre os dois eixos. Para que haja apoio e o fluido não vaze, duas tampas de tecnil são utilizadas nas extremidades do tubo. A vedação é feita utilizando fita veda rosca.

O sistema de acionamento é composto por um conjunto de duas polias, uma pequena correia dentada de material elastômero e um motor elétrico. Uma das polias é fixada no eixo de saída do motor, enquanto a outra, no eixo de acionamento bi-apoiado por dois mancais de

rolamento.

Com o objetivo de elevar ainda mais a rigidez, mais 2 trilhos de alumínio semelhantes aos dois primeiros são fixados, também com a ajuda de cantoneiras, na parte superior das placas de alumínio. Ademais, há ainda a diminuição da vibração relativa entre os elementos. Seguindo o mesmo propósito, existe a presença de dois pequenos trilhos entre as 2 placas que garantem o bi-apoio do eixo de acionamento. Por ser um local com grande vibração, fez-se necessária a inclusão desses elementos para garantir a integridade mecânica do sistema, além da necessidade de rigidez.

### 3.1.2.1.1 Resumo de Componentes

- Motor Elétrico com as especificações apresentadas na Tabela 2;
- 2 eixos de tecnil com diâmetro de 20 *mm*
- 2 tampas de tecnil com diâmetro idêntico ao diâmetro interno do tubo de PVC;
- Tubo de PVC;
- 3 mancais de rolamento de flange quadrado de ferro fundido para apoio dos eixos, compostos cada um por 1 rolamento esférico com fixação por parafusos UCF204 ;
- 3 placas de alumínio com espessura de 4 *mm*;
- 4 grandes e 2 pequenos trilhos de alumínio para sustentação, suporte e fornecimento de rigidez ao sistema;
- Conjunto com 2 polias e correia para a transmissão de torque do motor para o eixo de acionamento do tubo;
- Plataforma em MDF para apoio de todo o sistema.

Frequência	Nº Pólos	Potência	Velocidade Síncrona
60 Hz	4	1/3 hp (0,25 kW)	1800 RPM

Tabela 2: Especificações do Motor Elétrico da Bancada de Fabricação de Grãos

### 3.1.2.2 Funcionamento da Bancada

Conforme pode ser observado nas figuras 21 e 22, o tubo de PVC pode ser modificado tanto em comprimento quanto em diâmetro, sendo necessário somente movimentar a placa de alumínio que sustenta o mancal de escora do eixo movido e trocar as tampas do tubo de acordo com o novo diâmetro externo desejado. Em casos extremos, trilhos maiores podem substituir os atuais para que grãos com comprimentos maiores sejam fabricados. Isso confere à bancada uma alta gama de possibilidades de fabricação.

A parafina, no caso deste trabalho, é inicialmente obtida em formato granulado e é necessário que o composto assuma o formato final de grão desejado, um cilindro com furo concêntrico passante. Para isso, o material é primeiramente aquecido em um recipiente até que esteja completamente líquido. É necessário que sua temperatura esteja em torno de 70 °C antes de ser inserida no PVC. Uma das maiores preocupações desse tipo de manufatura de grãos é que o produto final rache ou quebre. Por esse motivo, o tubo é previamente "untado" com WD-40 à fim de evitar que o grão trinque ao ser desmoldado. O material então é vazado para o interior do tubo que, após receber a parafina, é tampado com uma das extremidades da bancada e posicionado em contato com os eixos que o sustentam ao mesmo tempo que transmitem o movimento de rotação. O motor é ligado, a velocidade de rotação é ajustada e então o composto permanece nesse movimento por um período de tempo entre 1 hora e 30 minutos e 2 horas e trinta minutos (este tempo de permanência foi uma decisão tomada a partir de teste iniciais e conhecimentos prévios). A força centrípeta causada pela rotação garante que a parafina esteja sempre em contato com as laterais do tubo, fazendo com que as bolhas de ar presentes no material derretido se desloquem para o centro devido a sua menor densidade em relação à parafina. Conforme o tempo vai passando, a transferência de calor por condução na parede do tubo faz com que a temperatura da parafina diminua, dando início ao processo de solidificação. Naturalmente, após o tempo necessário para que a solidificação, que começa na superfície de material em contato com o tubo, esteja finalizada até o interior do grão, o composto assume a forma sólida desejada: um cilindro com ou sem furo concêntrico passante.

### 3.1.2.3 Aceleração Centrífuga

A força centrífuga ( $F_{cf}$ ), presente somente quando em um referencial em movimento de rotação com velocidade angular  $\omega$ , tem direção radial para fora e magnitude  $m\omega^2 r$ , onde  $r$  significa a sua distância até o centro de rotação e  $m$  a sua massa. (NUSSENZVEIG, 2013)

Levando em consideração a 2ª Lei de Newton ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ) e que  $a_{cf}$  representa a aceleração centrífuga, tem-se o seguinte:

$$F_{cf} = m a_{cf} \quad (16)$$

$$F_{cf} = m \times \omega^2 r \quad \therefore a_{cf} = \omega^2 r \quad (17)$$

Para assegurar que a parafina líquida permaneça sempre em contato com a superfície interna do tubo durante a rotação e, caso esteja havendo fabricação de grão com furo natural, que não ocorra o risco de a solidificação ocorrer de maneira a não existir o furo interno ao grão, é necessário que a aceleração centrífuga imposta pela bancada seja maior ou igual à aceleração da gravidade. Com essa premissa satisfeita, o fluido parafínico estará sempre em contato com o tubo e não "pingará" na direção radial com sentido para o centro.

Assumindo a gravidade com o valor  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  e o raio  $r$  tendo valor idêntico à metade do diâmetro interno de um grão (exibido na Tabela 1),  $r = 0,032 m$ , pode-se calcular um valor

mínimo de velocidade angular  $\omega$  para o qual  $a_{cf} \geq g$ . Assim:

$$\omega \geq \sqrt{\frac{a_{cf}}{r}} \quad \therefore \quad \omega \geq 17,5 \frac{rad}{s^2} = 2,8 rps = 168 rpm \quad (18)$$

Além das 1800 *RPM* do motor elétrico, existe um sistema de polias, mostrado na Figura 23, que acaba por multiplicar as rotações. A polia menor, que fica posicionada no eixo de trabalho, possui o diâmetro igual à 24,85 *mm* e a grande, posicionada no eixo do motor, 37,7 *mm*. Portanto, a relação de multiplicação de rotação é igual à aproximadamente 1 : 1,5. Multiplicando a rotação síncrona de 1800, *RPM* por 1,5, obtém-se a velocidade de rotação real do eixo de trabalho da bancada, que é igual à aproximadamente 2700 *RPM*. Este valor é cerca de 16 vezes maior que a velocidade centrífuga mínima para funcionamento. Portanto, a bancada é funcionalmente aceita e está apta para realizar o trabalho de fabricação de grãos.



Figura 23: Polias utilizadas para transmissão de potência do motor elétrico para o eixo de acionamento da bancada de fabricação de grãos

### 3.1.3 Relação Massa-Dimensão do Grão Funcional

Uma forma de ter controle das dimensões finais de um grão fabricado pelos métodos apresentados na Subseção 3.1.1 é pela massa de parafina (ou parafina e aditivos) vazada para o interior do tubo da bancada (Subseção 3.1.2).

A equação que define a densidade de um material é apresentada na Equação 19, em que  $m$  e  $V$  representam, respectivamente, a massa e o volume do material. Utilizando essa relação e os dados apresentados no parágrafo anterior, define-se a densidade da parafina líquida como  $\rho_p = 780 \frac{kg}{m^3}$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (19)$$



Na Equação 20, é mostrada a relação que define o volume de um cilindro com furo interno passante ( $V_{cil_f}$ ), em que  $L$  representa o comprimento do cilindro e,  $D_e$  e  $D_i$ , respectivamente, os diâmetros externo e interno. No caso do cálculo do volume de um cilindro sem furo, fica claro que a variável  $D_i$  adquire valor igual a zero.

$$V_{cil_f} = \frac{\pi}{4} L (D_e^2 - D_i^2) \quad (20)$$

Substituindo a Equação 20 na Equação 19, tem-se que uma expressão para calcular a massa de material parafínico necessária para ocupar o volume escolhido, conforme mostrado na Equação 21.

$$m = \rho \frac{\pi}{4} L (D_e^2 - D_i^2) \quad (21)$$

Para os cálculos, assume-se os diâmetros externo e interno como constantes, com seus valores apresentados na Tabela 17, assim como no caso do comprimento  $L$ .

Após os cálculos utilizando a Equação 21, realizados com o auxílio do código de *MATLAB* apresentado no Apêndice A, os resultados da Tabela 3 foram obtidos para o valor da massa necessária de parafina para cada um dos métodos de fabricação apresentados na Subseção 3.1.1:

Método 1 (g)	Método 2 (g)	Método 3 (g)
650	600	600

Tabela 3: Massa de parafina a ser vazada para a tubo de PVC de fabricação de acordo com o método utilizado

### 3.1.4 Corpos de Prova para Ensaio de Dureza

Conforme explicado no segundo parágrafo da Seção 3.1, pequenos corpos de prova são fabricados com a finalidade de realizar testes comparativos entre a parafina pura e a parafina com o aditivo cera de carnaúba. O método de fabricação desses pequenos corpos de prova se assemelha ao proposto na Subsubseção 3.1.1.1. Porém, utiliza-se pequenos tubos, conforme o apresentado na Figura 24a. Durante a solidificação do material, o tubo permanece em pé apoiado na tampa branca, pois além de essa maneira ser mais simples que a confecção de um apoio para o outro sentido, evita-se a superfície arredondada presente em um dos extremos, que resultaria em uma geometria indesejada para o corpo de prova.



Figura 24: Pequeno tubo de plástico utilizado para a fabricação de corpos de prova

Para definição de uma curva de endurecimento do corpo de prova de acordo com quantidade mássica de cera de carnaúba na mistura, são fabricados corpos de prova com diferentes composições:

- Parafina pura
- Cera de carnaúba pura
- 95% parafina + 5% cera de carnaúba
- 85% parafina + 15% cera de carnaúba
- 80% parafina + 20% cera de carnaúba
- 70% parafina + 30% cera de carnaúba
- 50% parafina + 50% cera de carnaúba

A dimensão dos corpos de prova em relação ao comprimento não é importante, visto que o ensaio é realizado em uma pequena parte do material. Portanto, para a confecção, um valor mássico total de referência não é levado em consideração, desde que as proporções de cada material seja adicionada de maneira correta.

### 3.1.5 Corpos de Prova para Estudo de Taxa de Regressão

Corpos de prova com a adição de um pequeno pavio devem ser fabricados para o ensaio descrito na Subseção 3.2.4. Para isso, o método sofre uma pequena alteração. O pavio utilizado, mostrado na Figura 25, é cortado no comprimento de 4 cm e apoiado com sua base no fundo de um pequeno copo de vidro. Ali, a parafina (ou mistura) líquida é vazada e solidificada.



Figura 25: Pavio utilizado para ensaios de análise de taxa de regressão

A massa de parafina (ou parafina + cera de carnaúba) selecionada para este ensaio é de 3 g. O valor baixo permite que mais experimentos sejam realizados em menos tempo mas ainda garante a confiança necessária, além de promover economia na quantidade de insumos utilizados. Para a mistura parafina + cera de carnaúba, as relações mássicas seguem, respectivamente, 80 e 20%.



Figura 26: Exemplos de corpos de prova utilizados para estudo de taxa de regressão

Na Figura 26a, vê-se dois copinhos com material e pavio em seu interior. No copinho marcado com o "X", o conteúdo presente é parafina pura, enquanto no copinho marcado com "O" há a mistura parafina + cera de carnaúba 20%.

Um breve passo à passo é definido para a criação dos corpos de prova do zero até que estejam prontos para o ensaio:

- Definição da relação mássica parafina-aditivo
- Pesagem da parafina
- Pesagem do aditivo (caso seja utilizado)
- Acomodação do material total em recipiente para banho maria (no caso, o recipiente mostrado na 24a)
- Acomodação do material líquido no copinho com o pavio
- Aguardar solidificação

## 3.2 ENSAIOS

Conforme mencionado na Seção 3.1, os grãos de parafina fabricados para estudos neste trabalho possuem duas finalidades. Portanto, alguns ensaios serão utilizados para somente uma das finalidades, enquanto outros serão realizados para ambas. Antes da descrição detalhada de cada um dos ensaios, é mencionado seu objetivo de realização e quais tipos de grão participarão do processo.

Ao fim dos ensaios e suas análises, espera-se que o método de fabricação proposto por este trabalho se sobressaia em relação aos outros dois já conhecidos. Semelhantemente, é prevista que a utilização da cera de carnaúba como aditivo traga benefícios.

### 3.2.1 Ensaio de Combustão Preliminar

Antes de quaisquer testes estruturais e futuros testes de queima dos grãos ótimos fabricados, é necessário determinar se o material estudado é realmente passível de utilização para a função designada. Assim, foi realizado um teste primário de combustão em conjunção aos autores do trabalho (FURIATTI; ALVES, 2020), buscando botar à prova a realidade de utilização da parafina com cera de carnaúba em sua mistura. O grão utilizado para este ensaio foi fabricado no método exposto na Subsubseção 3.1.1.3, com as características especificadas na Subseção 3.1.4, utilizando a concentração de 5% de massa de cera de carnaúba.

A bancada de combustão descrita na Subsubseção 3.2.1.1 foi a utilizada para este ensaio de combustão no trabalho.

### 3.2.1.1 Bancada de Testes de Combustão

A bancada é a simulação em escala de um *ramjet*. O *ramjet*, conforme explicado no Capítulo 2, é um tipo de motor a jato muito utilizado em mísseis e até mesmo em algumas aeronaves supersônicas. A Figura 27 mostra esquematicamente a bancada e seus componentes:

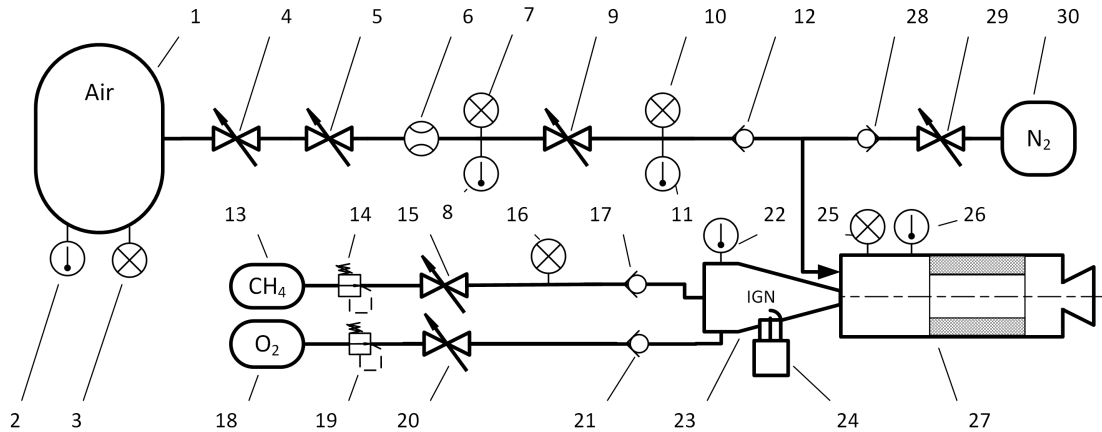


Figura 27: Bancada de Testes de Combustão

Os números indicando componentes representam o seguinte:

- 1 - Tanque de Ar;
- 2,8,11,22,26 - Sensor de Temperatura;
- 3,7,10,16,25 - Sensor de Pressão;
- 4,5,29 - Válvula Solenoide;
- 6 - Medidor de Fluxo;
- 9,15,20 - Válvula de Controle de Fluxo;
- 12,17,21,28 - Válvula de Retenção;
- 13 - Tanque de Metano;
- 14,19 - Regulador de Pressão;
- 18 - Tanque de Oxigênio;
- 23 - Tocha e Aquecedor de Fluxo;
- 24 - Vela de Ignição;
- 27 - Motor *Ramjet*;
- 30 - Tanque de Nitrogênio.

Todos os dados dos ensaios realizados foram obtidos através dos sensores e puderam ser lidos e salvos utilizando um programa de computador desenvolvido exclusivamente para essa finalidade. Entre os dados adquiridos, encontram-se todas as informações necessárias para avaliação do desempenho do combustível utilizado, como eficiência e duração da queima, curvas de pressão e temperatura, entre outros.

A bancada de testes está atualmente no Laboratório de Propulsão Química da FGA/UnB, de responsabilidade do Prof. Dr. Olexy Shinkarenko. A Figura 28 e a Figura 29 são imagens reais da bancada e do sistema de computadores e televisões para acompanhamento dos ensaios e aquisição de dados, cedidas do trabalho de [Furiatti e Alves, 2019]:



Figura 28: Bancada de Testes de Combustão, Foto Real, [Furiatti e Alves, 2019]



Figura 29: Aparato de Aquisição e Leitura de Dados, Foto Real, [Furiatti e Alves, 2019]

### 3.2.2 Passos Pós Solidificação

Com a finalidade de dar início ao processo comparativo, após a fabricação de cada grão de cada método, incluindo os pequenos corpos de prova, os seguintes passos são realizados:

1. Medida das dimensões com paquímetro (certificar que as medidas buscadas foram alcançadas);
2. Análise a olho nu (buscar falhas e trincas visíveis);
3. Pesagem em balança de precisão (checar a massa final para verificação de possível modificação);

Após a meticulosa análise utilizando os passos de 1 a 3, procede-se aos ensaios mencionados ainda nesta seção.

### 3.2.3 Investigação de Bolsas de Ar

O objetivo desse ensaio é verificar a existência de bolhas de ar no interior do grão fabricado que podem torná-lo diferente da condição de homogeneidade desejada. É realizado para os grãos de tamanho funcional.

A melhor maneira de afirmar que um certo componente não está completamente puro é através da sua densidade. No caso dos grãos de parafina, espera-se que sua densidade seja

inversamente proporcional à quantidade de ar presente em seu interior, ou seja, quanto mais bolhas de ar, menor a densidade final.

Relembrando da equação que relaciona densidade com a massa e o volume de uma amostra (Equação 19), é possível calcular a densidade com os valores das outras duas incógnitas definidos. Assim, os grãos fabricados são divididos em seções transversais com espessuras variadas e avaliados em relação à massa e volume. Após esses procedimentos, um cálculo simples utilizando a relação da densidade é feito. A densidade do ar é tida como  $1,225 \frac{kg}{m^3}$  e, quando comparada à densidade teórica da parafina utilizada neste trabalho,  $780 \frac{kg}{m^3}$ , pode observar-se que possui valor extremamente menor. Portanto, quanto menor a densidade encontrada para as seções dos grãos, maior a quantidade de ar incrustado nelas.

Com essas informações dadas, espera-se que, devido à presença de bolhas de ar, os grãos fabricados pelos métodos de fabricação 1 e 2 apresentem densidade inferior aos fabricados pelo método proposto.

### 3.2.3.1 Definição do Volume de Cada Seção Transversal

Os cortes realizados no grão não possuem a qualidade necessária para que medidas precisas sejam tiradas e utilizadas para cálculos de volume. Por isso, o método da submersão em água é utilizado para a definição dos volumes.

Este método consiste em preencher um recipiente de dimensões conhecidas com água à uma altura igualmente conhecida. Calcula-se então o volume inicial de água presente no recipiente com essas dimensões. Acrescenta-se o corpo estudado na água, que irá submergir, aumentando a altura do líquido. Sabe-se que o acréscimo de volume da água é igual ao volume do corpo submerso. Dessa maneira, verifica-se a altura do líquido após a inserção do corpo e calcula-se novamente o volume total. O volume do corpo é igual ao volume total subtraído do volume inicial.

O recipiente utilizado para o cálculo do volume, apresentado na Figura 30, possui as dimensões exibidas na Tabela 4. O cálculo do volume inicial é realizado utilizando a Equação 22.

$$Volume_{inicial-recipiente} = Comprimento \times Largura \times Altura da \acute{A}gua \quad (22)$$

Medidas do Recipiente			
Comprimento (m)	Largura (m)	Altura da Água (m)	Volume Inicial ( $m^3$ )
0,121	0,121	0,051	0,0007467

Tabela 4: Dimensões do recipiente utilizado para aferição de volume





Figura 30: Configuração utilizada para a definição do volume das seções transversais de grãos

Para o cálculo do volume total com o corpo de prova submerso, utiliza-se a Equação 22 com a altura final da água. Com o valor do volume total em mãos, subtrai-se dele o valor do volume inicial, chegando então ao volume do corpo de prova. Para a definição da densidade, divide-se a massa do corpo pelo seu volume.

### 3.2.3.2 Passo à Passo do Ensaio

Os seguintes passos são realizados para que este ensaio seja feito:

1. Separação das seções transversais com espessuras variáveis;
2. Pesagem em balança de precisão de cada seção transversal;
3. Definição do volume de cada seção;
4. Determinação da densidade de cada seção;
5. Cálculo da média das densidades;
6. Comparação das densidades médias.

### 3.2.4 Ensaio de Combustão com Foco em Taxa de Regressão

Este ensaio foi realizado devido ao fechamento da Universidade de Brasília e, consequentemente, à impossibilidade de acesso à bancada apresentada na Subsubseção 3.2.1.1.

Com o objetivo de caracterizar as mudanças na taxa de regressão de um grão de parafina quando uma pequena quantidade mássica de cera de carnaúba é adicionada à sua composição, um teste de combustão é realizado. Com o auxílio de um pavio acoplado no centro do corpo de prova, conforme explicado na Subseção 3.1.5, uma chama é iniciada e se aguarda até que ela se apague. O corpo de prova é fixado no interior de um copo para que ações de ventos sejam evitadas. Para que o tempo de queima seja registrado, um cronômetro é colocado ao lado do copo e todo o processo é gravado por um celular. Para que haja maior confiança de resultados, o

processo é repetido 3 vezes para cada tipo de corpo de prova (com a adição de cera de carnaúba e parafina pura).

Conforme mencionado na Subseção 2.6.1, é interessante para um grão de combustível sólido em um sistema de propulsão híbrido que a taxa de regressão seja a maior possível. Portanto, o corpo de prova com o menor tempo total de queima, ou seja, com a maior taxa de regressão, será considerado superior em relação ao outro. Espera-se que o corpo de prova com o aditivo de cera de carnaúba se saia ligeiramente melhor no teste, alcançando resultado superior.

### 3.2.5 Ensaio de Microdureza Vickers

Os experimentos com o objetivo de determinar a microdureza dos materiais utilizados foram realizados em um equipamento presente no laboratório de Ciências dos Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. O instrumento é o DuraScan 20 G5, da fabricante EMCO-TEST, e é apresentado na Figura 31a.

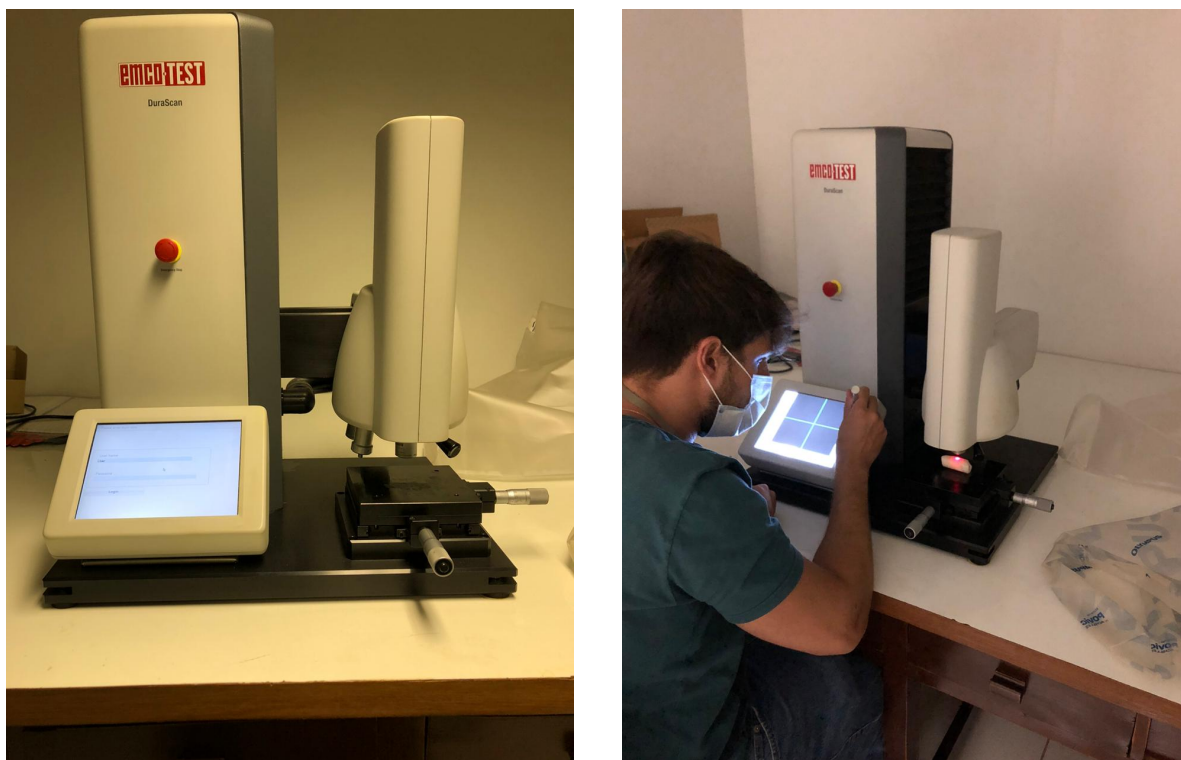


Figura 31: Equipamento utilizado para ensaios de microdureza

Para os ensaios realizados, a carga exercida pela máquina na superfície do material foi de  $0,01 N$ , equivalente à  $1 gf$ . Para cada corpo de prova foram realizadas ao menos 3 medições em locais diferentes e, com os resultados, a média aritmética e a taxa de erro foram calculadas.

Primeiramente 4 corpos de prova foram ensaiados. É possível vê-los na Figura 32: o primeiro corpo na esquerda é composto por parafina pura; o corpo ao meio, somente por cera de carnaúba; à direita, o corpo composto por 95% parafina e 5% cera de carnaúba.



Figura 32: Corpos de prova utilizados na primeira rodada de ensaios de microdureza Vickers

Na segunda rodada de ensaios, foram utilizados 5 novos corpos de prova, exibidos na Figura 33. Da esquerda para a direita, o primeiro corpo é composto de cera de carnaúba pura, e, seguindo, corpos com 15, 20, 30 e 50% de concentração de cera de carnaúba em relação à parafina.



Figura 33: Corpos de prova utilizados na primeira rodada de ensaios de microdureza Vickers

## CAPITULO 4

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.1 COMBUSTÃO PRELIMINAR

Ao final do teste de combustão preliminar, foi concluído que o material é passível de utilização. As figuras 34 e 35 mostram, respectivamente, o grão utilizado e seu estado antes e depois do ensaio e, a Figura 36, o momento do teste.

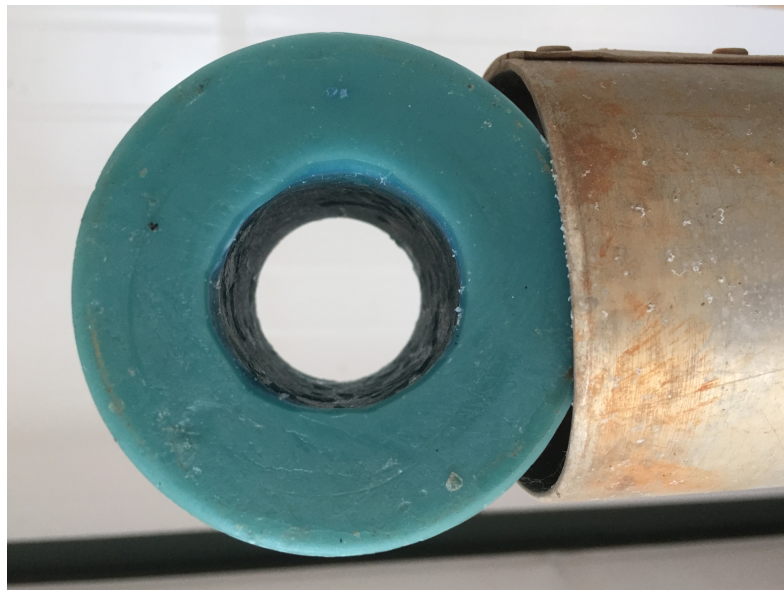


Figura 34: Grão antes do ensaio



Figura 35: Grão após o ensaio



Figura 36: Teste de Combustão Realizado na Bancada da FGA, [Furiatti e Alves, 2019]

Por se tratar somente de um ensaio preliminar, não foram salvos dados finos a seu respeito.

## 4.2 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO

### 4.2.1 Método de Fabricação 1

Três tentativas de fabricação de grão de acordo com o método exposto na Subsubseção 3.1.1.1 foram realizadas e em todas elas o grão apresentou um furo central de diâmetro

variável e comprimento inconstante e não-passante, conforme mostram as Figuras 37, 38 e 39. Este furo era indesejado, visto que o objetivo seria realizá-lo previamente através de furadeira e broca.



Figura 37: Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 1



Figura 38: Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 1



Figura 39: Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 1

Mesmo com o furo indesejado, três tentativas de realizar o furo passante foram feitas, mas frustradas. Em todas o grão trincou e partiu-se ao meio, conforme mostra a Figura 40.



Figura 40: Grão produzido pelo Método de Fabricação 1 após tentativa de furo com broca



Uma característica observada nos grãos anterior às tentativas de furo passante foi a presença visível de inúmeras bolhas de ar. A Figura 41 ilustra esse problema. Essa observação, juntamente aos outros empecilhos encontrados, faz com que o método tenha atingido resultados ruins.



Figura 41: Bolhas de ar no grão produzido pelo Método de Fabricação 1

A Tabela 5 mostra resultados obtidos no método de fabricação 1. Acredita-se que diferença de massa encontrada em relação aos 650 g utilizados para a fabricação venha de perdas relacionadas à não utilização de toda a massa presente no recipiente em que a parafina entrou em fusão durante o processo de vazamento para o tubo de PVC.

Comprimento	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Massa
$\approx 200 \text{ mm}$	$\approx 71 \text{ mm}$	-	642 g

Tabela 5: Resultados obtidos após fabricação de grão utilizando o Método de Fabricação 1, anteriores à tentativa de furo com broca

#### 4.2.2 Método de Fabricação 2

O grão de parafina pura fabricado utilizando o método de fabricação 2, descrito na Seção 3.1, obteve a forma exibida nas Figuras 42 e 43a, e dados sobre ele estão exibidos na Tabela 7.



Figura 42: Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 2

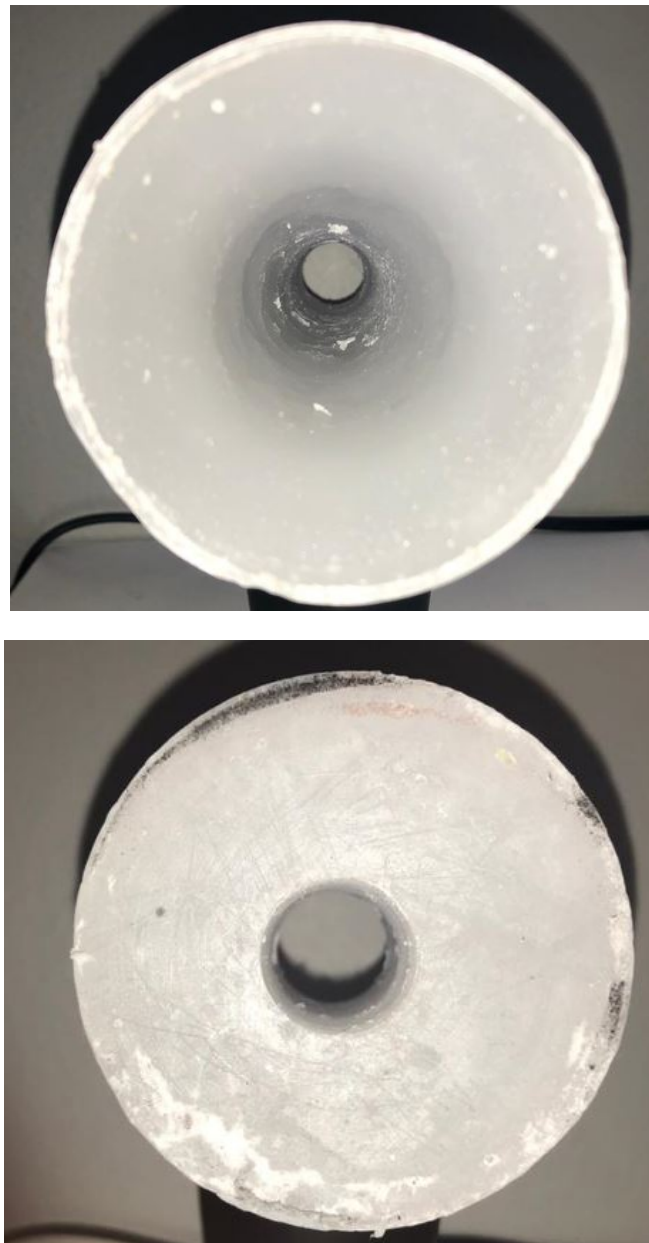


Figura 43: Grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 2

Comprimento	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Peso
$\approx 200\text{ mm}$	$\approx 72\text{ mm}$	Inconstante, $\approx 30\text{ mm}$ em uma extremidade e $20\text{ mm}$ na outra	588 g

Tabela 7: Resultados obtidos após fabricação de grão utilizando o Método de Fabricação 2

Quatro problemas podem ser identificados ao observar o resultado de fabricação. O primeiro, a variação de diâmetro entre a parte superior e inferior do grão. É válido recobrar que o tubo onde a parafina foi vazada e sofreu o processo de solidificação, permaneceu durante todo o tempo em posição vertical. A primeira parte da parafina a perder calor é a que está em contato com a superfície interna do tubo e, portanto, é a primeira a solidificar. Analisa-se então que parte da parafina solidificou-se em contato com o tubo e, em seu interior, parte ainda

líquida escorreu. O segundo problema é a não concentricidade do furo. Isso se dá devido à dificuldade de estabelecer o tubo no centro do molde durante o processo de solidificação. Apesar de a tampa superior do molde ser furada e tentar garantir a concentricidade, conforme mostrado na Figura 44, a parte inferior permite um escorregamento do tubo de 20 *mm*. Uma alternativa de solução é a utilização de algum tipo de guia na tampa inferior. O terceiro problema pode ser visto na Figura 45. Uma quantidade muito grande de bolhas de ar são vistas no interior do grão, algo extremamente indesejado para combustíveis sólidos de foguetes híbridos. Finalmente o quarto problema aparece quando se analisa o peso. Foram utilizados 600 *g* de parafina para a fabricação do grão. Os 588 *g* obtidos ao final da solidificação são inferiores ao valor inicial devido à abertura existente entre o tubo interno e a tampa inferior. Parte da parafina líquida acabou escoando para o interior do tubo de 20 *mm*, fazendo com que parte da massa fosse perdida.



Figura 44: Tubo de PVC e tubo interno para criação do furo passante do Método de Fabricação 2

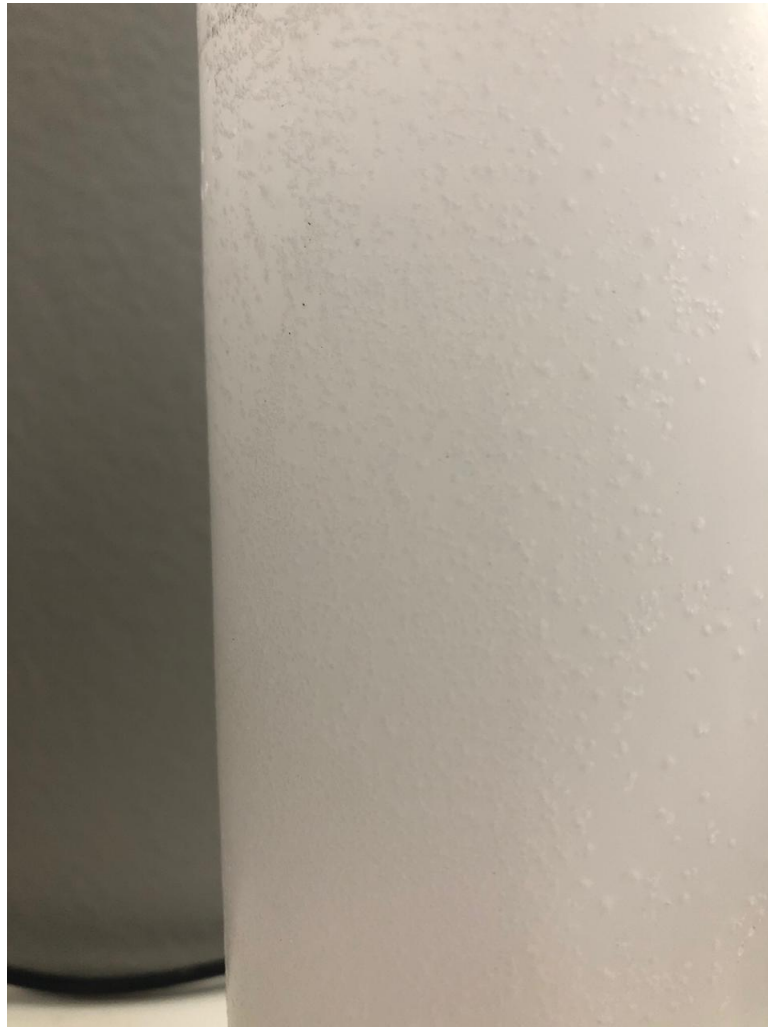


Figura 45: Visão próxima do grão de parafina produzido pelo Método de Fabricação 2

### 4.2.3 Método de Fabricação Proposto

Este método de fabricação utilizou a bancada construída com esse único objetivo. Houve alterações em relação ao proposto previamente para a fabricação dos grão saqui apresentados. A primeira diz respeito ao diâmetro interno do furo concêntrico passante, que deixou de ser de  $20\text{ mm}$  e foi para  $30\text{ mm}$ . A segunda foi a utilização de um corante azul durante o processo de fusão da parafina sólida. O corante é utilizado para que o grão adquira característica opaca, buscando evitar que a energia térmica da chama de difusão seja transmitida para o seu interior através da radiação. Essas alterações foram necessárias devido ao fato de os grãos fabricados serem compartilhados para o trabalho de (FURIATTI; ALVES, 2020), que realizaram testes em um estatorreator com ancorador de chamas. A adição do corante, por ser feita em pequenas quantidades, não provoca mudanças em características como densidade, temperaturas de fusão e solidificação e dureza.

Independente das mudanças realizadas, o resultado obtido foi satisfatório, conforme mostram as Figuras 46, 47 e 48.



Figura 46: Grão fabricado utilizando Método de Fabricação Proposto



Figura 47: Grão fabricado utilizando Método de Fabricação Proposto



Figura 48: Grão fabricado utilizando Método de Fabricação Proposto

O acabamento do grão possui aspecto superior quando comparado aos fabricados pelos dos primeiros métodos. O furo passante, com exceção de pequenas "rebarbas" de parafina que podem ser retiradas facilmente com uma faca ou estilete, ficou perfeitamente concêntrico e apresentou diâmetro condizente com o esperado.

Em relação à bolhas de ar no interior do grão, não é possível realizar uma análise à olho nu devido à opacidade causada pela presença do corante.

A Tabela 8 apresenta resultados do grão fabricado pelo Método de Fabricação Proposto.

Comprimento	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Peso
$\approx 206 \text{ mm}$	$\approx 72 \text{ mm}$	$\approx 28 \text{ mm}$	600 g

Tabela 8: Resultados obtidos após fabricação de grão utilizando o Método de Fabricação Proposto

#### 4.2.4 Investigação de Bolhas de Ar

Com o objetivo de verificar vantagens e desvantagens nos métodos de fabricação apresentados, foi realizada uma investigação da quantidade de bolhas de ar no interior de cada grão. O ensaio é descrito na Subseção 3.2.3 e os resultados adquiridos são exibidos nas Tabelas 9 e 10, onde a unidade para massa é  $kg$ , para altura,  $m$ , para volumes,  $m^3$  e, para densidades,  $\frac{kg}{m^3}$ .

Devido aos resultados precários de fabricação utilizando o método 1, este ensaio não foi realizado com os grãos provenientes dele.

Grão do Método de Fabricação 2					
Nº Seção	Massa	Altura Total	Volume Total	Volume Seção	Densidade Seção
1	0.064	0.057	0.000834537	0.000087846	728.5476857
2	0.083	0.059	0.000863819	0.000117128	708.6264599
3	0.109	0.06	0.00087846	0.000131769	827.2051848
4	0.066	0.056	0.000819896	0.000073205	901.5777611
<b>Densidade Média: 777.8764 <math>\frac{kg}{m^3}</math></b>					

Tabela 9: Resultados obtidos nos ensaios de cada seção do grão fabricado pelo método 2

Grão do Método de Fabricação Proposto					
Nº da Seção	Massa	Altura Total	Volume Total	Volume Seção	Densidade Seção
1	0.067	0.056	0.000819896	0.000073205	915.2380302
2	0.06	0.057	0.000834537	0.000087846	683.0134554
3	0.078	0.057	0.000834537	0.000087846	887.917492
4	0.055	0.056	0.000819896	0.000073205	751.3148009
<b>Densidade Média: 819.6161 <math>\frac{kg}{m^3}</math></b>					

Tabela 10: Resultados obtidos nos ensaios de cada seção do grão fabricado pelo método proposto

Para tirar conclusões dos resultados apresentados, é importante ressaltar que a mesma parafina foi utilizada para a fabricação de todos os grãos e que, apesar de ter sido usada uma

densidade teórica para cálculos, é comum que a densidade experimental exiba valores diferentes devido ao fato de o fabricante do material utilizado ser diferente do fabricante de onde os dados teóricos foram retirados.

Percebe-se ao checar os resultados que o esperado foi obtido, o grão fabricado pelo método proposto obteve densidade média superior ao fabricado pelo método de fabricação 2. Isso indica que a composição do material fabricado pelo método proposto é predominantemente de parafina e, caso exista, a presença de bolhas de ar é inferior à do outro método analisado.

### 4.3 DUREZA

Após a primeira rodada de ensaios de dureza, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 11.

Material	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 4	Dureza 5	Média
Parafina Pura	0,5	0,5	0,5	-	-	0,5
Cera de Carnaúba	5,4	4,4	4,1	4,6	3,9	4,48
Mistura 5%	0,5	0,5	0,5	-	-	0,5

Tabela 11: Resultados obtidos após primeira rodada de ensaios de dureza. Escala de medida: HV

A parafina pura obteve resultados dentro do esperado, que foram cravados nas três medições realizadas. O fato de as medições apresentarem o mesmo resultado indica grande acuracidade e homogeneidade suficiente do corpo de prova. Diferentemente do caso da cera de carnaúba pura, que possui ponto de fusão e solidificação menos espaçados entre si, a parafina, ao ser colocada no recipiente de solidificação no estado líquido, leva mais tempo para solidificar, tornando possível melhor uma interação entre as moléculas.

Foram realizadas 5 medidas para o corpo de prova composto por cera de carnaúba pura devido às grandes variações encontradas nas 3 primeiras medições. Uma das possíveis causas da grande diferença de valores encontrados é a heterogeneidade do corpo de prova. Ao fabricá-lo, percebeu-se que a solidificação começou a ocorrer rapidamente, antes mesmo que o resto do material em estado líquido pudesse ser abrigado no recipiente. Ainda assim, observando a média dos resultados, percebe-se que a dureza da cera de carnaúba é consideravelmente superior à da parafina em cerca de 9 vezes. Buscando obter valores mais acurados, foi fabricado um novo corpo de prova com mais cuidado e velocidade ao passar o material líquido do recipiente de fusão ao recipiente de solidificação.

A mistura de parafina e cera de carnaúba, com 5% mássico do aditivo, não obteve o resultado esperado. Como pode ser observado na Tabela 11, a dureza não foi alterada com a presença da cera. Para a segunda rodada de ensaios, com o objetivo da verificação de alguma variação significativa nos resultados, mais corpos de prova foram fabricados, dessa vez com 10%, 15% e 20% de presença mássica da cera de carnaúba.

Nas Figuras 49, 50 e 51 são mostrados resultados apresentados pelo microdurômetro da



primeira rodada de ensaios, sendo um para cada corpo de prova.

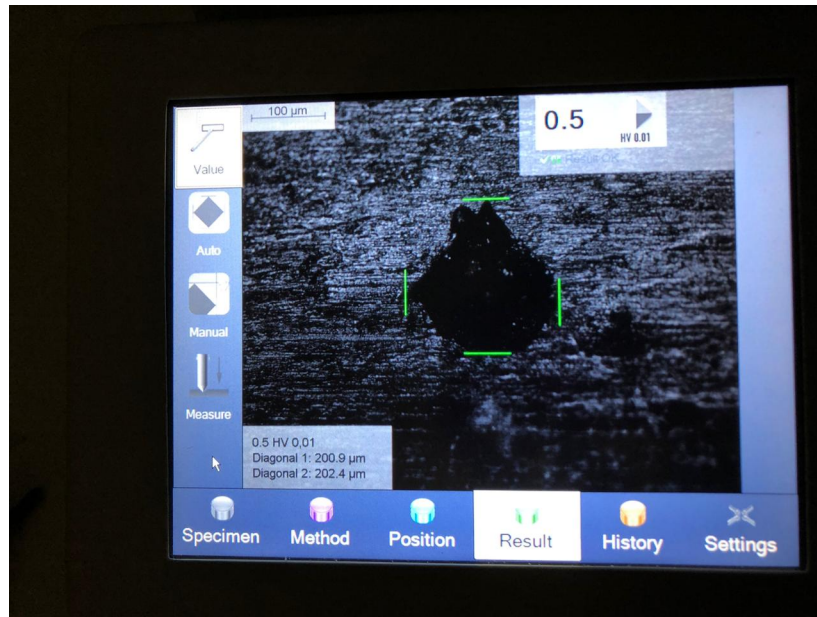


Figura 49: Resultado para o corpo de prova de parafina pura na primeira rodada de ensaios

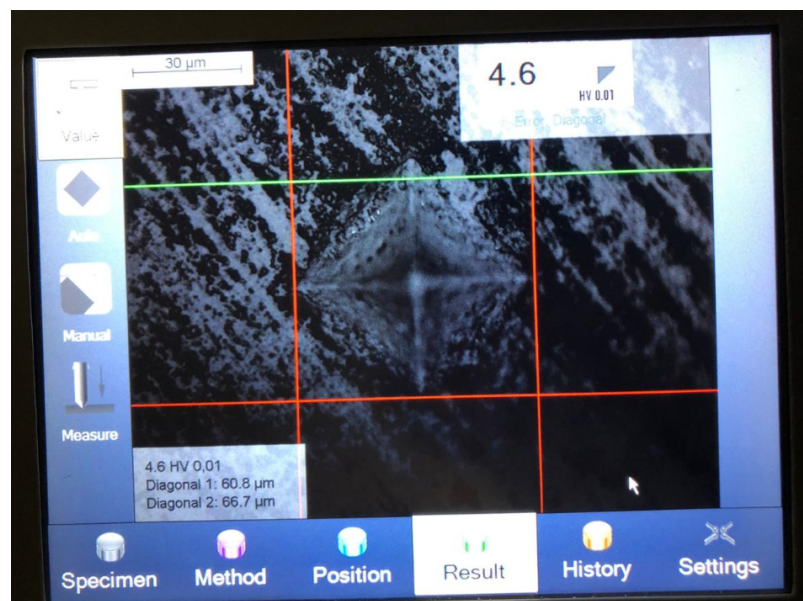


Figura 50: Resultado para o corpo de prova de cera de carnaúba pura na primeira rodada de ensaios

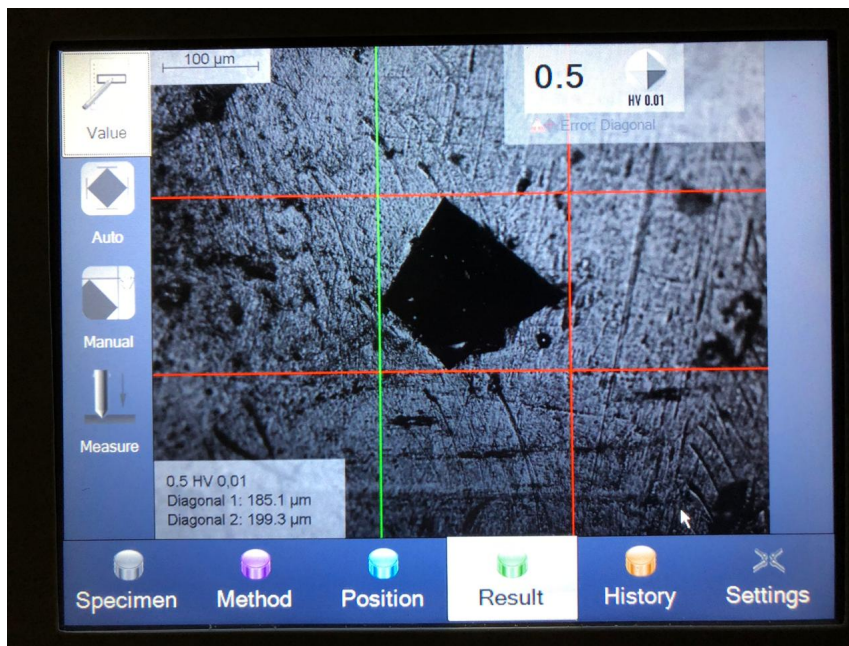


Figura 51: Resultado para o corpo de prova com 5% de cera de carnaúba na primeira rodada de ensaios

Após a segunda e última rodada de ensaios de dureza, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 12.

Material	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Média
Cera de Carnaúba	2,5	2,2	2,5	2,4
Mistura 15%	0,4	0,5	0,5	0,47
Mistura 20%	0,5	0,5	0,5	0,5
Mistura 30%	0,7	0,6	0,7	0,67
Mistura 50%	1,1	1,2	1,1	1,13

Tabela 12: Resultados obtidos após segunda rodada de ensaios de dureza. Escala de medida: HV

Como pode ser visto, corpos de prova com diferentes concentrações de cera de carnaúba foram avaliados com o objetivo da criação de uma curva Dureza *VS* Concentração de Cera de Carnaúba, mostrada na Figura 52.



Figura 52: Curva Microdureza Vickers VS Concentração de Cera de Carnaúba

O primeiro resultado à ser analisado é a dureza da cera de carnaúba pura. Percebe-se que sua média, em comparação com a média do primeiro ensaio, sofreu queda significativa, se movendo de 4,48 para 2,4. Novamente, essa queda pode ser causada pelo nível precário de heterogeneidade do corpo de prova. Na segunda fabricação do corpo de prova, o problema encontrado na rápida solidificação do material foi otimizado e vencido, mas o resultado ainda não pareceu heterogêneo o suficiente. Ao comparar a imagem microscópica fornecida pela máquina nos dois ensaios (imagem do primeiro ensaio na Figura 50 e segundo ensaio na Figura 53), observa-se grande diferença nas microestruturas, o que é a provável causa da disparidade de resultados. Para a criação da curva de dureza, utilizou-se como valor para a concentração de 100% a média aritmética das médias provenientes de cada ensaio, 3,44.

Caso a curva de dureza apresentasse comportamento linear, poderia-se afirmar que o segundo ensaio para a cera de carnaúba pura foi o mais condizente com a realidade, já que o corpo de prova com concentração de 50% apresentou resultado médio de 1,13, valor que é aproximadamente 50% do resultado médio apresentado pela cera no mesmo segundo ensaio. Como não é o caso, essa conclusão é descartada.

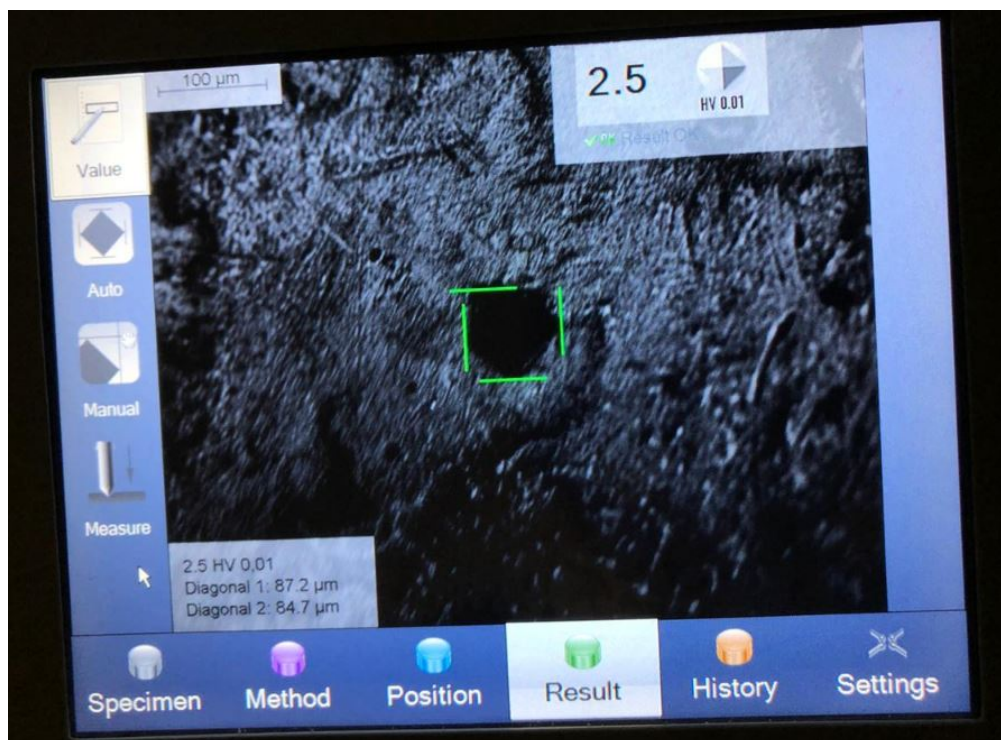


Figura 53: Resultado da segunda rodada de ensaios para a cera de carnaúba pura

Ao analisar a curva da Figura 52, percebe-se que é necessária uma concentração mínima de cera para que seja observada alguma diferença na dureza do composto. Somente a partir do corpo de prova com concentração de 30% mostrou-se aumento no resultado.

#### 4.4 TAXA DE REGRESSÃO

O primeiro teste realizado buscando compreender se há ou não aumento na taxa de regressão da parafina com o acréscimo da cera de carnaúba obteve resultados não previstos. Os dois corpos de prova, mostrados na Figura 26a, queimaram durante aproximadamente a mesma duração de tempo. A diferença não passou de mais de 30 segundos, sendo que a que possuía cera de carnaúba na mistura apagou primeiro. A Tabela 14 apresenta os resultados discriminados do primeiro teste. A composição mássica de cera no corpo de prova com a presença do aditivo foi de 20%.

Teste 1 - 3g de material total		
Quantidade de Parafina	Quantidade de Cera de Canaúba	Tempo de Queima
3 g	-	31m40s
2,4 g	0,6 g	31m10s

Tabela 14: Dados do primeiro teste de queima

O segundo teste de queima obteve resultado semelhante ao primeiro. A única pequena diferença encontrada foi que o primeiro corpo de prova a exibir fim da chama foi o que continha parafina pura. Seus dados são vistos na Tabela 16. Também havia presença mássica de 20% de

cera de carnaúba no corpo de prova da mistura.

Teste 2 - 3g de material total		
Quantidade de Parafina	Quantidade de Cera de Carnaúba	Tempo de Queima
3 g	-	42m53s
2,4 g	0,6 g	43m20s

Tabela 16: Dados do segundo teste de queima

O terceiro teste realizado obteve os resultados esperados após os dois anteriores. Dessa vez com 10% de massa ocupada pela cera de carnaúba no corpo com a presença do aditivo, não houve alteração grande nos tempos totais de queima. Os dados do ensaio são exibidos na Tabela 18.

Teste 3 - 3g de material total		
Quantidade de Parafina	Quantidade de Cera de Carnaúba	Tempo de Queima
3 g	-	40m57s
2,7 g	0,3 g	41m12s

Tabela 18: Dados do terceiro teste de queima

Observa-se ao analisar todos os ensaios que a diferença do tempo de queima é muito pequena em relação ao total, algo em torno de 1%. Assim, conclui-se que não há variação significativa da taxa de regressão quando utiliza-se cera de carnaúba como aditivo.

## CAPITULO 5

### CONCLUSÃO

Após realização de todos os ensaios propostos, pode-se afirmar que a bancada de fabricação de grãos fabricada possui resultados superiores aos outros métodos de fabricação apresentados. As dimensões esperadas para os grãos foram alcançadas com erros de dimensão pequena, a quantidade de bolhas de ar é inferior quando comparada aos outros métodos e o grão apresenta qualidade estrutural aceitável para utilização. Sabe-se que grãos de combustível sólido com apenas uma porta de combustão não são os que apresentam melhores rendimentos de queima, mas devido à facilidade de fabricação, são interessantes para testes com aditivos ou variações de componentes no motor utilizado, caso seja o objetivo.

A cera de carnaúba também teve resultados positivos, apresentando melhoras na dureza de um corpo de parafina quando acrescentada. Um grão com dureza elevada é interessante devido às grandes tensões experimentadas durante a combustão e, principalmente, durante a aceleração. Outro ponto que pode ser aproveitado como positivo é a diminuição da temperatura de solidificação do corpo de prova aditivado com a cera. Ademais, o aditivo não apresentou diminuição da taxa de regressão, o que é de extrema importância, visto que um dos motivos da utilização da parafina como combustível é a sua alta taxa de regressão.

Os resultados positivos encorajam a utilização de ceras vegetais como aditivos na fabricação de grãos de combustível sólido para utilização em foguetes movidos à propelentes híbridos. Há um espaço grande para inserção de novos materiais e, conseqüentemente, trabalhos e pesquisas nessa área.

#### 5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Uma série de sugestões pode ser dada para aprofundar os estudos feitos neste trabalho. Algumas são listadas à seguir:

- Estudo da transferência de calor durante a solidificação do grão, buscando otimizações;
- Substituição do tubo de PVC por um tubo de alumínio na bancada de fabricação de grãos;

- Repetição de todos os ensaios para grãos funcionais, fabricados na bancada proposta, com a adição da cera de carnaúba em diversas concentrações;
- Fabricação e avaliação de um grão composto somente por cera de carnaúba;

## Referências Bibliográficas

- AZEVEDO, V. A. Desenvolvimento de bancada para ensaios de estatorreatores a combustível sólido. 2018.
- AZEVEDO, V. A. Desenvolvimento de bancada para ensaios de estatorreatores a combustível sólido. 2018.
- BERTOLDI, A. E. d. M. Avaliação experimental da queima de parafina e óxido nitroso em motores híbridos. 2007.
- BOROS, C.; KONECNY, P. Development of wax fuel grain for hybrid rocket motor. **Advances in Military Technology**, v. 4, n. 2, p. 5–11, 2009.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução [Materials science and engineering: an introduction]**. [S.l.]: Rio de Janeiro, RJ, Brazil, LTC Ed, 2008.
- CÂMARA, G. Z.; INGLEZ, T. M. D. Desenvolvimento e teste de combustível alternativo a base de parafina para motores de foguete a propelente híbrido. 2013.
- CANALE, L. **Ensaio de Dureza e de Impacto**. 2000. University Lecture.
- CASTANOS, F. J. L. Entrainment phenomena of paraffin based fuels in hybrid rocket engines combustion. Italy, 2012.
- CHIAVERINI, M. J. et al. Regression-rate and heat-transfer correlations for hybrid rocket combustion. **Journal of Propulsion and Power**, v. 17, n. 1, p. 99–110, 2001.
- DELFORGE, D. Y. M. et al. Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto charpy. (**Publicação FEM**), [sn], 1994.
- DOMINGOS, C. H. F. L. Estudo sobre o aumento da eficiência de combustão de um motor foguete híbrido utilizando parafina como combustível. 2019.
- FURIATTI; ALVES. Estudo de desempenho de estatorreator a combustível sólido com ancorador de chama reativo. 2020.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física 2**. [S.l.]: CEA, 2004.
- HUMBLE, R. **Space Propulsion Analysis and Design**. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 1995. ISBN 9780070313200. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=GLWHQgAACAAJ>>.
- KARABEYOGLU, A. Hybrid rocket propulsion for future space launch. **Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Aero/Astro 50th Year Anniversary**, 2008.



- KARABEYOGLU, M.; ALTMAN, D.; CANTWELL, B. J. Combustion of liquefying hybrid propellants: Part 1, general theory. **Journal of Propulsion and Power**, v. 18, n. 3, p. 610–620, 2002.
- KUMAR, R. **Regression rate studies using wax as a hybrid fuel**. 2014. Tese (Doutorado) — Indian Institute of Technology Madras India.
- LACAVA, P. T.; BARROS, T. Protótipo de motor foguete movido a propelente híbrido. **Proceeding Anais do XVI Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA—XVI ENCITA**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, p. 1–12, 2010.
- MARXMAN, G.; WOOLDRIDGE, C.; MUZZY, R. Fundamentals of hybrid boundary-layer combustion. In: **Progress in Astronautics and Rocketry**. [S.l.]: Elsevier, 1964. v. 15, p. 485–522.
- MARXMAN, G. A. Combustion in the turbulent boundary layer on a vaporizing surface. In: ELSEVIER. **Symposium (International) on Combustion**. [S.l.], 1965. v. 10, n. 1, p. 1337–1349.
- NAKAGAWA, I.; USUI, Y. Improvement in the manufacture of wax-based fuel for hybrid rockets. **Science and technology of energetic materials**, JAPAN EXPLOSIVES SOC C/O JAPAN EXPLOSIVES INDUSTRY ASSOC, ICHIJOJI BLDG., 2 . . . , v. 78, n. 5-6, p. 111–116, 2017.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. [S.l.]: Bookman, 2013. v. 4ª Edição.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Mecânica (vol. 1)**. [S.l.]: Editora Blucher, 2013. v. 394.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. v. 2.
- OIKNINE, C. New perspectives for hybrid propulsion. In: **42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 4674.
- PASTRONE, D. Approaches to low fuel regression rate in hybrid rocket engines. **International Journal of Aerospace Engineering**, Hindawi, v. 2012, 2012.
- PISCITELLI, F. et al. Microcrystalline paraffin wax as fuel for hybrid rocket engine. In: **6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Krakow, Poland**. [S.l.: s.n.], 2015.
- PISCITELLI, F. et al. Characterization and manufacturing of a paraffin wax as fuel for hybrid rockets. **Propulsion and Power Research**, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 218–230, 2018.
- QUIMIDROL. **FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO - CERA DE CARNAÚBA**. [S.l.], 2014.
- QUIMIDROL. **FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO - PARAFINA SÓLIDA INDUSTRIAL**. [S.l.], 2014.
- RODRIGUES, L. M. et al. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cadernos UniFOA**, v. 9, n. 2 (Esp.), p. 39–44, 2017.
- SUTTON, G.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets**. [S.l.: s.n.], 2010.

THEBA, R.; VEALE, K.; BEMONT, C. Development of a combustion visualisation hybrid rocket motor. **R&D Journal**, Ownership of copyright in terms of the Work remains with the Authors, v. 33, p. 97–104, 2017.

THOMAS, J. C. et al. Hybrid rocket burning rate enhancement by nano-scale additives in htpb fuel grains. In: **50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 3955.

VEALE, K. et al. A review of the performance and structural considerations of paraffin wax hybrid rocket fuels with additives. **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 141, p. 196–208, 2017.

WIDJIJONO, W.; AGUSTIONO, P.; IRNAWATI, D. Mechanical properties of carving wax with various ca-bentolite filler composition. **Dental Journal (Majalah Kedokteran Gigi)**, v. 42, n. 3, p. 114–117, 2009.