



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **DESENVOLVIMENTO E TESTE DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO A BASE DE PARAFINA PARA MOTORES DE FOGUETE A PROPELENTE HÍBRIDO**

Por,  
**Gabriel Zortéa Câmara 08/30127**  
**Tammy Mayara Daltoé Inglez 09/0032748**

**Brasília, 23 de fevereiro de 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# DESENVOLVIMENTO E TESTE DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO A BASE DE PARAFINA PARA MOTORES DE FOGUETE A PROPELENTE HÍBRIDO

POR,

**Gabriel Zortéa Câmara 08/30127**  
**Tammy Mayara Daltoé Inglês 09/0032748**

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

### **Banca Examinadora**

Prof. Artur Elias de Moraes Bertoldi, UnB/ FGA  
(Orientador)

---

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras, UnB/ ENM

---

Prof. Paolo Gessini, UnB/ FGA

---

Brasília, 23 de fevereiro de 2013

### **Dedicatória(s)**

*Aos meus pais, que fizeram da minha criação um aprendizado de amor e respeito. Às minhas queridas irmãs, cujo exemplo me inspira sempre a superar os desafios.*

*Tammy Mayara Daltoé Inglês*

*A toda minha família que sempre, com muito amor, me apoiou, deu a oportunidade que eu tive para estudar e me ensinou os valores que sigo.*

*Gabriel Zortéa Câmara*

## Agradecimentos

*É difícil lembrar todas as pessoas que me ajudaram nessa caminhada, o melhor que posso fazer é tentar citar ao menos alguns que foram fundamentais.*

*Primeiramente quero agradecer aos meus amigos e aos barulhentos que não apenas nas diversas horas de festa, sempre estiveram presentes também nos momentos nem tão divertidos assim, como momentos difíceis e madrugadas intermináveis estudando para provas.*

*Aos funcionários que trabalham comigo, em quatro anos trabalhando junto aprendi muito com eles.*

*Aos meus pais que são meus exemplos de pessoas trabalhadoras e honestas, ao meu padrinho que me ensinou o valor do trabalho, a toda minha família que sempre esteve muito unida e à Izabela pelo apoio e compreensão.*

*A minha dupla neste trabalho Tammy, que conheço desde antes da faculdade e tornou isso possível. Aos técnicos do SG-9 que tornaram possível o projeto em especial ao Wesley e ao Marcão. Ao grupo que esteve presente comigo no projeto: Summaya, Artur, Erlan e Fábio. Aos antigos membros do grupo GPA, especialmente ao Rodrigo Gomes, Fábio Resende, Pedro Kaled e Cristiano Vilanova. Aos funcionários da secretaria do ENM, Oziel, Neuzinha e Fernanda. Aos professores de engenharia mecânica da Universidade de Brasília por todo o conhecimento que me transmitiram em especial ao meu orientador Artur Elias de Moraes Bertoldi que impulsionou o projeto e cujo o esforço e determinação contribuíram diretamente para a conclusão deste projeto. E ao professor Carlos Alberto Gurgel Veras que foi o pioneiro desse projeto no Brasil.*

*Gabriel Zortéa Câmara*

*As ajudas vieram de muitas direções, dentro e fora da Universidade. Dentro dela, agradeço primeiramente ao Gabriel Câmara, cujo trabalho e dedicação com o projeto foram essenciais para a sua realização. Foi uma surpresa fantástica ter o prazer de trabalhar com uma pessoa que eu conhecia e desconhecia há tanto tempo.*

*Aos colegas de projeto, inicialmente Danilo Sakay, Fábio Resende, Rodrigo Gomes e Fábio Oliveira. Hoje, Gabriel, Sumaya, Artur, Fábio e Erlan.*

*Aos professores e técnicos da Universidade de Brasília, que sempre apresentaram grande interesse em nos auxiliar nas questões teóricas e técnicas. Aos técnicos do SG-9 e Bloco G, Wesley, Marcão e Felipe, entre outros. Ao professor Carlos Alberto Gurgel Veras, pela paixão à engenharia aeroespacial que abriu tantas portas. Ao nosso orientador Artur Elias de Moraes Bertoldi, enérgico e dedicado pesquisador.*

*Aos meus amigos, que nem sempre puderam estar junto comigo, mas que, ao mesmo tempo, sempre estiveram presentes.*

*À minha família, sempre me ajudando e impulsionando. À meus pais, João e Iracema, que me ensinam todos os dias os valores que regem uma família. À Ana, Joice, Thaís, as melhores irmãs que existem, e ao Gabriel, pelo carinho e paciência.*

*Tammy Mayara Daltoé Inglês*

---

## RESUMO

Combustíveis alternativos para a propulsão aeroespacial são cada vez mais estudados como alternativas aos derivados de petróleo devido a seu baixo preço, segurança, estabilidade, sustentabilidade e facilidade de manuseio. Estas vantagens são ainda evidenciadas em estudos que já permitem afirmar que a parafina combinada com alguns óleos, como o retirado de gordura animal, pode melhorar a taxa de regressão de motores que utilizam o combustível no estado sólido e o oxidante na forma líquida ou gasosa, tornando o custo-benefício desses combustíveis excelente.

Este texto apresenta um estudo sobre a taxa de regressão de queima de um motor de foguete híbrido utilizando como oxidante o gás oxigênio e como combustível uma parafina alternativa, sendo esta uma mistura de óleo de gordura bovina e parafina. É incluída uma breve história a respeito dos motores de foguetes a propelentes híbridos e uma explicação sobre a taxa de regressão, a qual é apontada como um dos principais problemas dessa nova tecnologia.

Em ensaios utilizando o par propelente citado, pode-se obter uma curva da taxa de regressão pela vazão mássica do oxidante e com a utilização do software EES foram calculadas as constantes da equação de regressão.

---

## ABSTRACT

Alternative fuels for aerospace propulsion are more studied because of their price, security, stability, sustainability and easy of handling. These advantages are more explicit by studies that have shown that with some combination of paraffin with oils, for example the animal fat's one, can improve the regression rate of hybrid rockets which use solid fuel and oxidant in the liquid or gas form, making the cost-benefit of this class of fuels excellent.

This paper presents a study about the regression rate of a hybrid rocket motor using oxygen gas as the oxidant and alternative paraffin, which is a mixed with beef tallow and paraffin as the fuel. It's included a brief history about the hybrid motor of rockets and an explanation of the regression rate, which is one of the main problems of this new technology.

In experiments using the propellant pair above, we can obtain a curve regression rate of the oxidant mass flow rate and using the software ESS, the constants from the regression equation were calculated.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 MOTOR DE FOGUETES A PROPELENTES HÍBRIDOS	2
1.2 ESTADO DA ARTE	3
1.3 MOTIVAÇÃO	4
1.4 OBJETIVOS	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
2.1 PROPELENTES	7
2.2 TAXA DE REGRESSÃO	9
2.2.1 Dopagem do Grão	9
2.2.2 Efeito “Swirl”	10
<b>3 BANCADA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA</b>	<b>12</b>
3.1 BANCADA DE ENSAIOS	12
3.2 GRÃO	15
3.2.1 Parafina Dopada	15
3.2.2 Processo de Fabricação do Grão de Combustível	16
3.3 RETIRADA DO ÓLEO DO SEBO BOVINO	19
3.4 CÁLCULO DA TAXA DE REGRESSÃO	19
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>21</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>26</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>28</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>30</b>
ANEXO I: Fotos da bancada e do processo de fabricação	31
ANEXO II: Caracterização da Parafina Comum	38
ANEXO III: Programa computacional no EES de cálculo da taxa de regressão	39
ANEXO IV: Descrição do Sistema de Aquisição	40
ANEXO V: Descrição do Sistema de Controle	41
ANEXO VI: Gráficos e Descrição dos Resultados	42

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de combustão de um MFPH.....	6
Figura 2 - Modelo de queima de parafina .....	6
Figura 3- Esquema do NASA Ames HybridCombustionFacility, com modificações.....	8
Figura 4 - Desenho esquemático da injeção com efeito "swirl" de Tamura <i>et al.</i> (1999).....	10
Figura 5 - Efeito "swirl"(International Plasma Technology Center).....	11
Figura 6 - Configuração do grão proposto por Chang <i>et al.</i> (2005).....	11
Figura 7 - Montagem esquemática do grão e dos flanges .....	13
Figura 8- Molde dos grãos .....	17
Figura 9 - Desenho do motor para esfriamento da parafina.....	18
Figura A. 1- Vista traseira do motor .....	31
Figura A. 2 - Sistema de injeção de gases.....	32
Figura A. 3 - Tubeira dentro da câmara de celeron.....	32
Figura A. 4 - Quadro elétrico de acionamento de válvulas .....	33
Figura A. 5 - Sistema de aquisição.....	33
Figura A. 6 - Motor de centrifugação da parafina.....	33
Figura A. 7 - Grão antes da combustão .....	34
Figura A. 8 - Grão depois da combustão.....	34
Figura A. 9 - Case de fabricação do grão .....	35
Figura A. 10 - Tubeira de cobre consumida.....	36
Figura A. 11 - Derretimento do sebo.....	36
Figura A. 12 - Amostras da mistura de parafina com sebo bovino .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções de parafina comum e óleo de sebo bovino .....	16
Tabela 2 - Dados dos testes .....	21
Tabela 3 - Dados obtidos em cada ensaio .....	22
Tabela 4 - Karabeyoglu, 1998, com adaptações.....	23
Tabela 5- Resultados do sistema de aquisição .....	23
Tabela 6 - Análise de custo .....	27



# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$a$ : coeficiente da taxa de regressão (mm/s)  
 $A_p$ : área da porta de combustão (m<sup>2</sup>)  
 $A_{pf}$ : área final da porta de combustão (m<sup>2</sup>)  
 $B$ : coeficiente de insuflamento  
 $c^*$ : velocidade característica de exaustão (m/s)  
 $C_d$ : coeficiente de descarga  
 $d$ : diâmetro (mm)  
 $d_f$ : diâmetro final da porta de combustão (mm)  
 $G$ : fluxo de massa (g/cm<sup>2</sup>s)  
 $G_i$ : fluxo de massa inicial de oxidante (g/cm<sup>2</sup>s)  
 $H_v$ : calor total de volatilização (J)  
 $L_g$ : comprimento do grão (mm)  
 $I_{sp}$ : impulso específico (s)  
 $O/F$ : razão de mistura entre oxidante combustível  
 $m$ : expoente do comprimento do grão (m)  
 $\dot{m}$ : vazão mássica (g/s)  
 $\dot{m}_{ox}^{ter}$ : vazão mássica de oxidante no início do evento de decaimento do empuxo (g/s)  
 $m_f$ : massa de combustível consumido (kg)  
 $\bar{m}_{ox}$ : vazão mássica média do oxidante (g/s)  
 $m_f$ : massa de combustível consumido (kg)  
 $n$ : expoente do fluxo de mássico de oxidante  
 $N$ : número de portas de combustão  
 $\bar{r}$ : média da taxa de regressão do grão combustível sólido (mm/s)  
 $t_b$ : tempo nominal de queima (s)  
 $t_q$ : tempo de queima através dos dados dos vídeos (s)  
 $t_{te}$ : tempo de decaimento do empuxo (s)  
 $V_b$ : velocidade axial na chama (m/s)  
 $V_e$ : velocidade na borda exterior da camada limite (m/s)  
 $V_f$ : volume do combustível consumido (m<sup>3</sup>)  
 $x$ : posição axial dentro da câmara de combustão (m)

## Símbolos Gregos

$\mu$ : viscosidade do gás [cP]  
 $\Delta$ : variação entre duas grandezas similares  
 $\rho$ : massa específica [g/m<sup>3</sup>]  
 $\gamma$ : razão entre os calores específicos

## Subscritos

$f$ : combustível  
 $i$ : inicial  
 $port$ : porta de combustão  
 $prop$ : propelente  
 $ox$ : oxidante  
 $tot$ : total

## **Sobrescritos**

- Variação temporal
- Valor médio

## **Siglas**

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

MFPH: Motores de foguetes à propelentes híbridos

FPH: Foguetes à propelentes híbridos

HTPB: Polibutadienohidroxilado

PMMA: Polimetilmetacrilato

PE: Polietileno

GOX: Gás Oxigênio

LOX: oxigênio líquido

PB: Polibutadieno

# 1 INTRODUÇÃO

Turner (2005) destacou que desde a pré-história o homem sempre teve interesse em objetos se locomovendo, a começar pela roda que deu origem as carroças e posteriormente aos carros. Séculos mais tarde uma nova fase surgiu, a curiosidade sobre o desconhecido representado pelo espaço deu origem aos veículos aeroespaciais, que começaram a ser mais evidentes e estudados.

Acredita-se que a invenção da pólvora em 1232 na China deu origem aos primeiros protótipos de foguetes conhecidos. Inicialmente, começaram a utilizar flechas de fogo voadoras para defesa do território e também o desenvolvimento de foguetes artesanais, na criação dos primeiros fogos de artifício. Tais foguetes geravam grande fascínio e despertaram interesse em seu uso bélico. Entretanto, inconstância e imprecisão dificultavam sua aprovação devido à falta de confiabilidade. Com um propósito parecido, o foguete bélico foi criado nas guerras napoleônicas.

No final do século XIX, apareceram os primeiros cientistas que viram o foguete como um sistema para propulsionar veículos aeroespaciais tripulados, dando origem aos primeiros estudos de controle de queima e estabilidade. Entre eles destacam-se o russo Konstantin Tsiolkovsky, o alemão Hermann Oberth e o estadunidense Robert Hutchings Goddard, e, mais tarde os russos Sergei Korolev e Valentin Gruchensko e o alemão Wernher von Braun.

Inicialmente foram desenvolvidos foguetes especificamente destinados para uso militar, conhecidos como mísseis balísticos intercontinentais. O desenrolar da Guerra Fria acelerou o desenvolvimento de programas espaciais avançados, apresentando uma evolução surpreendente no decorrer de 46 anos. Os programas espaciais que os Estados Unidos e a Rússia colocaram em marcha basearam-se em foguetes projetados com finalidades próprias para a astronáutica.

Outros países que construíram foguetes, num programa espacial próprio são: França, Reino Unido (que o abandonou), China, Japão, Índia e Brasil, assim como o consórcio europeu que constituiu a Agência Espacial Europeia (ESA) que construiu e lançou o foguete Ariane.

O lançamento de foguetes não se restringe atualmente à dicotomia EUA/ Rússia, abrindo portas para o aperfeiçoamento de seus componentes e melhorando a eficiência em níveis significantes de tecnologia, materiais e combustíveis.

Preocupações sobre os oxidantes dos foguetes híbridos surgiram nos EUA ao decorrer da última década, em que estudos realizados nos lençóis freáticos apresentam proporções de perclorato acima de 1ppm (partes por milhão), apresentando riscos à saúde humana, em especial para crianças em desenvolvimento.

Dentre as considerações com combustíveis, destaca-se a necessidade de fontes renováveis, com foco especial em redução de custos e de impactos ambientais. A parafina combustível é um derivado do petróleo (óleo), o que a torna gradativamente mais custosa e, futuramente, escassa. Sua queima

tende a produzir fuligem, assim como produtos de combustão nocivos, tais como benzeno, tolueno, e formaldeído.

Ainda que outras linhas de pesquisa apresentem alternativas interessantes como cera de abelha e banha de porco (Lyne *et al.* 2005), este trabalho é o primeiro a utilizar o sebo de boi como propelente alternativo.

## 1.1 MOTOR DE FOGUETES A PROPELENTES HÍBRIDOS

Os Motores de Foguete a Propelente Híbrido (MFPH) começaram a ser estudados em 1930 na Rússia. O primeiro lançamento com sucesso ocorreu em 17 de agosto de 1933 pelos soviéticos. Entretanto, tais motores foram descartados em favor dos propelentes líquidos ou sólidos e, apesar de os estudos iniciais datarem da década de 30, os MFPH's só receberam a devida importância nos anos sessenta.

A partir da década de 60 os Estados Unidos continuaram a pesquisar e aprimorar o sistema híbrido de propulsão devido, inicialmente, ao seu caráter não explosivo, o que facilitaria a segurança na manufatura e na operação deste tipo de foguete. Posteriormente muitas outras vantagens foram descobertas como: menor complexidade em sua operação, custos mais baixos, combustíveis menos poluentes, menor risco de explosão e maior facilidade de manuseio.

Bertoldi (2007) mostra vantagens e desvantagens dos MFPH quando comparados com os demais sistemas propulsivos químicos. Os foguetes a propelentes líquidos têm a vantagem de proporcionar o melhor desempenho, porém são mais complexos e possuem um alto custo de desenvolvimento. Já os foguetes a propelentes sólidos são facilmente operados, mas normalmente possuem produtos tóxicos da queima além de ter desempenho baixo.

A promessa do MFPH consiste em combinar alto desempenho com sistemas mais seguros e de menor complexidade. Os motores de foguetes a propelentes híbridos (MFPH) funcionam com combustível e oxidante em estados físicos diferentes. Normalmente o combustível se encontra no estado sólido, sendo alojado na câmara de combustão, e o oxidante na forma líquida ou gasosa, este é injetado na câmara como nos foguetes de propelentes líquidos.

A taxa de regressão do combustível é limitada pela difusão da chama. Essencialmente, o processo de combustão é realizado pela razão da mistura e reação da pirólise do combustível pelo oxidante.

Os Foguetes a Propelente Híbrido (FPH) inicialmente seriam desenvolvidos objetivando seu uso em foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites, micro satélites e sua utilização como propulsão de mísseis táticos. Atualmente mais aplicações foram designadas a esse tipo de motor, sendo sua tecnologia aplicada para a substituição de *boosters* sólidos e em veículos civis suborbitais tripulados. O impulso específico que o FPH pode gerar é um pouco inferior a um motor a propelentes líquidos, mas é compatível às duas aplicações citadas.

Segundo José Bezerra Pessoa Silva, chefe da Divisão de Sistemas Espaciais do Instituto de Aeronáutica e Espaço em uma entrevista para o site Inovação Tecnológica ([www.inovacaotecnologica.com.br](http://www.inovacaotecnologica.com.br) , 2006):“ os foguetes com essa tecnologia são muito mais baratos permitem mais lançamentos como, por exemplo, para testes de dispositivos de segurança, sistemas de rastreamento de bases e a recuperação de foguetes em alto mar”.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Como vantagens do MFPH, destacam-se seu baixo custo e sua segurança operacional. O enfoque atual das pesquisas acerca dos FPHs gira em torno das desvantagens relacionadas ao propelente: baixa taxa de regressão e os produtos tóxicos liberados pela queima.

O interesse nos MFPH ressurgiu recentemente. A maior parte dos foguetes híbridos utiliza como combustível polímeros à base de carbono, destacando-se o polimetil-metacrilato (PMM), polietileno (PE) e o polibutadieno (PB). George *et al.* (2001) investigaram o incremento da taxa de regressão do HTPB (polibutadienohidroxilado) com a dopagem do combustível com perclorato de amônia e alumínio.

Karabeyoglu *et al.* (2004) identificaram uma classe de parafina que possui taxa de queima de três a quatro vezes superior a de combustíveis híbridos tradicionais, como o HTPB. Tal classe seria obtida através do uso de um material que altera as propriedades físico-químicas da mistura, formando uma camada hidrodinamicamente instável na superfície de queima do combustível.

Combustíveis alternativos começaram a ser estudados, incluindo alguns biológicos derivados de hidrocarbonetos, em particular óleos de animais e plantas. Candidatos como cera de abelha e gordura de porco começaram a ser estudados, pois o nível energético dessas substâncias é comparado ao dos combustíveis à base de hidrocarbonetos normalmente utilizados, além de serem menos poluentes. (Lyne *et al.* 2005).

Estudos recentes realizados pela Universidade de Brasília apresentam uma parafina alternativa composta por hidrocarbonetos, cera de abelha e óleo vegetal que ainda será testada para análise da taxa de regressão.

E, finalmente, esta pesquisa apresenta os primeiros estudos feitos com a mistura parafina-sebo de boi. A diminuição da quantidade de parafina reflete-se diretamente nos produtos liberados pela queima, diminuindo sua toxicidade. O interesse no sebo de boi seria, então, justificado, caso a taxa de regressão seja comprovadamente eficiente.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

Pensar em um mundo sustentável é fundamental para toda a sociedade. Com essa idéia, para os países continuarem o seu desenvolvimento tecnológico precisaram buscar caminhos alternativos para desenvolver sem causar grandes danos ao meio ambiente e sem esgotar suas fontes não-renováveis.

Os protótipos de foguetes híbridos são mais seguros e com vantagens de operação em relação aos foguetes a propelentes sólidos e dos foguetes a propelentes líquidos. Vantagens como baixo custo e segurança operacional acabaram chamando sua atenção para uso militar e civil.

Por todas as vantagens os MFPHs vêm sendo muito estudados para poder aprimorar ainda mais suas qualidades e também minimizar as desvantagens. Entre estas podemos citar: a razão de mistura varia com o decorrer da queima, variando então os parâmetros de desempenho do foguete, que nem sempre é desejável ou permissível, a eficiência de combustão é levemente mais baixa do que em motores líquidos ou sólidos, e o mais significativo, a baixa taxa de regressão acarreta um limite de impulso específico para uma dada configuração do grão.

Associando-se as vantagens dos MFPHs com o desenvolvimento de combustíveis mais eficientes, busca-se renovar o mercado de propulsão aeroespacial, criando novas tecnologias com aplicações diversas. Assim, o estudo de combustíveis alternativos e suas propriedades gera benefícios que não podem ainda ser quantificados, mas que afetam a sociedade em níveis inesperados.

### 1.4 OBJETIVOS

Vários ensaios serão realizados buscando aperfeiçoar os motores híbridos, lembrando que a taxa de regressão é um dos maiores entraves para essa nova tecnologia. Outros fatores importantes é conseguir um combustível de baixo custo, menos poluente, mais estável e conseqüentemente mais seguro.

Com esse aperfeiçoamento, os foguetes com motores híbridos serão cada vez mais utilizados, elevando muito o número de lançamentos por ano de cada país, proporcionando assim maior tecnologia e desenvolvimento em diversas áreas.

#### OBJETIVO GERAL:

O objetivo principal deste estudo é desenvolver uma nova matriz combustível para Motores de Foguete a Propelente Híbrido a base de parafina comum dopada com gordura animal.

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Fixar uma proporção adequada entre Sebo de Boi e parafina de petróleo para produção de uma matriz combustível.

- Determinação da taxa de regressão do par – propelente parafina/sebo e oxigênio gasoso (GOx).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os motores de foguetes híbridos começaram a ser estudados pelos soviéticos na década de trinta, mas não se passaram sem que atraíssem grande atenção, até a década de sessenta quando voltaram a ser estudados pelos americanos. Depois disso, muitas pesquisas começaram a ser feitas tentando aperfeiçoar esses motores.

Humble *et al.* (1995) defendeu o sistema dos MFPH pois o combustível poderia ser fabricado em qualquer local comercial convencional sem que houvesse perigo de explosão independentemente de sua complexidade. Tais características poderiam reduzir de maneira significativa os custos de fabricação e operação de lançamento.

Além da segurança outro fator importante destacado por Humble *et al.* (1995) é a redução de complexidade do sistema híbrido pois ele dispensa o uso de dois tanques de armazenamento do par propelente, pois apenas o oxidante está na fase líquida. O combustível sólido não necessita de armazenamento separado, pois se encontra já disposto dentro da câmara de combustão. Essa disposição do combustível sólido poupa espaço e torna o sistema de armazenamento do par propelente bem reduzido.

Outra vantagem que acentua a segurança do motor a propelente híbrido, em relação ao motor de propelentes líquidos e sólidos é o risco de explosão reduzido. Isso ocorre pelo fato do oxidante e combustível estarem separados e possuírem apenas contato superficial durante sua reação e uma mistura difusa entre oxidante e combustível não ocorre, fato que evita um efeito em cadeia que poderia ocasionar um descontrole da combustão, Sutton (1992).

Os foguetes a propelentes híbridos possuem impulso específico ( $I_{sp}$ ) maior que os foguetes a propelentes sólidos e são mais facilmente controlados, podendo iniciar e parar a queima conforme necessário, o que possibilita correções de trajetória dentre outras variações de parâmetro durante sua operação.

Humble *et al.* (1995) explicaram o processo de combustão que ocorre nos motores híbridos tradicionais, com combustível HTPB. A superfície do combustível vaporiza e se mistura com o vapor do oxidante na camada limite. Quando a equação chega à razão estequiométrica, a combustão ocorre devido à difusão da chama na camada limite. É importante apontar que caso apareça uma rachadura no combustível não há um aumento da superfície de contato, pois o oxidante dentro dessa fenda é inferior ao necessário para que ocorra a combustão. Os gases resultantes da queima saem por um bocal. A figura 1 ilustra o processo de balística interna dos MFPH clássicos.

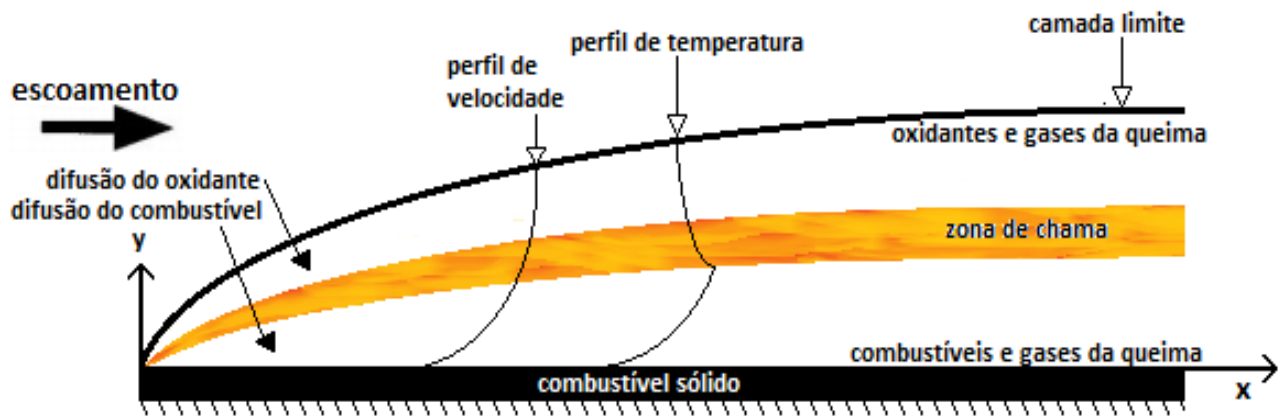


Figura 1 - Sistema de combustão de um MFPH

Nos foguetes híbridos o desempenho e segurança não são afetados por pequenas falhas ou rachaduras no grão propelente, pois em motores híbridos a pressão de câmara é proporcional à taxa de vazão mássica de oxidante e não à área superficial do grão exposta à chama. No caso de parafina como combustível sólido as pequenas rachaduras que podem surgir não são de grande preocupação, devido ao processo natural em que a parafina ao derreter-se preenche suas rachaduras, evitando que grandes fragmentos soltem-se e ocasionam o entupimento da tubeira.

Karabeyoglu et al. (2004) propôs um modelo de queima para a parafina. Nessa queima somam-se os efeitos da chama de difusão, da formação das gotas e das frentes de onda no filme líquido da superfície do combustível. A taxa de regressão da parafina é superior, de três a quatro vezes em comparação com combustíveis híbridos tradicionais. A figura a seguir ilustra o esquema proposto na Universidade de Stanford.

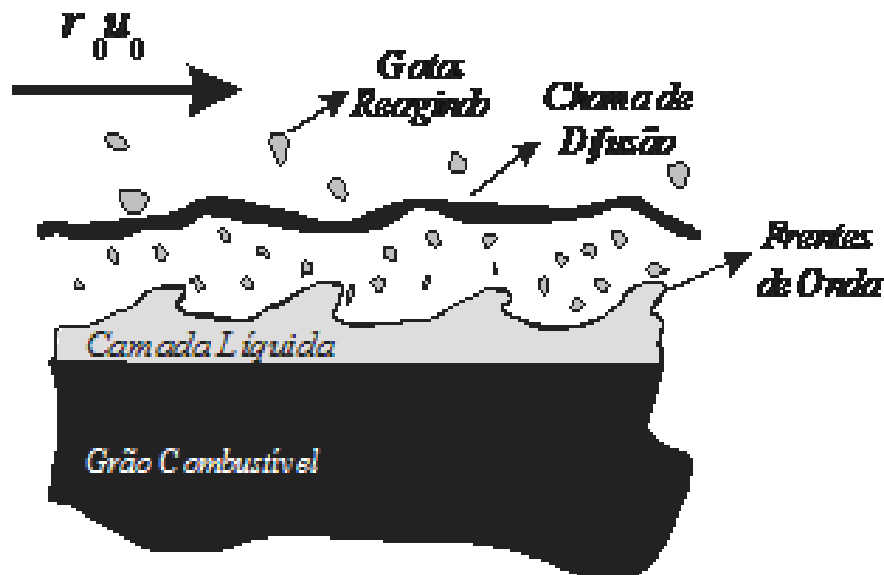


Figura 2 - Modelo de queima de parafina



## 2.1 PROPELENTES

Nos foguetes híbridos normalmente utiliza-se oxidantes líquidos e combustíveis sólidos. Segundo Sutton (1992) estes são, de modo geral, polímeros de hidrocarbonetos com terminações de hidroxilas e carboxilas como o polietileno (PE), polimetilmetacrilato (PMMA) e o polibutadieno (PB).

A propulsão híbrida tem como principal desvantagem a baixa taxa de regressão por seu processo de combustão assemelhar-se a uma chama de difusão turbulenta, com a zona de chama estabelecida dentro da camada limite. Karabeyoglu *et al.* (2004) concluíram que os processos seriam mais eficazes se o motor tiver várias portas de combustão ao invés de apenas uma para alcançar os níveis de empuxo exigidos.

Os foguetes híbridos normalmente possuem como combustíveis polímeros a base de carbono na forma de plásticos ou borrachas. Estes, ao entrar em combustão sofrem sublimação, ou seja, passam diretamente do estado sólido para o gasoso. Já os combustíveis na forma plástica como a parafina que será utilizada nesse projeto passam pela fase líquida.

Karabeyoglu *et al.* (2004) publica estudos a respeito de uma nova classe de combustíveis à base de parafina. Estes novos combustíveis apresentaram resultados de três a quatro vezes maiores que a dos combustíveis híbridos que até então eram utilizados. A grande vantagem envolve o derretimento de uma fina camada da parafina, esta camada é um líquido hidrodinamicamente instável que fica na superfície do combustível.

Para demonstrar a viabilidade e a compatibilidade em escalas maiores do combustível à base de parafina, testes foram realizados pela NASA Ames Research Center utilizando o *Hybrid Combustion Facility* (figura 3). Este centro tornou-se operacional em setembro de 2001 e desde então realizou uma série de testes que confirmou a alta taxa de regressão do novo combustível, que foi testado na Universidade de Stanford em escalas menores de pressão e fluxos mássicos representativos em aplicações comerciais.

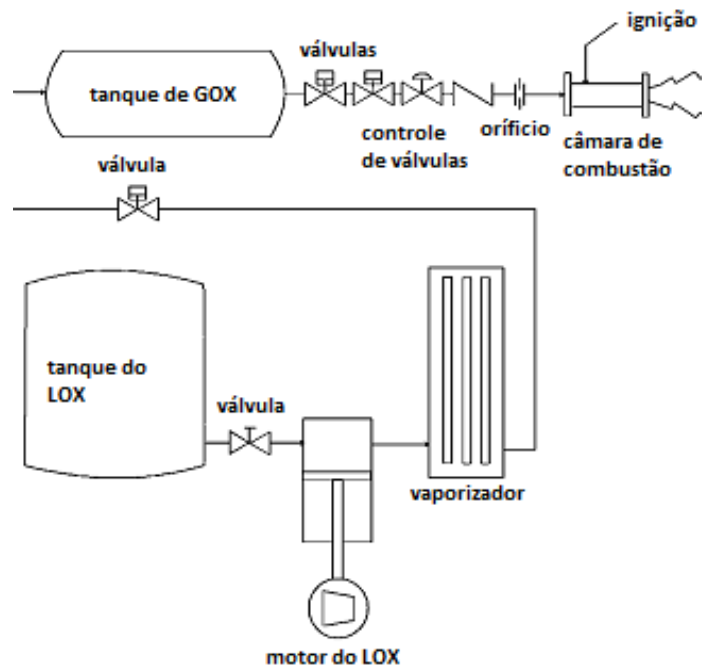


Figura 3- Esquema do NASA Ames HybridCombustionFacility, com modificações

Santos *et al.* (2004), realizaram testes de foguetes híbridos produzidos na Universidade de Brasília utilizando a parafina como combustível e óxido nitroso como oxidante e obtiveram empuxos na ordem de 200 N. Os resultados foram muito satisfatórios o que possibilitou no ano seguinte o lançamento do que se acredita ter sido os primeiros foguetes híbridos da América latina. Isso abriu caminho para essa tecnologia no Brasil.

Para melhorar a estabilidade (prevenindo a espalção, processo no qual fragmentos são ejetados do corpo por pressão ou impacto) e a taxa de regressão da parafina, Lyne *et al.* (2005) começaram a utilizar banha de porco devido seu baixo custo e abundância. As primeiras análises termodinâmicas da combustão da banha com oxigênio e óxido nitroso resultou em um potencial alto de temperaturas de combustão e valores aceitáveis de impulso específico. Resultados parecidos foram obtidos também com cera de abelha.

Neste trabalho será utilizada a parafina misturada com óleo de gordura bovina, por seus custos reduzidos e facilidade de obtenção.

Os oxidantes mais comumente utilizados são: o oxigênio ( $O_2$ ) líquido ou gasoso, peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), tetróxido de nitrogênio ( $N_2O_4$ ), o óxido nitroso ( $N_2O$ ) e o flúor (Bertoldi, 2007). Neste projeto será utilizado o gás oxigênio (GOx), devido a sua fácil manipulação e ao seu baixo custo, fatores decisivos nesse projeto.

## 2.2 TAXA DE REGRESSÃO

Como foi abordada anteriormente a combustão dos motores de foguetes híbridos ocorre com uma chama de difusão macroscópica, e a razão oxidante-combustível varia ao longo do comprimento da porta de combustão enquanto os foguetes sólidos e os líquidos contêm uma mistura, *a priori*, uniforme de oxidante e combustível na câmara de combustão.

Existem vários métodos experimentais que tentam aumentar a taxa de regressão do sistema híbrido, principal desvantagem desse motor que limita sua utilização.

Segundo Humble *et al.* (1995) e Sutton (1992), a forma mais geral da taxa de regressão do combustível sólido pode ser expressa por:

$$\bar{r} = a\bar{G}_{ox}^n \quad (1)$$

### 2.2.1 Dopagem do Grão

A percepção de Estey *et al.* (1991) que a radiação térmica poderia contribuir muito significativamente para o aumento da taxa de regressão devido a transferência de calor, incentivou Chiaverini *et al.* (2000) a estudar a dopagem do grão com elementos metálicos. Utilizando o gás oxigênio como oxidante e um motor com dimensões em escala de laboratório, criou um sistema de radiografia para obter, em tempo real, dados da taxa de regressão instantânea do combustível em qualquer posição axial.

Estes estudos incentivaram Evans *et al.* (2005) a realizar experimentos com a dopagem de materiais energéticos, como nano partículas de Alumínio e Boro que adicionados aos combustíveis sólidos aumenta a taxa de regressão devido ao aumento de energia liberada pela superfície do combustível sólido. Dependendo do fluxo de massa de oxidante a adição de 13 % de nano partículas de Alumínio ao motor híbrido pode aumentar a taxa de regressão em aproximadamente 60 %. A taxa de regressão variou de acordo com a posição radial, sendo menor nas áreas mais próximas ao fim da cabeça do motor, Evans *et al.* (2005).

Kuo *et al.* (2002) continuaram a buscar algumas otimizações do processo de dopagem do grão. Realizaram então experimentos com o objetivo de determinar uma combinação entre o HTPB e certos componentes metálicos em dimensões de caráter nanotecnológico (alumínio, boro, boro-carboneto, flocos de alumínio cobertos e descobertos). Com a utilização desses materiais de dopagem, percebeu-se que o aumento da taxa de queima era de aproximadamente 42% em relação ao HTPB puro, devido à maior liberação de energia gerada pela oxidação das partículas aditivas. Outra descoberta foi a de que os metais mais efetivos na dopagem de um grão são o alumínio e o boro.

A dopagem de grãos utilizando metais apresentou vários aspectos positivos, mas ao pensar em combustíveis alternativos um fator muito importante é a nocividade deste combustível ao meio

ambiente. Após sua queima esses metais são muito poluentes, tornando assim esse método de se aumentar a taxa de regressão não muito atraente.

## 2.2.2 Efeito “Swirl”

Motivado pela baixa taxa de regressão do combustível e pela variação da razão de mistura, Tamura *et al.* (1999), estudou o efeito “*swirl*” do escoamento do oxidante na combustão. Foi utilizado o gás oxigênio como oxidante e um grão de polimetil metacrilato (PMMA) como combustível. O objetivo era injetar o oxidante de modo rotacional na câmara de combustão criando um núcleo de vortex, isso resultaria em um fluido com rotacionalidade estável. Para melhor compreensão do efeito mencionado segue figura 4:

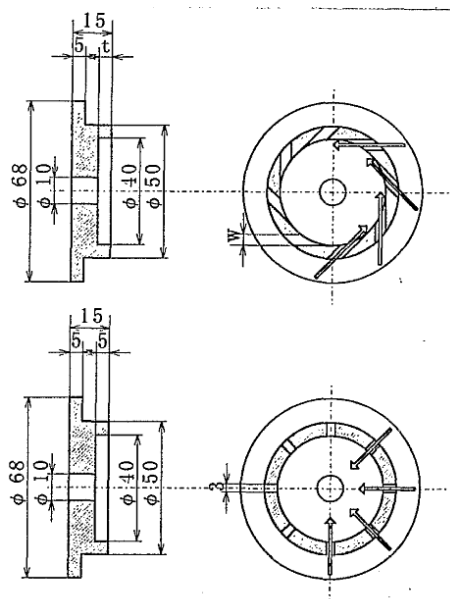


Figura 4 - Desenho esquemático da injeção com efeito “*swirl*” de Tamura *et al.* (1999)

As conclusões obtidas com esse experimento foram:

- Aplicando o “*swirl*” ao oxigênio a taxa de regressão do combustível aumentou mais de um terço do que sem o efeito.
- A regressão global do combustível é 60 % devido a vazão mássica do oxigênio, independentemente da intensidade do efeito “*swirl*”.
- Com este efeito o tamanho ideal do grão é menor.

A primeira conclusão é excelente para os estudos que envolvem motores a combustão híbrida por atacar o ponto chave. E a última conclusão permite diminuir o tamanho do motor do foguete, outro aspecto muito importante.

Com base nesse efeito citado acima, Lacava *et al.* (2004) realizaram testes com um injetor “*pressure swirl*” que funciona para turbinas e foguetes híbridos. Este sistema é caracterizado por formar gotículas menores que são mais efetivas no processo de queima. Este estudo foi eficiente para não deixar o nível da taxa de regressão cair durante a combustão quando forem utilizados grãos de diâmetros maiores. A figura 5 mostra o efeito do “*swirl*” em um processo de queima.



Figura 5 - Efeito "swirl"(International Plasma Technology Center)

Outro estudo feito ainda em relação à rotacionalidade do escoamento do oxidante foi feito por Chang *et al.* (2005). A equipe pesquisou outras maneiras de gerar o efeito sem a utilização do injetor citado anteriormente. As duas principais técnicas foram a de dopagem do combustível com redes metálicas e a de promover ranhuras no combustível de modo a gerar a rotacionalidade na superfície do grão.

O primeiro método não obteve resultados muito expressivos, e o segundo não se torna muito interessante quando se utiliza parafina como combustível, pois no momento da queima as ranhuras existentes se deformam deixando a superfície do grão nivelada o que impossibilitaria o efeito de rotacionalidade desejado.

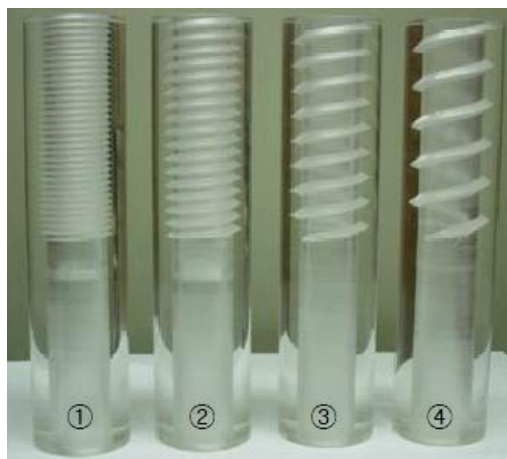


Figura 6 - Configuração do grão proposto por Chang *et al.* (2005)

# 3 BANCADA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

## 3.1 BANCADA DE ENSAIOS

No Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) da Universidade de Brasília foi desenvolvida uma bancada de testes que permite ensaios de câmaras de combustão de tamanhos diferentes e ainda permite a medição de pressões e temperaturas utilizando um sistema de aquisição de dados. Ao longo dos anos esta bancada sofreu modificações e adaptações de projeto para melhor atender às pesquisas e também melhorar seu funcionamento, desempenho, ergonomia e praticidade por alunos da Universidade de Brasília sob supervisão dos professores Carlos Alberto Gurgel Veras e Artur Elias de Moraes Bertoldi.

Atualmente, a bancada experimental possui uma estrutura externa metálica que serve como suporte do motor, local onde se encaixa o grão de combustível. Com hastes móveis nas laterais é possível testar tamanhos diferentes de grãos, além de possuir espaço para utilização de calibradores e sensores como termopares e transdutores de pressão. Essa estrutura é parafusada em um carrinho para facilitar o transporte.

O envelope do motor é feito de nylon® e serve como parede lateral para a câmara de combustão. Seu processo de fabricação é explicado no tópico 3.2. Esse material funciona como um fusível mecânico, de maneira a não permitir altas pressões dentro da câmara, afetando a segurança do projeto. Sua eventual desvantagem seria se a parafina fosse toda consumida no momento da queima e como esse material é pouco resistente ao fogo, isso acarretaria no seu derretimento. Para contornar esse possível problema, o tempo de queima é controlado de maneira que apenas parte do grão seja consumida, sendo a quantidade restante suficiente para proteger o material. O combustível é armazenado dentro dessa câmara já no seu processo de fabricação como explicado no tópico "3.2.2 Processo de Fabricação do Grão de Combustível".

Para prender-se o grão é colocado em cada extremidade um flange de aço inoxidável com quinze furos dispostos diametralmente e por estes passam parafusos de 16 mm de diâmetro para garantir uma boa fixação do grão. A quantidade e o tamanho desses parafusos, assim como a espessura do próprio flange, são superdimensionados para suportar altas pressões e prevenir vazamentos evitando possíveis acidentes. Depois de fixados os flanges, coloca-se o grão nas hastes móveis da estrutura externa da bancada. Os cilindros de gases ficam separados da bancada experimental. São utilizados três cilindros, um de gás liquefeito de petróleo (GLP), um de gás oxigênio (GOX) e outro de ar comprimido.

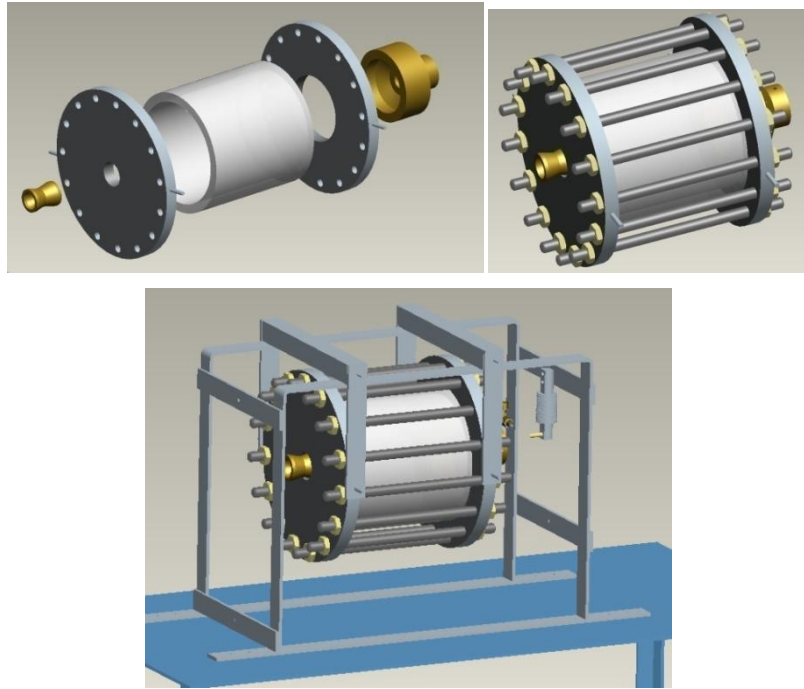


Figura 7 - Montagem esquemática do grão e dos flanges

O cilindro de GLP é da marca Supergasbras, pesa 45 kg e consiste em uma mistura de 70 % de butano e 30 % de propano. Ele é conectado à bancada por meio de um tubo revestido de fibra metálica, que além de resistente, impede possíveis danos devido a dobras. Este é seguido por uma válvula pneumática uniflow, para impedir retorno do gás mantendo a segurança, e por válvulas reguladoras de pressão. Após estas, o gás prossegue em tubos de cobre de três milímetros de diâmetro interno no sistema de injeção.

O cilindro de gás oxigênio é da White Martins e possui 10 m<sup>3</sup> a uma pressão de 200 kgf/cm<sup>3</sup>. Como no caso do GLP, é utilizado o tubo de fibra metálica por questões de segurança. Logo na saída do cilindro o gás passa por um manômetro seguido por uma válvula pneumática utilizada para sua ativação. Ao chegar à bancada, o gás oxigênio passa por *nipples* e uma placa de orifício de 3,99 mm de diâmetro com o objetivo de reduzir a pressão do gás até ser obtido o valor desejado na câmara de combustão. Dos dois lados da placa de orifício há medidores de pressão e de temperatura para cálculo da vazão mássica. Após a placa de orifício o tubo do gás oxigênio é conectado através de uma conexão em “T”, que divide o fluxo igualmente para dois tubos de cobre de dez milímetros de diâmetro interno de modo que entre pelo sistema de injeção um por cada lado. A figura A.1 mostra onde se localiza a placa de orifício.

O terceiro cilindro é o de ar comprimido, da marca White Martins e produzido sinteticamente com 21 % de oxigênio e 79 % de nitrogênio. Na saída do cilindro existe uma válvula reguladora de pressão e dois manômetros, um de cada lado, para leitura da pressão. Neste, ao invés do tubo utilizado nos dois cilindros a cima, utiliza-se apenas um tubo flexível de poliuretano de oito milímetros. Ao chegar a bancada passa por uma válvula acionada eletricamente e atravessa tubos de cobre de três milímetros no sistema de injeção.

Todos os gases citados entram pelo sistema de injeção de gases fixado no flange que precede o grão. Este flange possui um furo central que serve para permitir a passagem dos gases para a câmara de combustão. Além de servir como porta de entrada, esta câmara por onde os gases são injetados possui uma entrada de água que pode ser acionada por uma válvula pneumática. Este esguicho de água é utilizado ao finalizar o tiro para interrupção imediata da chama de combustão por motivos de segurança e de preservação do grão. Para verificação e análise da pressão dentro da câmara de combustão é utilizado um transdutor de pressão na entrada dos gases, como descrito no item 3.4, sistema de aquisição.

Tanto o ar comprimido quanto o GLP utilizam o sistema de injeção, através de tubos de cobre, misturando logo na entrada e colidindo frontalmente com a centelha. Esta é conectada por meio de uma bateria de 12 volts e 45 ampéres. Quando acionada, juntamente com uma abertura controlada das válvulas dos dois gases a uma razão estequiométrica adequada, inicia a ignição. Na figura A.2 pode-se observar o sistema de injeção dos gases, a vela e o transdutor de pressão utilizado para conferir a pressão na câmara de combustão e duas entradas de água também.

A queima na câmara de combustão libera produtos de baixa velocidade e a uma elevada temperatura, isso não seria suficiente para dar o empuxo necessário ao foguete. Para acelerar esses produtos a uma velocidade sônica é utilizada uma tubeira com um bocal convergente-divergente de vinte milímetros de diâmetro de garganta.

O bocal convergente serve para diminuir a pressão e direcionar o fluxo da queima aumentando a velocidade do escoamento e, com isso, o empuxo. Os gases produzidos pela combustão passam então pela garganta, esta deve ter um diâmetro necessário para criar a condição de entupimento. Com esta condição a velocidade atinge um regime supersônico que é direcionado para a parte divergente do bocal.

A pressurização do escoamento gerado pela queima depende da área da secção convergente do bocal. Caso não seja bem dimensionada, ao invés de comprimir o gás, pode proporcionar uma perda de empuxo. A tubeira encontra-se alojada no interior de uma câmara feita de celeron (A.4) presa ao flange posterior ao grão de combustível. Com a finalidade de evitar vazamentos deve-se utilizar um o-ring e duas camadas de papel velomoid (utilizado em juntas de motor) entre o celeron e o flange para melhor vedação.

Essa tubeira inicialmente foi manufaturada em cobre, mas devido às altas temperaturas atingidas durante o tiro, esse material não resistiu (figura A.10). O engenheiro mecânico Fábio Silva de Oliveira, integrante do grupo de propulsão da UNB, resolveu esse problema. Sua dissertação de mestrado envolve o estudo de materiais para aplicação em bocais supersônicos de motores de foguetes a propelentes híbridos, e como apoio da Dnipropetrovsk National University (universidade ucraniana) foram desenvolvidas diversas tubeiras de materiais diferentes. Os testes começaram a ser realizados



com grafite, fibra de carbono, carbono-carbono, além de suas repetições utilizando revestimentos com silício, entre outros.

As válvulas pneumáticas são supridas por um conjunto envolvendo um compressor elétrico e um cilindro de armazenamento do ar comprimido. A ligação até as válvulas é feita por tubos de poliuretano de oito milímetros. Por motivo de segurança, todas as válvulas (gás oxigênio, ar comprimido, GLP e esguicho de água) são acionadas a distância por meio de um quadro elétrico e, na montagem, foram adicionadas válvulas *uniflow*. No quadro há ainda lâmpadas para confirmar o acionamento das válvulas, um botão para energizar o quadro e um botão de emergência que fecha todas as válvulas instantaneamente caso ocorra qualquer imprevisto.

A figura A.4 mostra o quadro elétrico. Para controle dos parâmetros antes, durante e após o tiro, utiliza-se um sistema de aquisição (figura A.5) e equipamentos medidores calibrados como transdutores de pressão, termopares e uma célula de carga. Foi desenvolvido um sistema de calibração para a célula de carga. Os termopares e os transdutores de pressão foram calibrados em laboratórios especializados da universidade por ser mais difícil montar um equipamento de calibração.

A composição do sistema de aquisição é descrita no Anexo IV.

## **3.2 GRÃO**

### **3.2.1 Parafina Dopada**

O interesse desse projeto é analisar a mistura de parafina normal (fóssil) e óleo extraído da gordura bovina. O sebo bovino é considerado um dejetos e seu aproveitamento significa não somente uma economia de gastos, pois o óleo de gordura bovina é mais econômico, mas também a utilização de um produto que, em condições normais, seria desprezado.

O processo de obtenção do óleo de gordura bovina é explicado no item “3.3 Retirada do óleo do sebo bovino”. Após a retirada do óleo limpo, foram definidas amostras com diferentes proporções de parafina comum e óleo, obtendo-se as seguintes misturas:

Tabela 1 - Proporções de parafina comum e óleo de sebo bovino

Proporção Em Massa De Parafina Comum	Proporção Em Massa De Óleo De Gordura Bovina
90%	10%
85%	15%
80%	20%
75%	25%
70%	30%
65%	35%
60%	40%
55%	45%
50%	50%
40%	60%

As amostras ilustradas na figura A.12 foram feitas para definir-se a melhor conformação necessária para utilização nos testes. Não foi possível a realização de testes de dureza nas amostras, pois os equipamentos disponíveis não são ideais para a medição de durezas em materiais que não apresentem resistência à forças de contato. Também foram testadas amostras com proporções de uma parafina alternativa de origem vegetal, mas os componentes apresentaram grande diferença de densidade, causando decantamento nas amostras e tornando-as impróprias para ensaios.

A proporção exata foi definida como 80% de parafina normal e 20% de óleo de gordura bovina, pois proporções muito pequenas de óleo causariam alterações mínimas das propriedades do grão e proporções muito grandes prejudicariam a consistência da mistura. Sua massa específica calculada foi de  $\rho = 0,871 \text{ g/m}^3$ .

Essa nova mistura deveria apresentar uma taxa de regressão semelhante à da parafina comum, além de ser mais barata. Os resultados dos testes estão descritos no item “4 Resultados”.

### 3.2.2 Processo de Fabricação do Grão de Combustível

A medição da taxa de regressão do propelente exige uma série de ensaios que relacionam a massa do propelente e o tempo de queima. Além disso, é primordial desenvolver-se um parâmetro de comparação para interpretar os resultados no intuito de que eles forneçam uma conclusão efetiva sobre a eficiência de cada processo.

Tal parâmetro de comparação é obtido através do pareamento dos testes entre parafina fóssil e dos testes com a parafina dopada, sendo os testes com parafina fóssil, estabelecidos como padrão. Os testes devem ser realizados com a queima dos grãos, sendo necessária uma padronização dos mesmos a fim de normalizar os resultados.

Para a realização dos testes comparativos, foi necessária a criação de um processo de fabricação eficiente de grão, de maneira a estabelecer uma produção constante e de fácil manuseio. Desta maneira, estabeleceu-se um sistema de moldes para os grãos, sendo necessário somente o seu preenchimento com a parafina a ser testada. Os moldes criados possuem a conformação da figura 8.

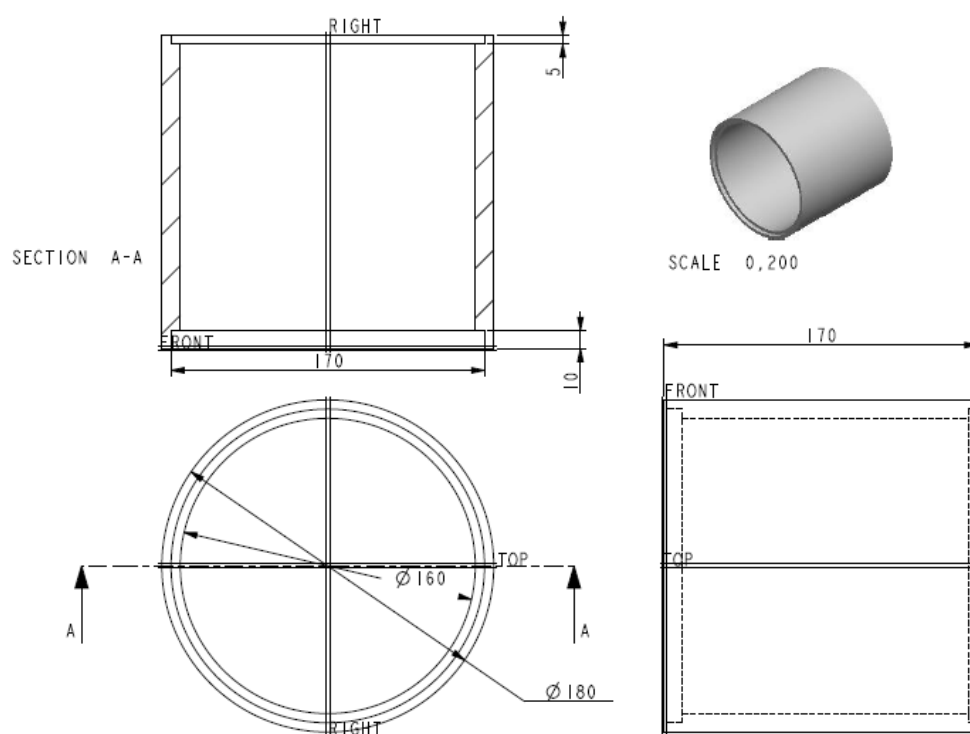


Figura 8- Molde dos grãos

O projeto atualmente conta com 4 moldes de tecnil nesta conformação, chamados de “cases”. Além de ser de fácil usinagem, o material tecnil foi selecionado por funcionar como um fusível mecânico, projetado para quebrar no caso de a pressão interna ser maior do que a esperada, evitando o acúmulo de gases, reduzindo o risco de acidentes por explosão.

Os moldes possuem duas tampas, superior e inferior, também feitas de tecnil que são usadas para vedação durante o processo de produção dos grãos. Estas tampas serão retiradas após o resfriamento completo da parafina.

Tendo estabelecido os moldes, o passo seguinte foi determinar o processo de conformação dos grãos. Equipes anteriores projetaram uma máquina composta por um rotor e um sistema de controle de velocidade. As rotações do motor são transmitidas a um eixo onde se acopla o molde do grão.

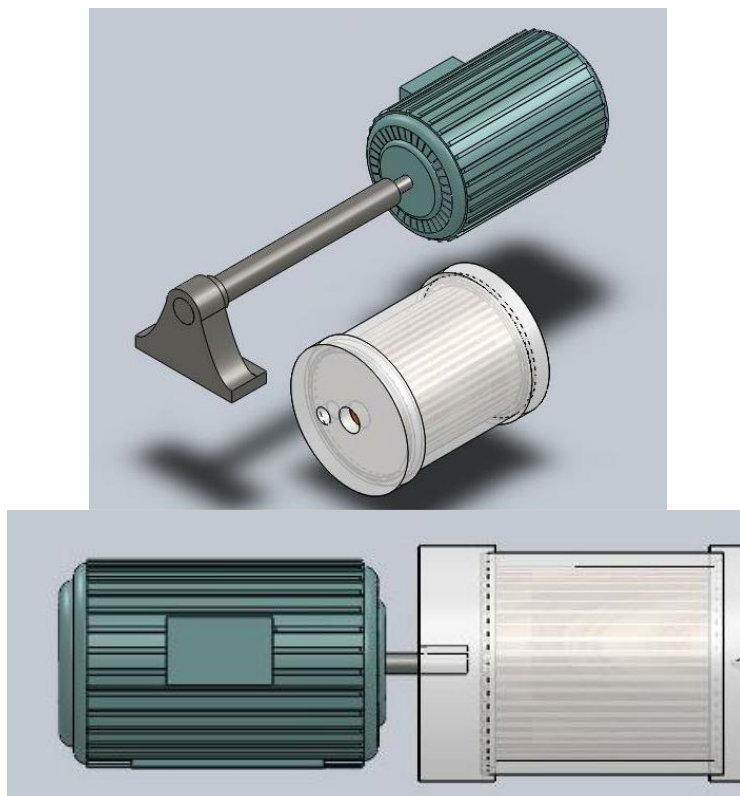


Figura 9 - Desenho do motor para esfriamento da parafina

Em seguida deve-se aquecer o propelente até este ficar no estado líquido. No caso de parafina dopada misturando a parafina com o óleo a ser utilizado no ensaio.

Após o derretimento ainda mistura-se corante com o objetivo dele de reduzir a absorção interna de calor pelo combustível devido à radiação. A mistura concentra a absorção do calor perto da superfície do combustível e inibe a transferência de calor por radiação para a parede do motor aumentando a taxa de regressão do combustível. Usualmente, a quantidade de negro de fumo adicionada é inferior a 1%, desta forma a adição tem efeitos mínimos nos parâmetros termoquímicos, como, por exemplo, a temperatura da chama, Bertoldi (2007). Neste projeto optou-se pela utilização de corante comercial, visto que o negro de fumo apresentava distribuição irregular.

Em seguida o propelente aquecido no estado líquido é inserido no molde lacrado através de um furo de alimentação localizado na tampa até completar seu volume. Após o preenchimento do molde a máquina é ligada, rotacionando o grão preenchido até o endurecimento completo da parafina. Para garantir esse endurecimento o grão é rotacionado por 8 horas. A parafina, após resfriada, contrai, abre-se a canaleta de alimentação localizada na tampa e adiciona-se mais da mistura líquida feita anteriormente. Novamente deixa-se resfriando.

Esse sistema do motor ligado ao grão permite um resfriamento mais rápido, ainda permite uma mistura mais homogênea do combustível. Após a fabricação fura-se o centro do grão com uma broca de comprimento pré-definido de forma a criar uma porta de combustão uniforme.

### 3.3 RETIRADA DO ÓLEO DO SEBO BOVINO

Para a fabricação da parafina alternativa, que consiste em misturar parafina fóssil comercial e sebo de boi, é necessária a retirada do óleo do sebo bovino. Esse óleo, há muitos anos, é utilizado para a fabricação de sabão caseiro em fazendas e casas do interior e seu processo de extração da gordura é relativamente bem simples.

Primeiramente deve-se separar o sebo de boi, parte que não é utilizada para consumo alimentar. Então, coloca-se a gordura em uma panela e aquece-se em fogo alto de um fogão normal (Figura A.11). A gordura começará a soltar um óleo, quando já tiver bastante óleo líquido na panela, desligue o fogo e, antes que endureça, despeje esse óleo em uma vasilha utilizando uma peneira para não deixar que pequenos pedaços de impurezas ou da própria gordura se misturem. O procedimento de filtragem não deve demorar muito, pois o óleo se solidifica a temperatura ambiente.

Esse óleo será colocado junto com a parafina líquida na proporção desejada e assim formará o combustível alternativo que será utilizado no projeto.

### 3.4 CÁLCULO DA TAXA DE REGRESSÃO

A taxa de regressão é a característica mais importante em um foguete híbrido. E como tal, para se projetar um sistema prático é necessária uma caracterização quantitativa em uma função de todas as variáveis relevantes no processo de operação desse motor.

A taxa de regressão inicialmente foi calculada com a fórmula:

$$\bar{r} = \frac{d_f - d_i}{2t_b} \quad (2)$$

Onde  $t_b$  é o tempo de queima definido desde a ignição até o instante de fechamento das válvulas, esse tempo pode ser medido através das curvas de pressão e empuxo.  $d_i$  é o diâmetro inicial da porta de combustão.

Já o diâmetro final da porta de combustão ( $d_f$ ) não pode ser medido facilmente. Após sofrer a combustão esse diâmetro varia dificultando a medição.

Para contornar esse problema é utilizada a variação da massa de combustível consumido com a fórmula:

$$d_f = \left( d_i^2 + \frac{4\Delta M_f}{\pi \rho_f L_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Onde  $\Delta M_f$  é a variação da massa antes e depois da queima,  $\rho_f$  é a massa específica do combustível e  $L_g$  é o comprimento do grão.

A variação da massa pode ser medida bem facilmente. Este método compensa bem a dificuldade na mensuração do diâmetro no final da porta de combustão visto que as novas variáveis podem ser medidas com precisão.

O fluxo de massa do oxidante é calculada pela equação 4:

$$\bar{G}_{ox} = \frac{16\bar{m}_{ox}}{\pi(d_i+d_f)^2} \quad (4)$$

Onde  $\bar{m}_{ox}$  é a vazão mássica média do oxidante.

Com o procedimento descrito acima se pode calcular a taxa de regressão média e o fluxo de massa médio de oxidante para um teste. Cada teste definira um par de coordenadas e após uma bateria de ensaios, definindo vários pontos, torna-se possível traçar uma curva da taxa de regressão média em função do fluxo de massa médio de oxidante. Com essa curva facilmente pode-se definir o valor das constantes “a” e “n” da equação 5. As incógnitas “a” e “n” são os coeficientes da taxa de regressão e dependem do par propelente.

$$\bar{r} = a\bar{G}_{ox}^n \quad (5)$$

Para o cálculo da vazão mássica média do oxidante, utilizou-se a equação 6:

$$\bar{m}_{ox} = \frac{p_f A_{or} C_d}{C_{ox}^*} \quad (6)$$

Onde  $p_f$  é a pressão antes da placa de orifício,  $A_{or}$  é a área do orifício,  $C_d$  é o coeficiente de descarga e  $C_{ox}^*$  é a velocidade característica do oxigênio.

Os dois último valores foram obtidos da literatura em casos semelhantes ao desse estudo. Os valores são respectivamente: 0,615 e 680 m/s.

## 4 RESULTADOS

Utilizando o óleo de gordura bovina e o gás oxigênio como par propelente, foram realizados 12 testes para validação dos resultados. Além desses, 4 testes foram feitos exclusivamente para a calibração da bancada. Os 12 ensaios foram divididos de acordo com a porta de combustão utilizada:

- Porta de 40 mm;
- Porta de 50 mm;
- Porta de 60 mm;
- Porta de 70 mm.

Para a validação desse projeto foi utilizado o *software* EES (*Engineering Equation Solver*) que é muito utilizado em vários ramos da engenharia no mundo inteiro.

A tabela que se segue (tabela 2) traz as características do grão combustível antes dos testes, assim como o tempo de queima, determinado através das curvas de pressão na câmara e empuxo. Dentre os testes desenvolvidos, em dez foram utilizados a nova matriz combustível, composta de 80 % parafina fóssil e 20% Sebo de Boi. Em dois ensaios (teste 02 e 12) foram utilizados 100 % de parafina fóssil. O objetivo dos testes com somente parafina fóssil visaram ser parâmetros de comparação.

Tabela 2 - Dados dos testes

Teste n <sup>o</sup>	Combustível	$m_i$ (kg)	$m_f$ (kg)	$L$ (mm)	$d_i$ (mm)	$t_q$ (s)
01	Parafina 80% Sebo 20%	6,56	5,975	201	50	11
02	Parafina 100%	6,355	5,866	201	50	7,9
03	Parafina 80% Sebo 20%	6,405	5,96	201	53	11
04	Parafina 80% Sebo 20%	6,7	6,085	201	40	11,2
05	Parafina 80% Sebo 20%	7,235	6,52	218	40	11,3
06	Parafina 80% Sebo 20%	7,1	6,525	216	40	10,8
07	Parafina 80% Sebo 20%	6,63	6,49	216	70	5,6
08	Parafina 80% Sebo 20%	6,485	6,1	203	50	8,1
09	Parafina 80% Sebo 20%	6,45	6,075	201	50	10
10	Parafina 80% Sebo 20%	6,815	6,49	217	60	7,8
11	Parafina 80% Sebo 20%	6,925	6,29	218	60	10,6
12	Parafina 100%	7,055	6,385	202	39	12,3

Os dados acima e as fórmulas citadas no tópico "3.4 CÁLCULO DA TAXA DE REGRESSÃO", permitem definir a vazão mássica do oxidante e a taxa de regressão. Com o sistema de aquisição pode-se ainda aferir os valores do empuxo e pressão na câmara de combustão durante os testes.

Tabela 3 - Dados obtidos em cada ensaio

Teste n <sup>o</sup>	$\bar{m}_{ox}$ (g/s)	$\overline{G_{ox}}$ (g/cm <sup>2</sup> s)	$\bar{r}$ ( $\frac{mm}{s}$ )	$P_c$ (bar)	Empuxo (N)	O/F
01	33,1	0,97	1,5	2,7	155,8	0,6
02	36,7	1,15	1,8	4,0	203,8	0,6
03	36,4	1,09	1,1	3,5	76,4	0,9
04	42,6	1,56	1,7	4,2	196,0	0,8
05	45,3	1,60	1,8	4,9	222,5	0,7
06	43,2	1,69	1,6	4,7	195,0	0,8
07	44,2	1,05	0,6	4,5	175,4	1,7
08	46,5	1,57	1,4	5,3	231,3	1,0
09	45,8	1,56	1,1	4,7	200,9	1,2
10	50,9	1,40	1,0	5,3	267,5	1,2
11	41,7	0,96	1,4	4,8	217,6	0,7
12	38,4	1,39	1,7	4,0	191,1	0,7

Durante os testes de queima não foram observadas nenhuma grande discrepância entre os resultados para a parafina convencional e a matriz aqui desenvolvida. Comparando o teste 12 (100% parafina) com os testes 04, 05 e 06 (80% parafina – 20% Sebo), que possuem portas de combustão semelhantes, são observadas taxas de regressão bastante próximas o que nos leva a concluir que, de forma geral, a adição do Sebo não trás perdas em termos de taxa de regressão.

Na tabela a seguir são trazidas algumas características de testes com motor em uma escala muito próxima as utilizadas nesse trabalho. Os níveis de pressão na câmara mais elevados são explicado pelo fato da garganta da tubeira se menor que a utilizada no presente estudo (20 mm contra 12,7 mm) para níveis de vazão mássicas muito próximos. Os dados apresentados nessa tabela e nos encontrados nessa pesquisa nos leva a propor experimentos futuros com níveis de fluxo mássico mais elevados, o que pode levar a obter taxas de regressão para o par parafina-sebo de boi maiores que 2 mm/s.

Ainda comparando os resultados da tabela 3 e da tabela 4 foram obtidos valores da taxa de regressão para matriz combustível aqui desenvolvida maiores que o tradicional par – propelente HTPB/GOx.



Tabela 4 - Karabeyoglu, 1998, com adaptações

Combustível	$\bar{m}_{ox}$ (g/s)	$\bar{G}_{ox}$ (g/cm <sup>2</sup> s)	$\bar{r}$ ( $\frac{mm}{s}$ )	$P_c$ (bar)	Empuxo (N)	O/F
Wax/GOx	21,4	4,2	1,2	3,79	48,1	1,3
Wax/GOx	38,5	7,6	2,8	6,4	87	1,06
Wax/GOx	80,7	7,0	2,5	13,8	207	1,63
HTPB/GOx	45,36	5,27	0,4826	3,45	107	2,0
HTPB/GOx	28,58	11,53	0,762	5,17	63	2,4
HTPB/GOx	54,432	10,62	0,762	4,14	134	2,0

Para os testes apresentados na tabela 4 o diâmetro da garganta da tubeira é 12,7 mm e o orifício para medição de vazão é de 3,99 mm de diâmetro. Para esse orifício sônico o coeficiente de descarga adotado é de 0,615. Como o presente trabalho utiliza um orifício sônico de mesma geometria e diâmetro esse valor do Cd foi, aqui, adotado.

Na Tabela 5 abaixo, têm-se as pressões e empuxo obtidos pelo sistema de aquisição da bancada em cada teste, descrito no Anexo V: Descrição do Sistema de Aquisição.

Tabela 5- Resultados do sistema de aquisição

Teste	Pressão Entrada Orif. (bar)			Pressão Saída Orif. (bar)			Pressão Câmara (bar)			Empuxo(kgf)			Empuxo (N)
	MAX.	MIN.	MED.	MAX.	MIN.	MED.	MAX.	MIN.	MED.	MAX.	MIN.	MED.	MED.
1	31,6	27,1	29,3	9,6	7,8	8,7	4,1	2,7	3,2	19,1	13,7	15,9	155,8
2	34,9	30,2	32,5	10,5	8,9	9,7	6,7	3,3	4	28,7	17,4	20,8	203,8
3	37,2	27,7	32,2	10,9	7,9	9,4	4,6	2,7	3,5	19,7	11,9	7,8	76,4
4	40,7	34,5	37,7	12,6	10,2	11,4	5,5	3,3	4,2	24,4	17	20	196
5	44,3	36,1	40,1	13,7	10,8	12,1	6,4	3,8	4,9	27,8	18,5	22,7	222,5
6	42,2	34,3	38,2	12,9	10,2	11,6	6,3	3,8	4,7	26,9	16,4	19,9	195
7	41,4	36,8	39,1	12,6	11	11,8	5,1	4	4,5	19,3	16,4	17,9	175,4
8	43,4	38,9	41,1	13,4	11,7	12,6	6,4	4,3	5,3	26,5	20,5	23,6	231,3
9	43,5	37,7	40,5	13,5	11,5	12,4	6,1	3,8	4,7	24,4	18	20,5	200,9
10	47,9	42,1	45	15	12,8	13,9	6,4	4,4	5,3	31,8	25,5	27,3	267,5
11	40,1	33,7	36,9	12,2	10	11,1	5,9	4,1	4,8	25,1	19,7	22,2	217,6
12	38,1	28,7	34	11,8	9	10,3	5,4	3,1	4	32,1	15,8	19,5	191,1

Os gráficos obtidos pelo sistema de aquisição estão inseridos no “Anexo VI: Gráficos e Descrição dos Resultados”.

Pode-se obter o gráfico da taxa de regressão pelo fluxo de massa médio do oxidante definidos a cada ensaio. Com auxílio do programa EES pode-se definir as constantes "a" e "n" da equação 9 citada.

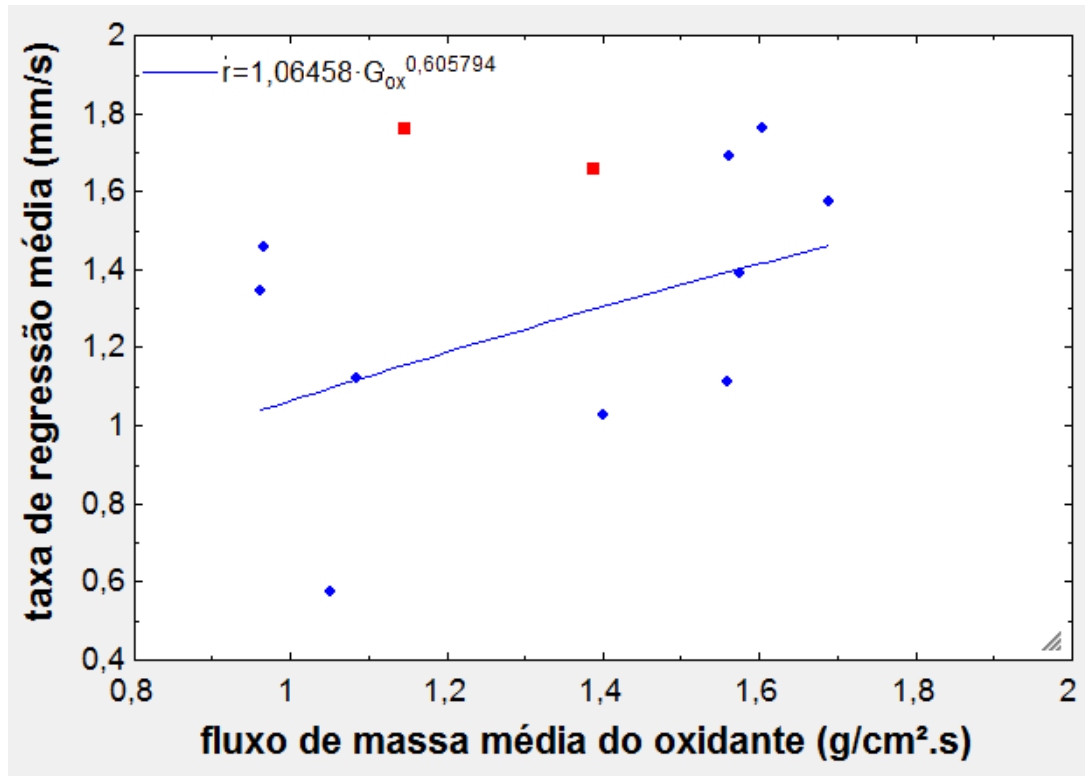


Gráfico 1 - Taxa de regressão x Fluxo de massa do oxidante

Onde os pontos azuis são relativos a mistura de 80% parafina e 20% sebo bovino e os vermelhos relativos a parafina comum pura.

Para uma caracterização mais fidedigna da lei da taxa de regressão é aconselhável que sejam realizados mais ensaios, no entanto, para os testes realizados os valores das constantes "a" e "n" são 1,06458 e 0,605794, respectivamente, resultando na equação abaixo:

$$\bar{r} = 1,06458 \bar{G}_{ox}^{0,605794} \quad (10)$$

Comparando-se os resultados com os obtidos por *Lyne*, os dados obtidos pelo par 50% parafina comum 50% óleo de gordura suína apresenta taxas de regressão semelhantes ao par aqui estudado, porém os seus gráficos de empuxo e pressão apresentam mais instabilidade.

Abaixo, seguem os gráficos comparativos da parafina comum no ensaio 12 e da parafina dopada com óleo de gordura bovina no ensaio 8:

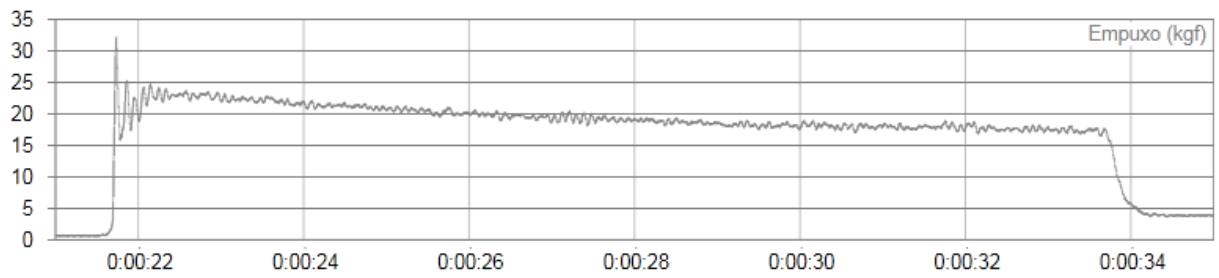


Gráfico 2 - Empuxo do combustível 100% parafina

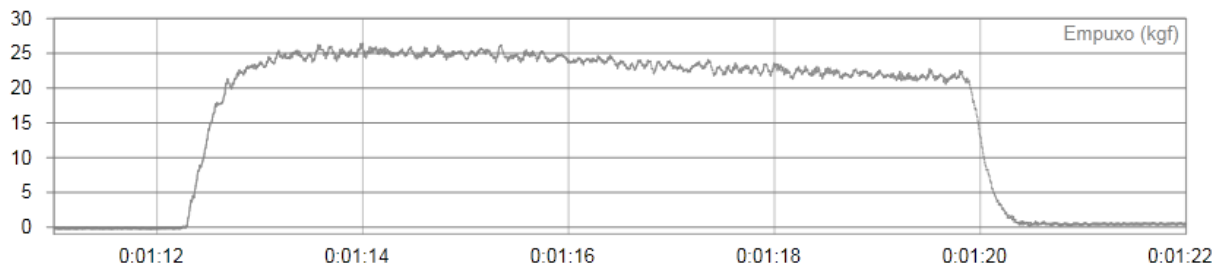


Gráfico 3 - Empuxo do combustível constituído de 80% parafina e 20% sebo bovino

Em última análise, comparamos nosso par propelente com o testado por *Lyne*, demonstrados nos gráficos abaixo:

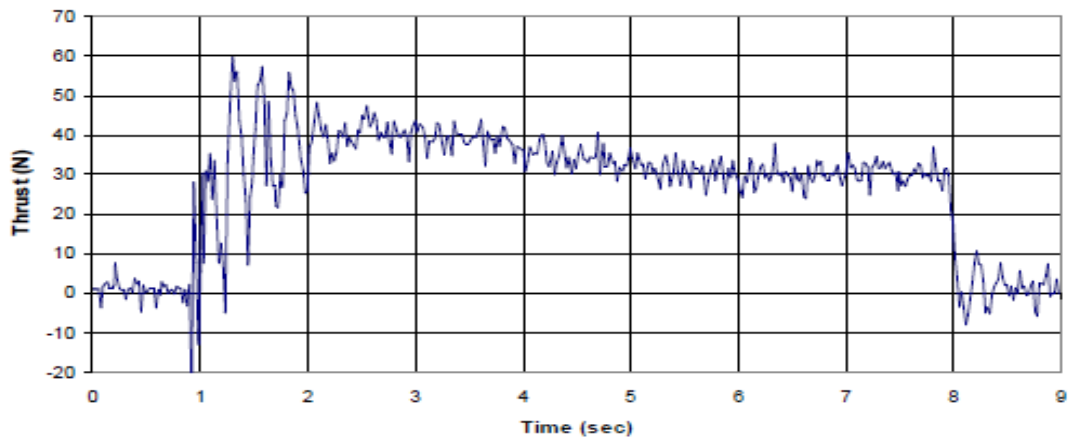


Gráfico 4 - Empuxo constatado por Lyne

## 5 CONCLUSÃO

Como citado anteriormente, os Motores de foguete a Propelente Híbrido tem, atualmente, retomado o interesse devido a crescente necessidade de acesso seguro, porém a custos reduzidos ao espaço. Nesse contexto, a propulsão híbrida leva vantagem, pois reúne um desempenho superior aos sistemas sólidos e mais barato ao comparado com os sistemas líquidos.

Doravante, o aspecto anteriormente citado é, paralelamente, o maior entrave enfrentado pelos sistemas híbridos que reúnem uma taxa de regressão do combustível sólido inferior a taxa de queima dos foguetes sólidos.

Atualmente há um esforço contínuo por um número cada vez mais crescente de países no desenvolvimento de propelente híbridos de alto desempenho que tornem esse tipo de sistema mais competitivo.

Desde a apresentação de uma classe de combustível a base de parafina que queimam de três a quatro vezes mais rapidamente que os combustíveis híbridos tradicionais (que não sofrem liquefação durante o processo de queima) esses esforços tem se intensificado e o interesse sobre a propulsão híbrida é cada vez mais crescente.

Nesse escopo, este trabalho desenvolveu uma matriz de grão combustível sólida ainda não testada no Brasil, e ao que a pesquisa bibliográfica que antecedeu o seu desenvolvimento aponta, trata-se de um estudo inédito ao dopar parte de grão combustível composto de parafina fóssil com sebo bovino.

Após a produção de uma série de amostras (tabela 6) foi escolhida a composição 80 % parafina fóssil – 20 % Sebo de Boi, pois foi a melhor proporção que manteve uma boa integridade estrutural (devido a parafina) com uma proporção relativamente grande de sebo de boi.

Testes com um motor de bancada, de empuxo médio de aproximadamente 200 N, foram realizados. De um total de doze testes, dez foram feitos com a nova matriz e dois foram realizados apenas com parafina. Observou-se que para uma mesma configuração, porta de combustão de 40 mm, a taxa de regressão da parafina 1,7 mm/s (teste 12) ficou muito próxima as do que foram dopadas com sebo: 1,7 mm/s (teste 4), 1,8 mm/s (teste 5) e 1,6 mm/s (teste 6).

Isto nos leva a propor, para trabalhos futuros, a utilização do sebo bovino e parafina em motores com fluxo mássico superiores aos aqui obtidos como forma de estudo do comportamento deste propelente em uma faixa maior de empuxo e fluxo mássico.

Comparando-se ainda os custos do uso da parafina comum com os da parafina dopada com óleo de gordura bovina, percebem-se ainda mais as vantagens da adição deste novo componente ao combustível de queima.

Tabela 6 - Análise de custo

Material	Kg	Preço
Parafina	5	R\$ 50,00
Óleo de gordura bovina	5	R\$ 33,00

Um dos problemas de se trabalhar com o sebo bovino é o difícil controle de todas as suas propriedades devido à variação que existe entre as amostras obtidas, visto que dependem dos tipos de gordura bovina, de qual parte exatamente o sebo foi retirado, da proporção de carne que foi misturada na hora do corte, se era fresca ou congelada, entre outros.

O sebo é vendido comercialmente em açougues, porém em sua forma bruta, que apresenta grande quantidade de impurezas. O óleo é obtido através do processo explicado no item “3.3 Retirada do óleo do sebo bovino”, que requer uma grande quantidade de sebo para apresentar uniformidade amostral.

Com base nos dados apresentados, é possível concluir que o interesse na dopagem da parafina comum com óleo de gordura bovina é justificado, visto que apresentou resultados relevantes no estudo dos combustíveis para MFPH. Sua taxa de regressão se aproximou da parafina comum e da calculada por *Lyne* (2005) com a cera de abelha. Por ser maior do que as taxas dos combustíveis híbridos clássicos (tais como o PE e HTPB) torna o óleo de gordura bovina uma opção viável e eficiente na substituição, ainda que parcial, da parafina comum. O fato de o sebo bovino ser considerado um dejetos apenas torna a pesquisa mais atraente.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTOLDI, A. E. M. (2007). Avaliação Experimental da Queima de Parafina e Óxido Nitroso em Motores Híbridos. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-120A/07, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p.
- CHIAVERINI M. J., SERIN N., JOHNSON D. K., LU, Y., KUO, K. K., RISHA, G. A., (2000) “Regression Rate Behavior of Hybrid Rocket Solid Fuels”, *Journal Of Propulsion And Power*.v. 16,No.1.
- CONTAIFER, R. A., (2006) “Qualificação e Testes de Vôo do foguete SD 1”, trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília.
- EVANS, B., Favorito, N. A., Kuo, K. K., (2005) “Study of Solid Fuel Burning-Rate Enhancement Behavior in an X-Ray Translucent Hybrid Rocket Motor”, *41 st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Tucson AZ.
- GEORGE P., KRISHNAN S., VARKEY, P. M., RAVINDRANS M., RAMACHANDRAN L., (2001) “Fuel Regression Rate In Hydroxyl-Terminated-Polybutadiene/Gaseous-Oxygen Hybrid Rocket Motors”, *Journal Of Propulsion And Power*, v.17, No. 1, pp. 35-42,2001.
- HUMBLE, R. W., HENRY, G. N., LARSON, W. J., (1995) “Space Propulsion Analysis And Design”, MacGraw-Hill Companies, Inc. Primis Custom Publishing.
- KARABEYOGLU, M, A., (1999) "Transient Combustion in Hybrid Rockets", tese de doutorado, 236 páginas.
- KARABEYOGLU, A., CANTWELL, B. J., ZILLIAC, G., (2005) “Development of Scalable Space-Time Averaged Regression Rate Expressions for Hybrid Rockets”, *41st AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference*, Tucson AZ.
- KARABEYOGLU, A., CANTWELL, B. J., ZILLIAC, G., DeZILWA. S., CASTELLUCCI, P., (2004)“Scale-Up Tests of High Regression Rate Paraffin-Based Hybrid Rockets Fuel”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 6.
- KARABEYOGLU, A., ZILWA, B., ZILLIAC, G., (2005) “Modeling of Hybrid Rocket Low Frequency Instabilities”, *Journal of Propulsion and Power* v. 21, No. 6, pp. 1107-1106.
- KUO, K. K., RISHA G. A., BOYER, E., WEHRMEN R. B., (2002) “Performance Comparison Of HTPB-Based Solid Fuels Containing Nano-Sized Energetic Powder In A Cylindrical Hybrid Rocket Motor”, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, Indiana.
- LACAVALA, P. T., BASTOS-NETO, D., PIMENTA, A. P., (2004) “Design Procedure And Experimental Evaluation Of Pressure –Swirl Atomizers”, *24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, ICAS 2004.
- LYNE, J. E., NAOUMOV, V. I, SCHOLES J., DODGE, M., ELTON, B., WOZNIAK P., AUSTIND., SANTOS, L., M., C., ALMEIDA, L., A., R., FRAGA, A., M., VERAS, C., A., G. (2004) “Experimental Investigation of a Paraffin Based Hybrid Rocket”. In: *10TH Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro.
- LYNE, J. E., NAOUMOV, V. I, SCHOLES J., DODGE, M., ELTON, B., WOZNIAK P., AUSTIND., Combs C., (2005) “First Steps in the Development and Testing of Nontoxic, Bioderived Fuels for Hybrid Rocket Motors”, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada.

SUTTON, G. P., (1992) "Rocket Propulsion Elements", John Wiley & Sons INC. 7TH edition.

TAMURA, T., YUASA, S., YAMAMATO, K., (1999) "Effects Of Swirling Oxidizer Flow On Fuel Regression Rate Of Hybrid Rockets", *35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Los Angeles, California.

# ANEXOS

	Pág.	
Anexo I	Fotos da bancada e do processo de fabricação	30
Anexo II	Caracterização da Parafina Comum	41
Anexo III	Programa computacional no EES de cálculo da taxa de regressão	42
Anexo IV	Descrição do Sistema de Aquisição	43
Anexo V	Descrição do Sistema de Controle	44
Anexo VI	Gráficos e Descrição dos Resultados	45





Figura A. 1- Vista traseira do motor

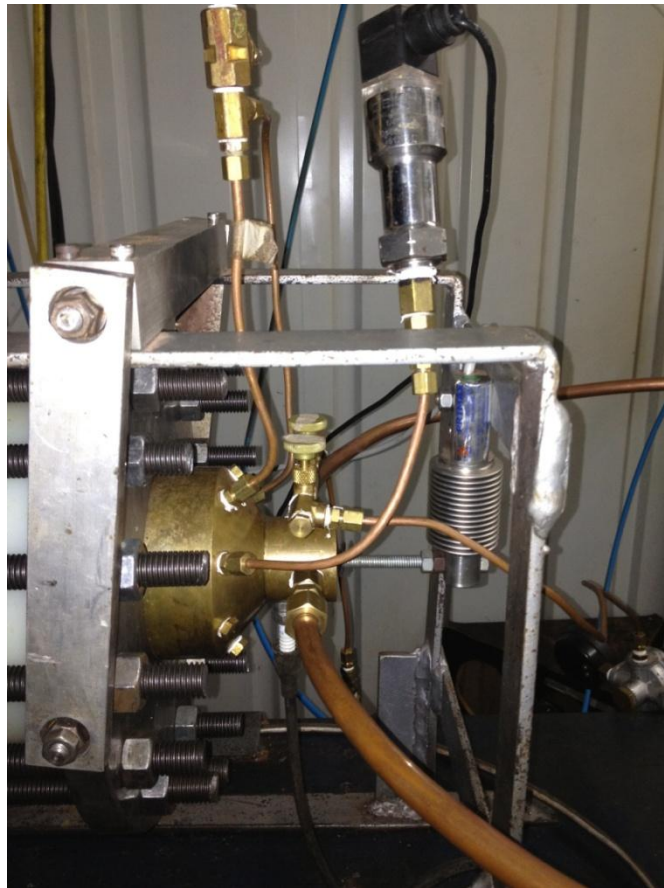


Figura A. 2 - Sistema de injeção de gases



Figura A. 3 - Tubeira dentro da câmara de celeron

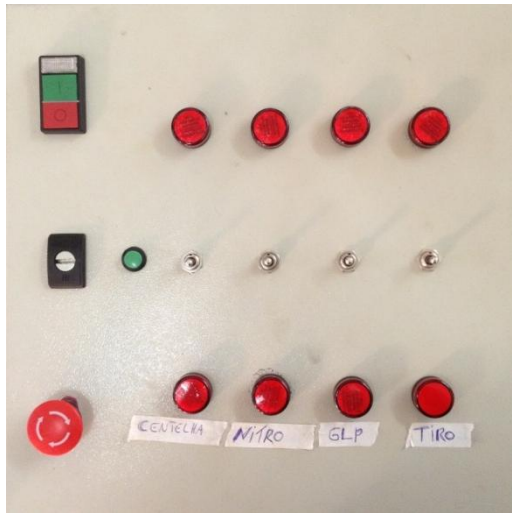


Figura A. 4 - Quadro elétrico de acionamento de válvulas



Figura A. 5 - Sistema de aquisição



Figura A. 6 - Motor de centrifugação da parafina



Figura A. 7 - Grão antes da combustão



Figura A. 8 - Grão depois da combustão



Figura A. 9 - Case de fabricação do grão



Figura A. 10 - Tubeira de cobre consumida



Figura A. 11 - Derretimento do sebo



Figura A. 12 - Amostras da mistura de parafina com sebo bovino

A parafina é um derivado do petróleo descoberto por Carl Reichenbach. Conhecida por sua alta pureza, excelente brilho e odor reduzido, também pode ser usada como combustível. O alto grau de refino a que são submetidas faz com que possuam cor branca e excelente estabilidade química, sem odor, sem gosto e com ponto de fusão típico entre 47 °C e 65 °C. Podem receber classificação quanto ao ponto de fusão como no caso das parafinas da Petrobrás:

- Parafina 120/125°F-3%
- Parafina 130/135°F-1%
- Parafina 140/145°F-1%
- Parafina 140/145°F-2%
- Parafina 150/155°F-2%
- Parafina 170/190°F-1%

A parafina pura é um excelente isolante elétrico. Sua cera (C<sub>23</sub>H<sub>48</sub>) é um excelente material no que diz respeito à estocagem, visto que como supracitada a cera de parafina é inerte a maioria dos agentes intempéries. A parafina deve ser estocada granulada em sacos de 25 kg em local arejado e a temperatura ambiente (aproximadamente 27°C). A parafina sólida é pouco resistente aos choques mecânicos.



"dados antes do ensaio"

m\_i= "massa inicial [kg]"  
 d\_i= "diâmetro inicial [mm]"  
 L\_g= "comprimento do grao inicial [mm]"

"dados após o ensaio"

m\_f= "massa final [kg]"  
 t\_b= "tempo de queima [s]"  
 d\_f= "diâmetro médio final"  
 rho\_f=0,871 "massa específica da parafina comum BR"

"fórmulas"

DELTA\_m\_f=m\_i-m\_f "massa do combustível queimado [Kg]"

$d_{vc}=(d_i^2+(4*DELTA_m_f*10^6)/\pi/\rho_f/L_g)^{1/2}$  "diâmetro final [mm]"

$r=(d_{vc}-d_i)/2/t_b$  "taxa deregressao média [mm/s]"

"-----"  
 "vazão mássica"

P\_f= "Pressão na entrada da placa de orifício"  
 d\_or=3,99 "Diâmetro do orifício"  
 A\_or= $\pi*(d_{or}/2)^2/10^6$  "Área do orifício"  
 C\_d=0,615 "Coeficiente de descarga"  
 c\_ox=680 "Velocidade característica do oxidante"

$m_{ox}=P_f*A_{or}*C_d/c_{ox}$  "vazão mássica do oxidante"

$G_{ox}=16*m_{ox}/\pi/(d_i+d_{vc})^2*100$  "fluxo de massa médio do oxidante"

O sistema de aquisição é composto por:

- 1 célula de carga da marca PRIMAX;
- 4 termopares da marca Thermomax;
- 3 transdutores de pressão das marcas:
  - ◆ Sitron de 0 a 50 Bar, localizado na câmara de combustão;
  - ◆ 2Wika de 0 a 100 Bar, localizados na injeção.

O sistema de aquisição é composto de duas caixas de comando. Com auxílio do software AqDados 7.02 podemos aferir as temperaturas e pressões, antes e depois da placa de orifício, o empuxo, a pressão do oxigênio antes e depois da placa de orifício, a pressão interna da câmara de combustão e a temperatura na tubeira.

Dos dois lados da placa de orifício há medidores de pressão e de temperatura para cálculo da vazão mássica.

O sensor de empuxo consiste em uma célula de carga que transmite um sinal quando pressionada ou tracionada. O empuxo gerado pelo motor gera uma força de compressão sobre a célula de carga, que transforma esse deslocamento sob a forma de um sinal elétrico. Foi colocado um parafuso preso à bancada, proporcionando uma pré-carga na célula de carga. Esse procedimento permite que os valores de variação do empuxo sejam coletados com maior precisão e evita que o impulso gerado pela ignição colida a bancada com a célula de carga ocasionando danos à sua estrutura ou erros em suas medições.

Os termopares utilizados devem possuir capacidade de leitura maior que 2000 °C, visto que as temperaturas da câmara ultrapassam essa temperatura. O sensor de pressão mede a pressão local no ponto em que é instalado, passando um sinal elétrico para a caixa de aquisição.

Foi desenvolvido um sistema de calibração para a célula de carga. Primeiro prendeu-se o conjunto inteiro do motor por um cabo de aço com o cuidado de estar bem alinhado, este cabo passa por uma polia localizada na ponta de uma mão francesa. Na outra ponta do cabo são adicionados blocos aumentando gradativamente a massa de 1 kg por pesagem até se atingir 40 kg.

A frequência de amostragem do sistema de aquisição é de 2 KHz.

O sistema de controle consiste de:

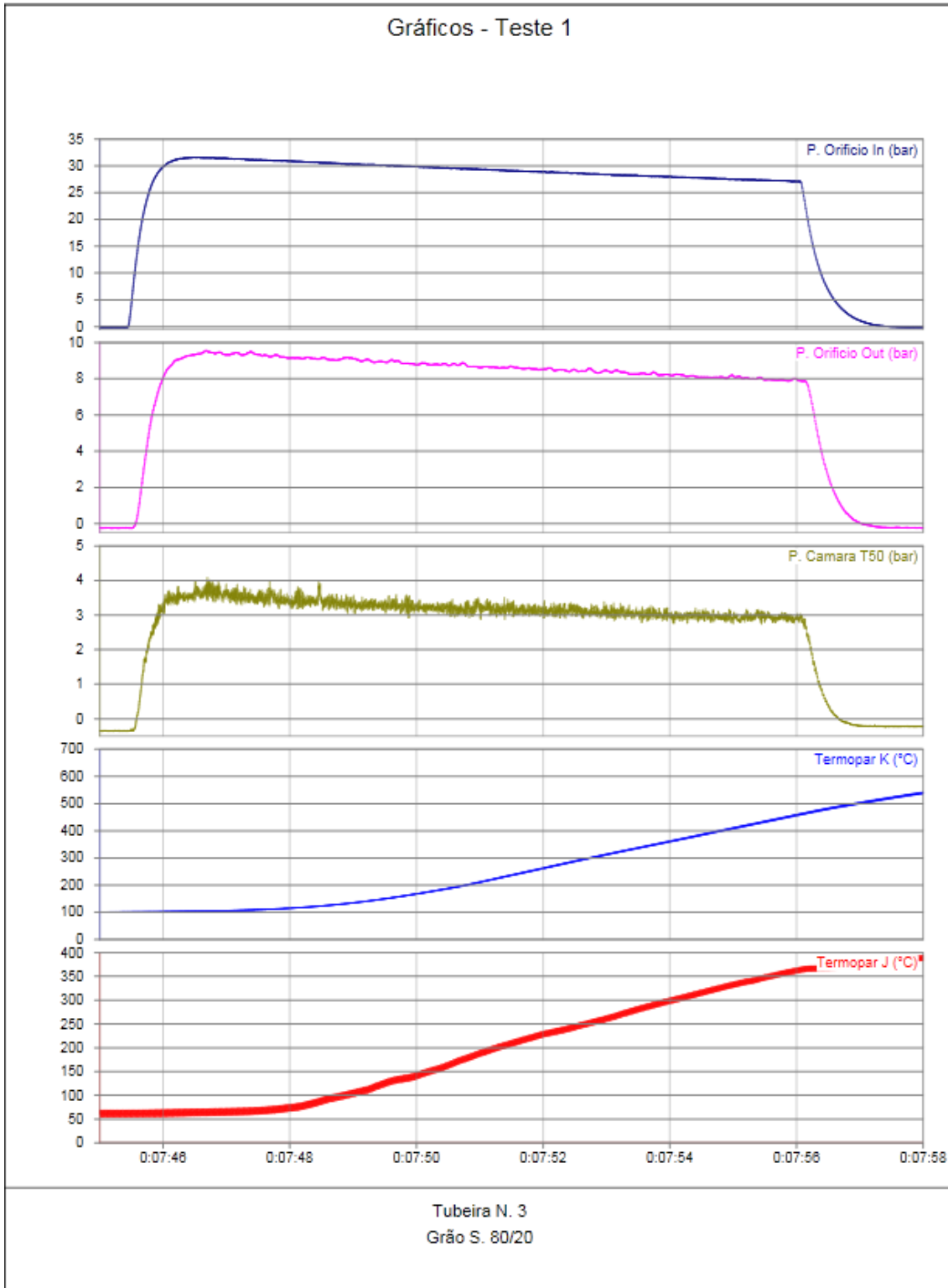
- 1 caixa de controle;
- 2 válvulas eletro pneumáticas da marca Valmicro;
- Vela de ignição automotiva;
- Solenóides.

A caixa de controle possui os comandos que, quando acionados, controlam a injeção, a ignição e a injeção de água. A injeção de oxigênio e GLP é ativada através das válvulas eletropneumáticas e sua associação com a vela dá início à ignição dentro da câmara de combustão.

O acionamento da injeção de água ocorre para apagar a chama dentro da câmara de combustão e interromper o ensaio.

Teste 1
Data: 27/01/2013

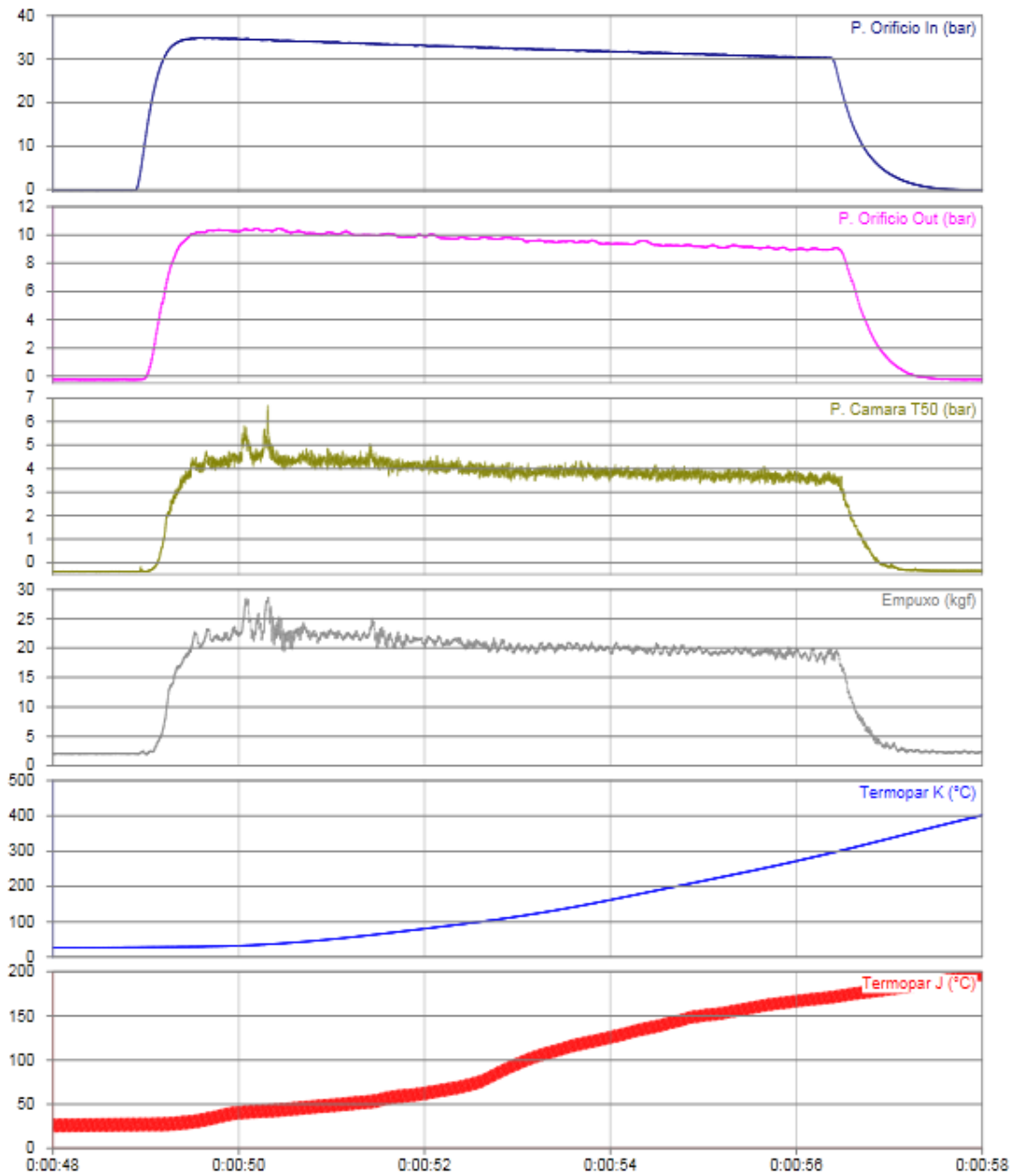
Gráficos - Teste 1



Tubeira N. 3  
 Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

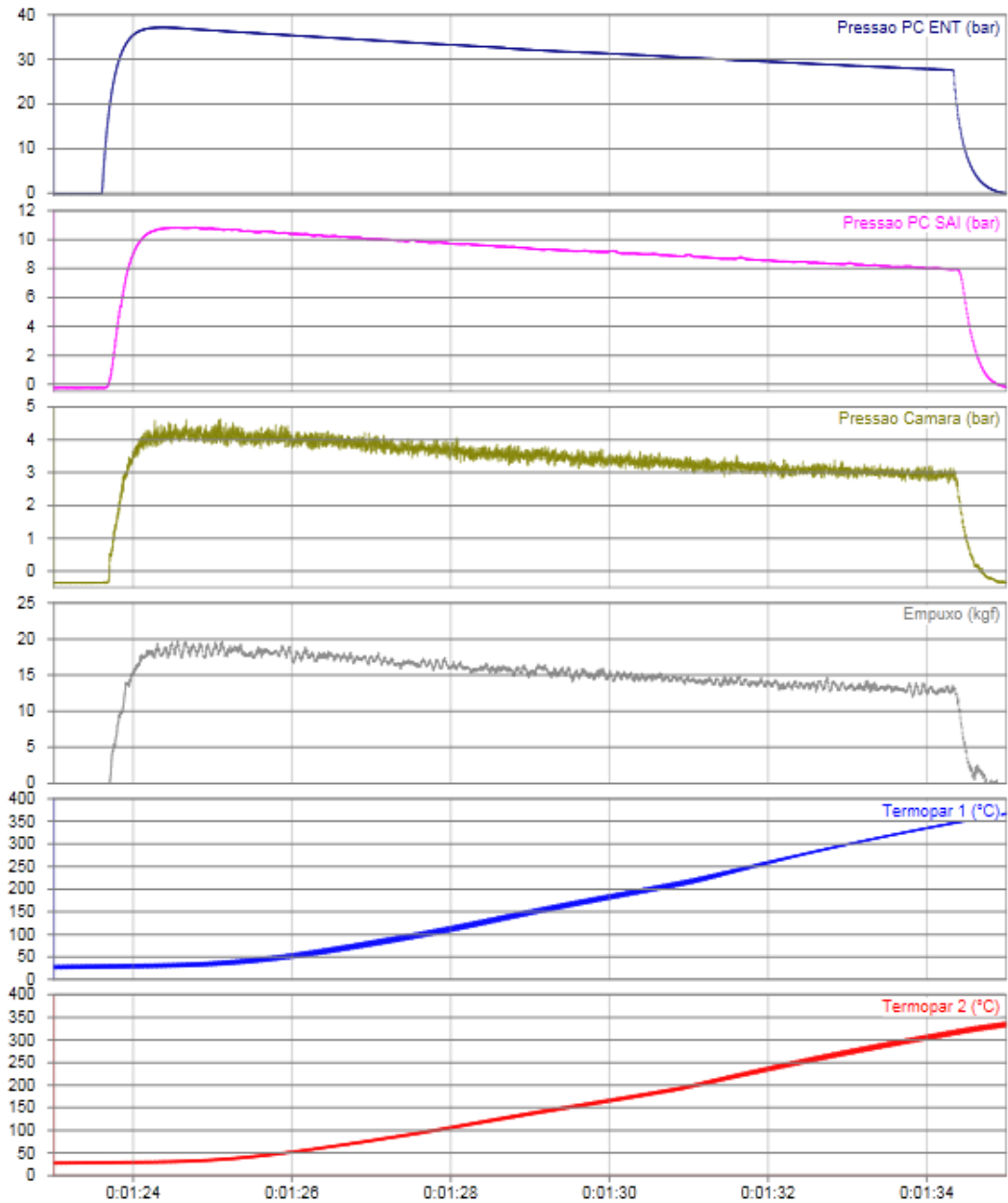
Gráficos - Teste 2



Tubeira N. 2A  
Grão P100

Responsável: Artur Bertoldi

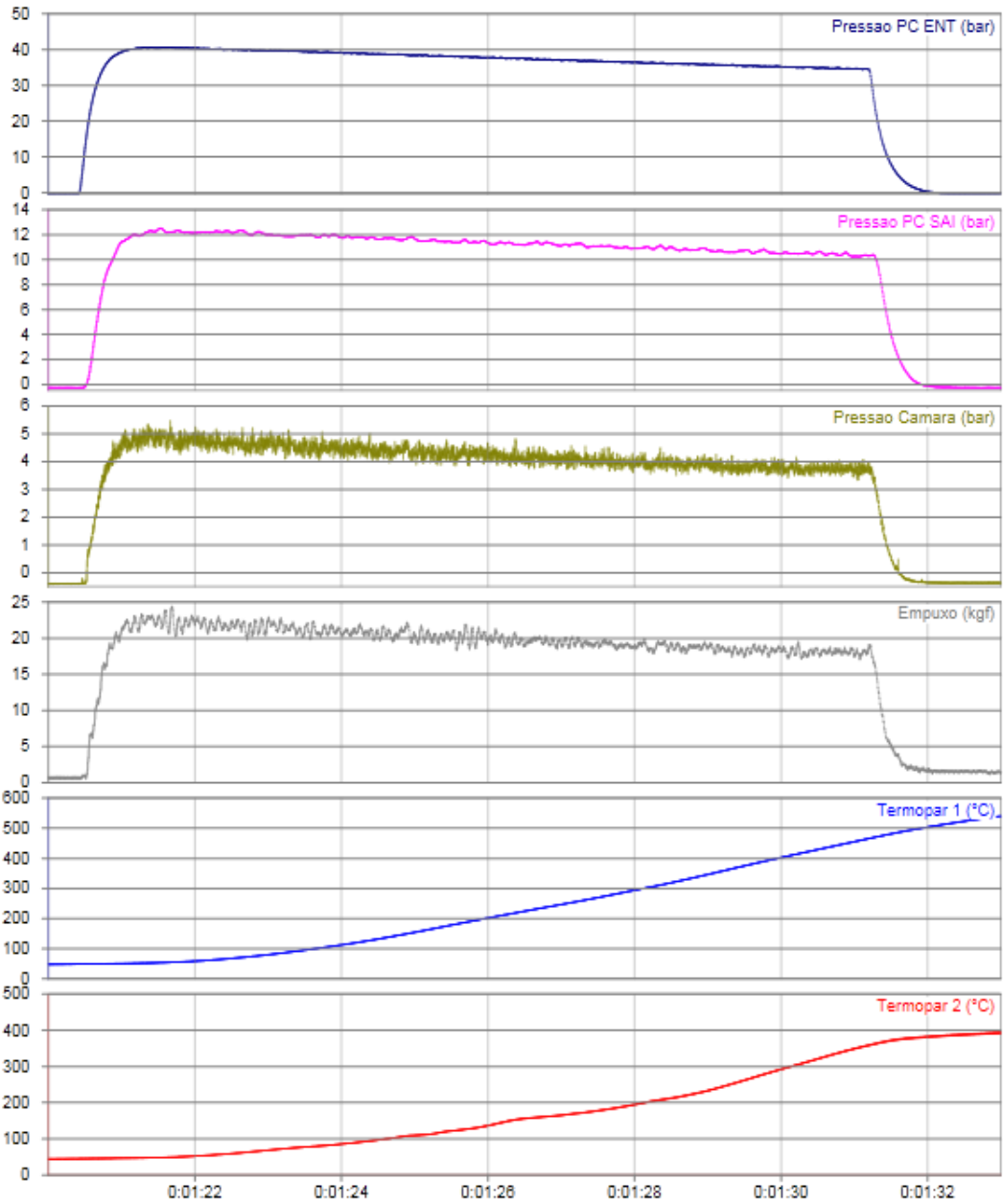
Gráficos - Teste 3



Tubeira N. 1  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

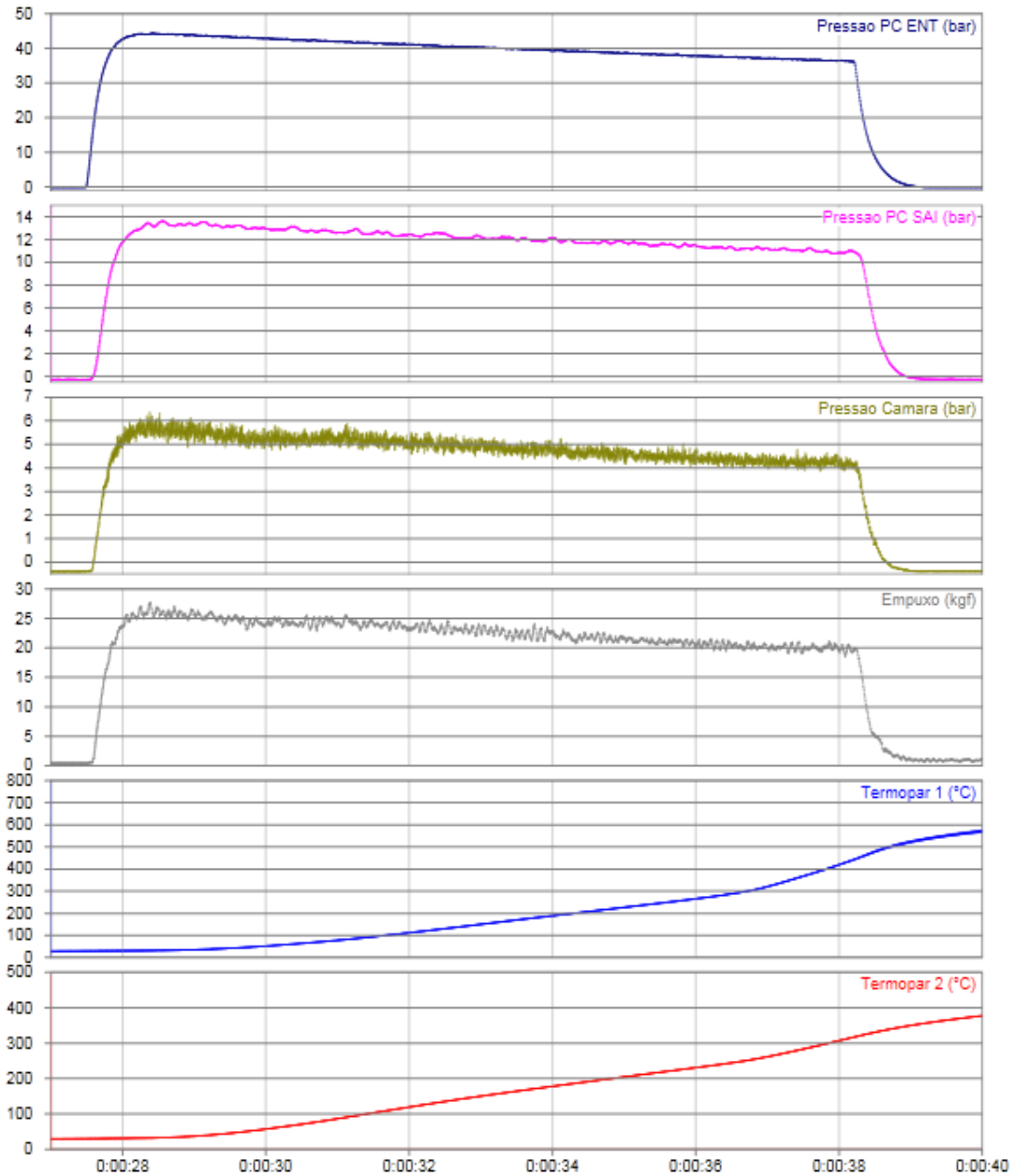
Gráficos - Teste 4



Tubeira N. 2A  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

Gráficos - Teste 5

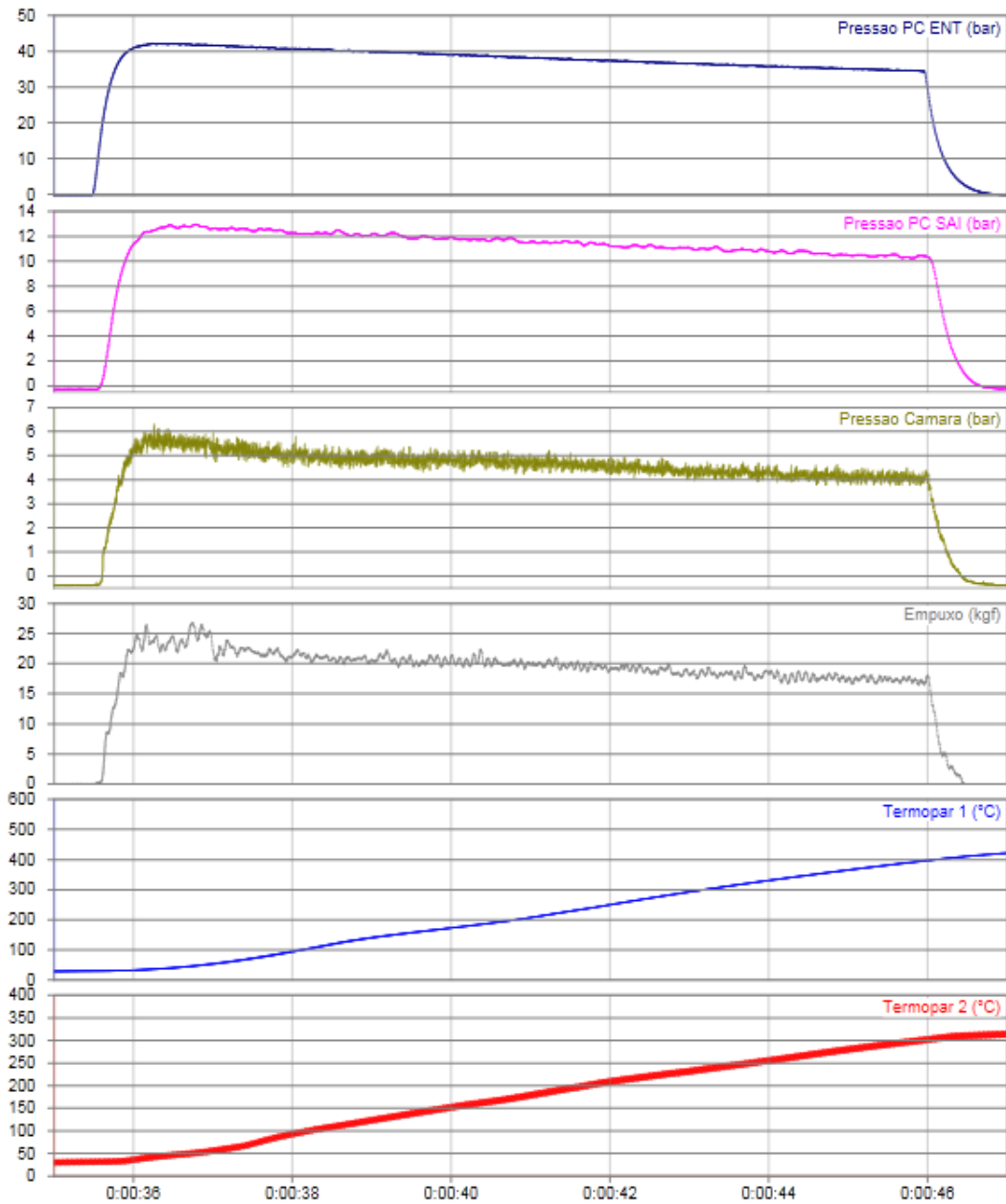


Tubeira N. 3A  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi



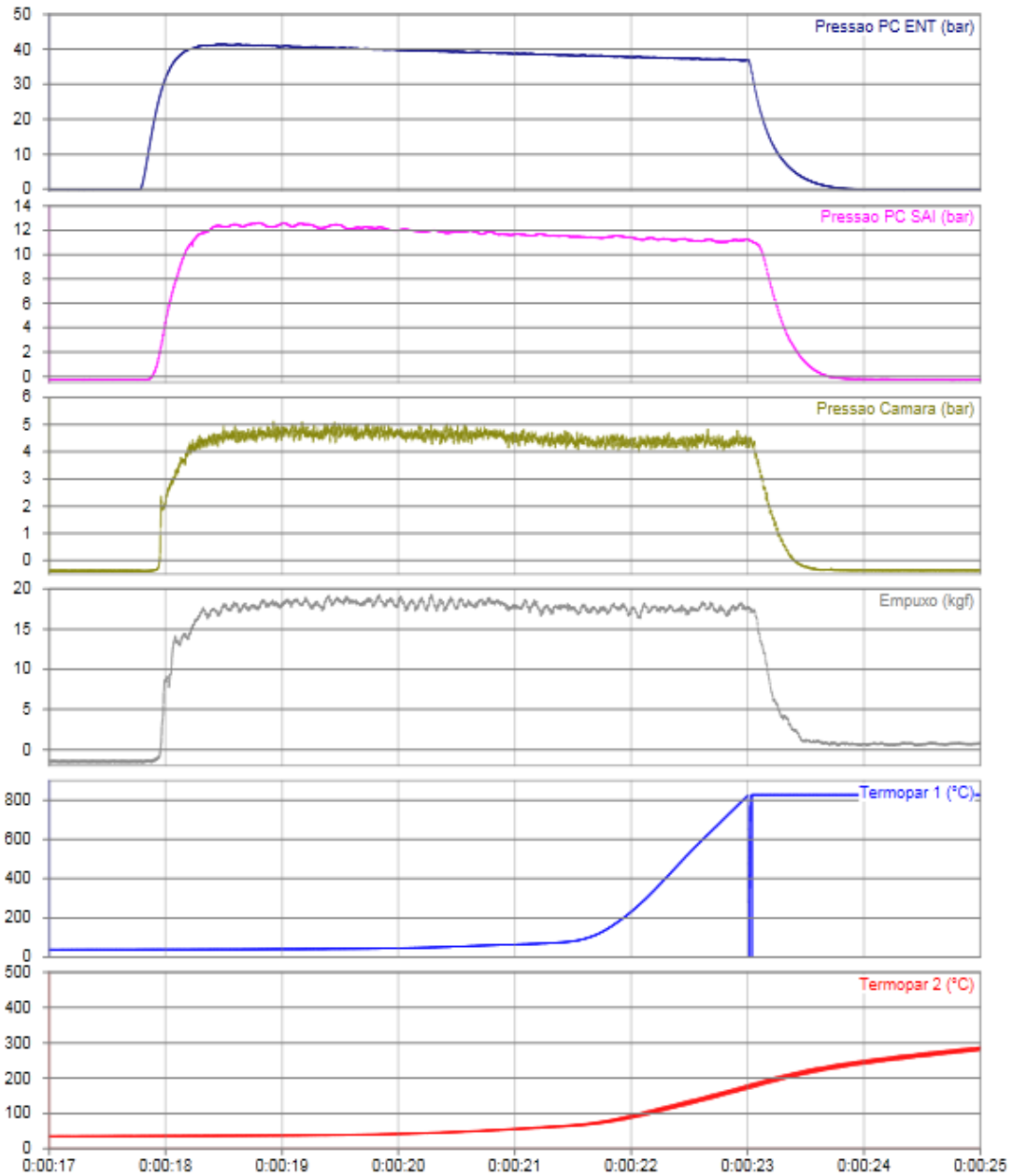
Gráficos - Teste 6



Tubeira N. 3A  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

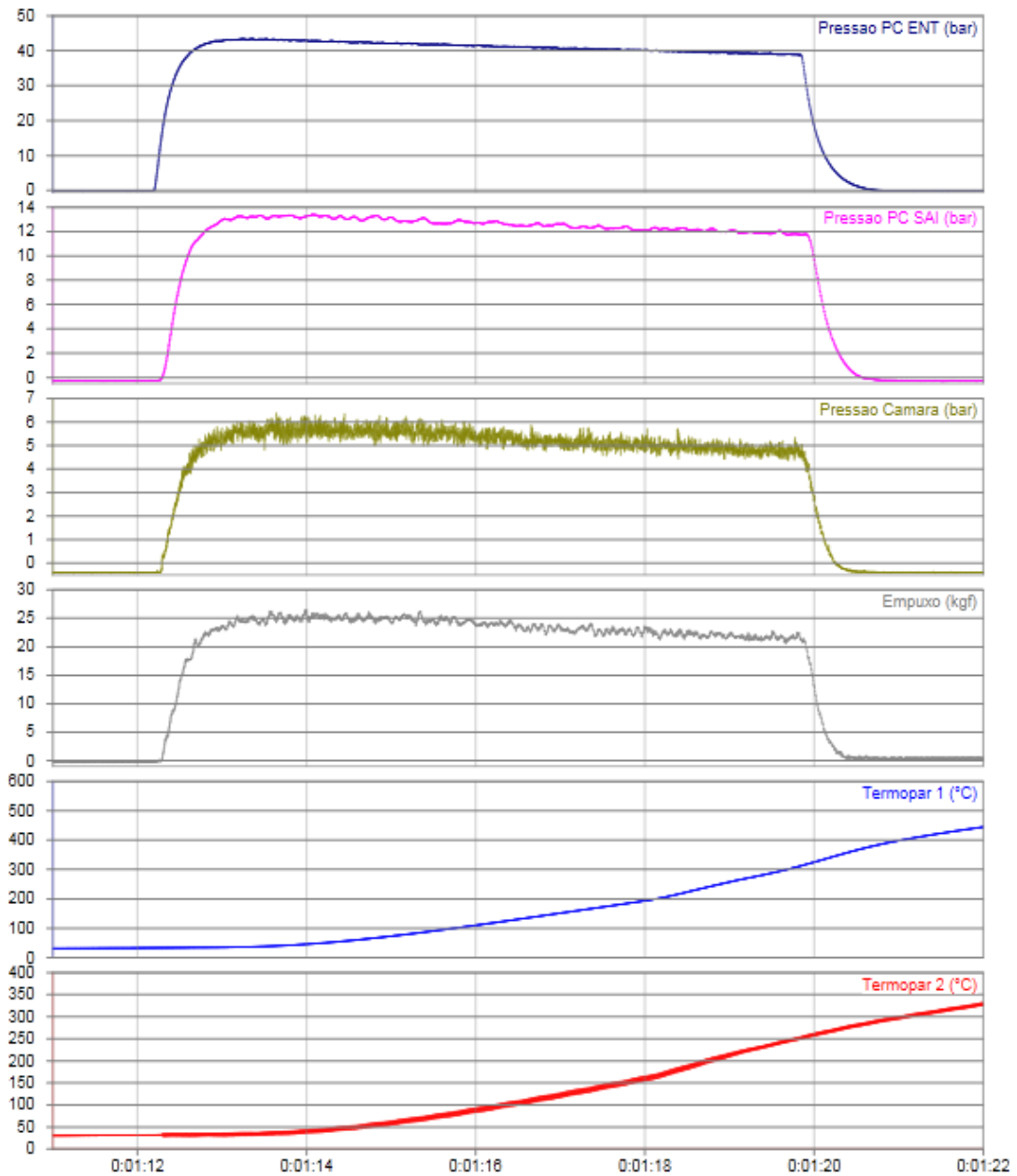
Gráficos - Teste 7



Tubeira N. 3  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

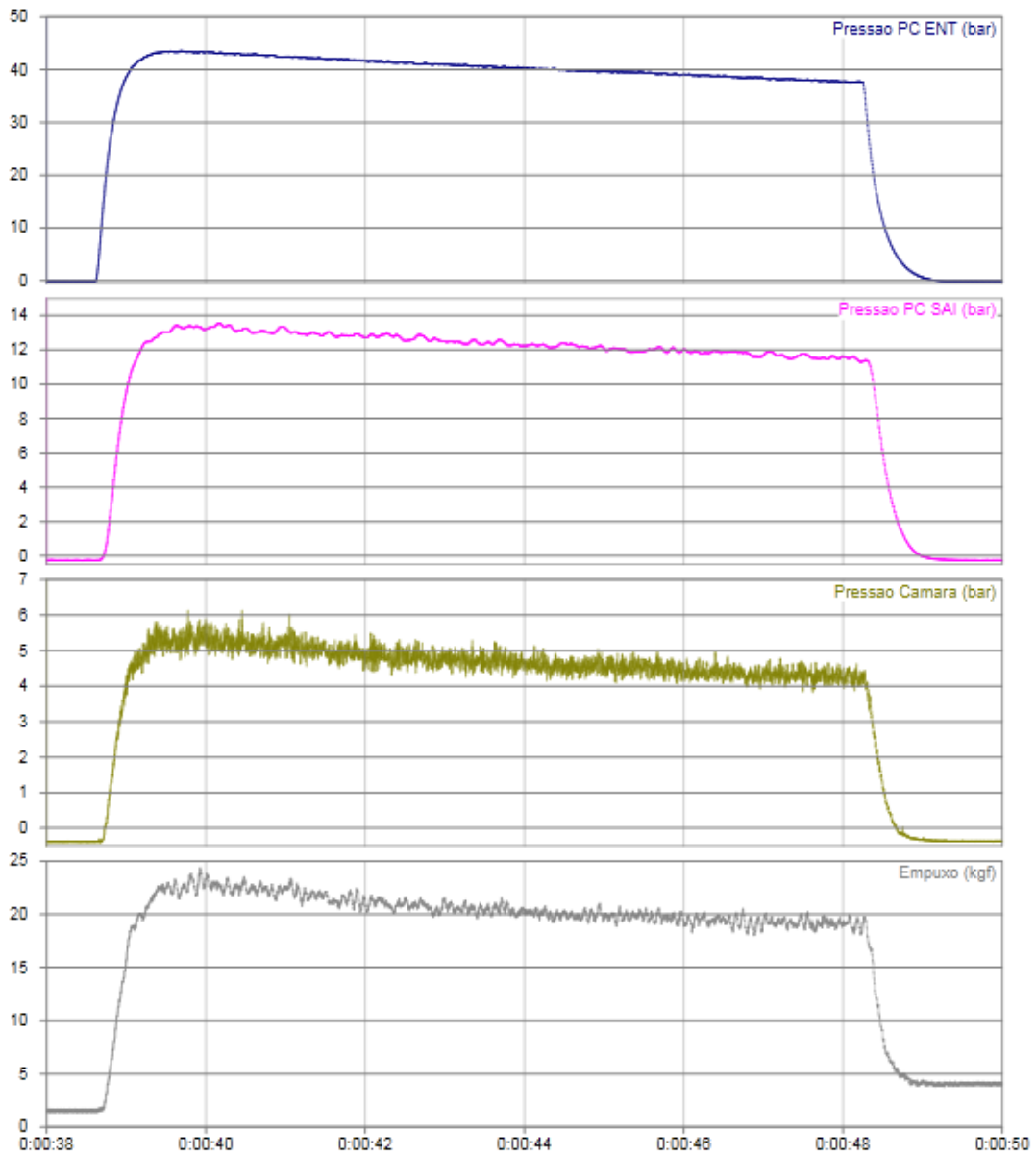
Gráficos - Teste 8



Tubeira 1  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

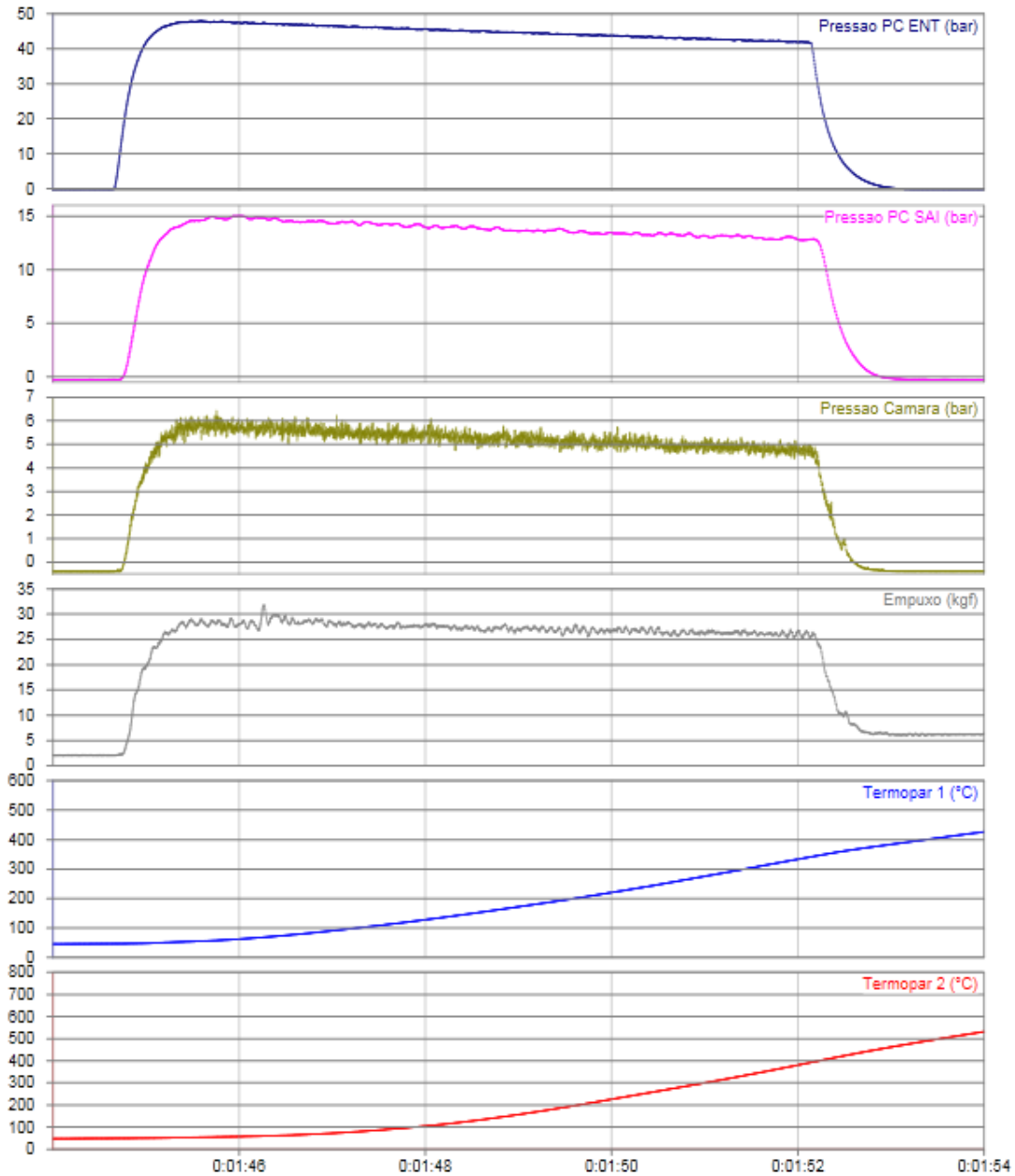
Gráficos - Teste 9



Tubeira 2  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

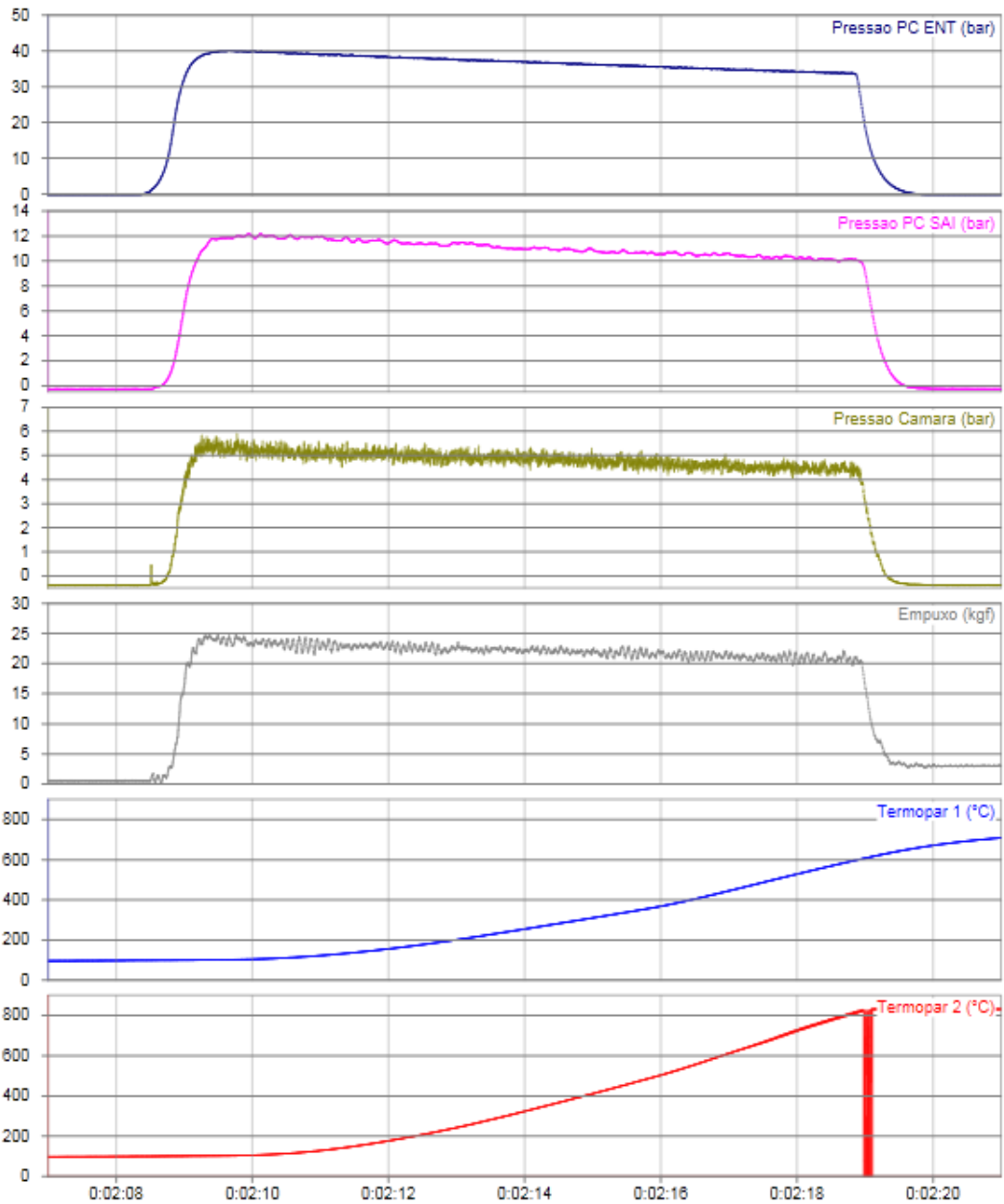
Gráficos - Teste 10



Tubeira 2  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

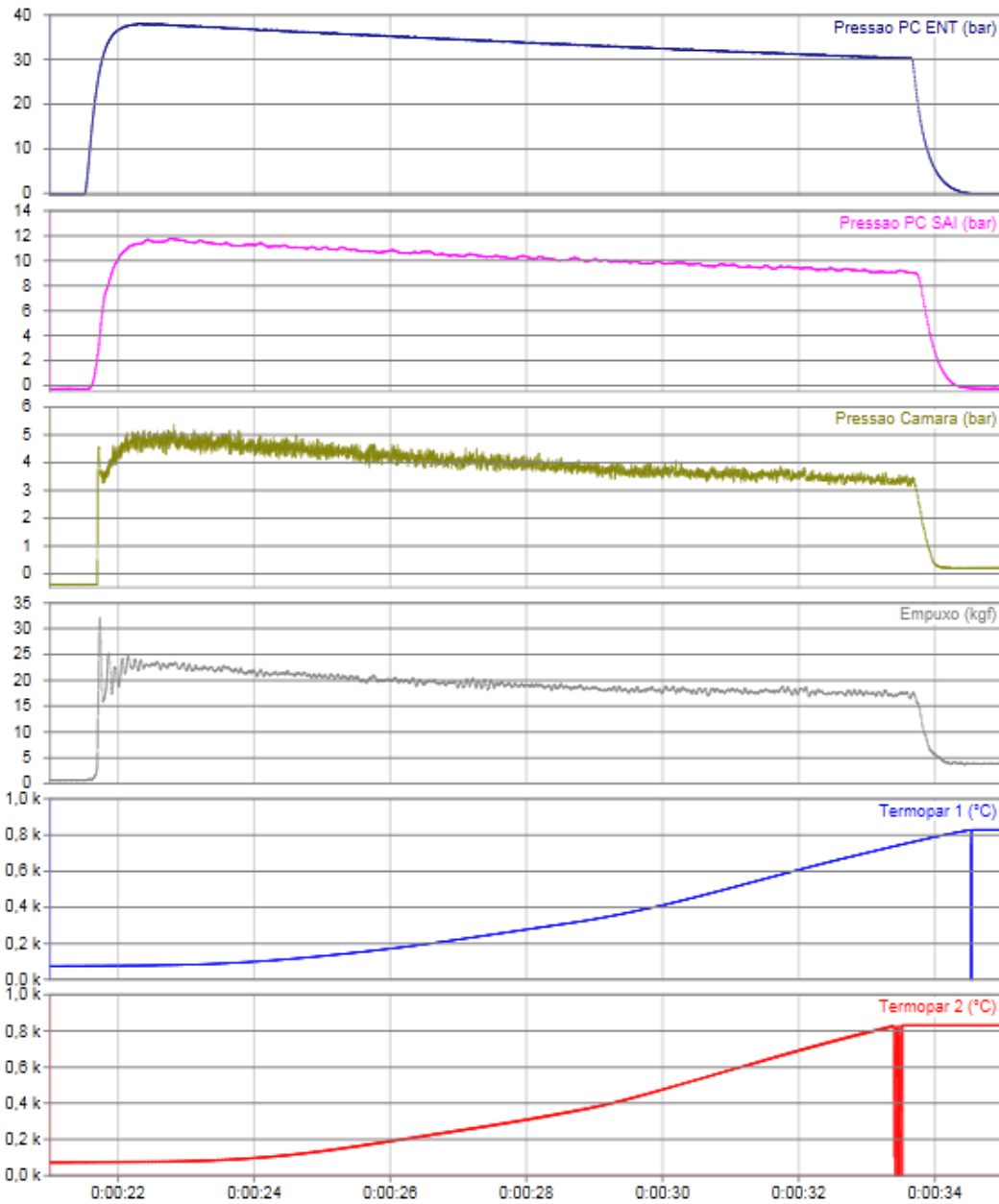
Gráficos - Todos Canais de Aquisição  
Teste 11



Tubeira 2A  
Grão S. 80/20

Responsável: Artur Bertoldi

Gráficos - Todos Canais de Aquisição  
Teste 12



Tubeira 2A  
Grão P. 100

Responsável: Artur Bertoldi