

## Influência da Utilização de Bocais Convergente-Divergentes no Impulso Gerado Por Motores De Combustão Sólida Para Minifoguetes

Alexandre Lima, alexandre.silva.lima@cefet-rj.br<sup>1</sup>

Josmar Cristello, Josmarbcristello@gmail.com<sup>1</sup>

Rafael Mendes, rafmendes@globo.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Depto. Eng. Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil

*Resumo: Este artigo apresenta uma comparação entre os resultados de testes estáticos de diferentes configurações de motores de combustão sólida para minifoguetes com objetivo de determinar o impacto que a utilização do bocal convergente-divergente (CD) tem no impulso gerado. Para a realização dos experimentos, foi proposto, projetado e construído um aparato de teste. Neste aparato foram testadas um total de quatro configurações de motores, com a presença ou ausência de um bocal convergente divergente, e dois níveis de combustível: 50 e 90 gramas. O combustível utilizado em todos os casos foi o KNSU, um propelente sólido composto de 65% em peso de nitrato de potássio e 35% de sacarose. Através da análise dos resultados, constata-se o quão significativo é o impacto que a presença de um bocal convergente-divergente tem no desempenho do motor. Além do impulso total gerado, são analisados também a força máxima e o tempo de combustão.*

**Palavras-chave:** Impulso, Espaçomodelismo, Bocal Convergente-Divergente

### 1. INTRODUÇÃO

Um foguete, ou minifoguete, é uma máquina que se desloca expelindo um fluxo de gás a alta velocidade. O movimento é alcançado pelo princípio da conservação da quantidade de movimento (produto da massa pela velocidade) destes gases, em outras palavras, a quantidade de movimento dos gases expelidos é igual à do foguete, gerando movimento.

O foguete é, portanto, um veículo que possui motor de propulsão, uma estrutura principal e diversos elementos aerodinâmicos com função da diminuição do arrasto ou alteração do movimento.

Motores em larga escala são sistemas extremamente complexos e diferem dos motores de pequena escala não só quanto ao tamanho, mas também em relação aos componentes utilizados e à dinâmica de voo. Minifoguetes não saem da atmosfera e possuem uma quantidade de combustível consideravelmente inferior ao dos foguetes de larga escala. Sendo assim, surge a necessidade da otimização de minifoguetes utilizando experimentos com condições reais de operação. O presente trabalho analisa o impacto da presença de um bocal convergente-divergente no desempenho de um motor de combustão sólida, avaliando o impulso produzido e o aproveitamento de combustível.

### 2. MOTORES DE COMBUSTÃO SÓLIDA

Dentre os motores disponíveis para espaçomodelismo, os de combustão sólida são prevalentemente utilizados. Isto se dá por diversos motivos. Primeiro, eles precisam de um menor número de aparatos para controle de fluxo (válvulas, reservatórios, tubulações internas, todos com vedação adequada), portanto, apresentam um custo e complexidade de construção expressivamente menor.

Outro ponto positivo do oxidante sólido é a possibilidade deste ser armazenado com mais segurança e por mais tempo, já que a reação de combustão ocorre somente quando em contato com seu respectivo combustível. Oxidantes líquidos (como oxigênio líquido, flúor líquido ou ácidos nítricos) são reativos com diversos elementos comuns, e apresentam uma chance muito maior de causar um acidente.

#### 2.1. Curvas Força x Tempo

O elemento mais comum em especificações de motores é o gráfico de força por tempo. Este gráfico é produzido em um teste estático e fornecido pelo fabricante para certificação do motor pela associação norte-americana National Association of Rocketry (NAR, 2017). A ilustração das informações mais importantes deste gráfico pode ser vista na

Figura 1.

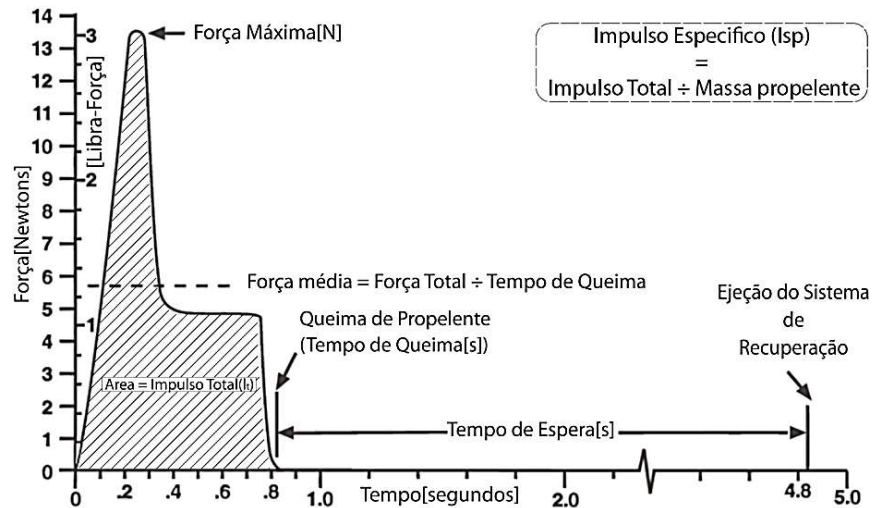


Figura 1. Ilustração dos pontos de interesse do gráfico Impulso x Tempo. Imagem adaptada (ESTES Rocket Lab, 2008).

É possível encontrar o pico do impulso, que geralmente ocorre no começo da queima. A força total é correspondente à área do gráfico (i.e., Impulso x tempo) e, quando o impulso chega a zero, é possível encontrar o tempo de queima. Alguns termos importantes são resumidos a seguir:

- **Impulso Máximo:** Pico de impulso atingido pelo motor, em Newtons;
- **Massa de Propelente:** Massa total de propelente, em gramas.
- **Tempo de Queima:** Tempo entre o início e fim da ignição do motor, em um teste estático. Em segundos;
- **Tempo de Espera:** Tempo entre o fim da combustão e a ejeção do sistema de recuperação. Em segundos;

## 2.2. Estrutura de um Motor de Combustão Sólida

O motor de combustão sólida de um minifoguete nada mais é do que um cilindro semi-confinado dentro do qual ocorre uma explosão controlada. Conforme o princípio de Pascal (White, 2011), a queima do propelente sólido provoca sua expansão em gases a altas temperaturas que produzem uma pressão homogênea em todas as superfícies internas do cilindro do motor.

Como o único ponto em que não há resistência ao escoamento do gás é a extremidade onde fica localizado o bocal, os gases tendem a sair passando através do mesmo. A angulação, dimensão e material do bocal vão definir a velocidade de saída do gás, e, portanto, a pressão atuante que propulsionará o minifoguete.

O motor de combustão sólida é essencialmente constituído pelos mesmos componentes, tanto para foguetes comerciais como para minifoguetes. A diferença está no material usado para esses componentes e na quantidade dos mesmos.

Em primeiro lugar, existe o corpo do motor (*casing*), que serve de estrutura para os outros componentes. Então tem-se o propelente sólido, que usualmente encontra-se em forma de grão compactado e, finalmente, o bocal na parte inferior.

Figura 2 ilustra estes componentes na forma de um motor simples, com uma visão em seção transversal do seu propelente compactado de forma tubular.

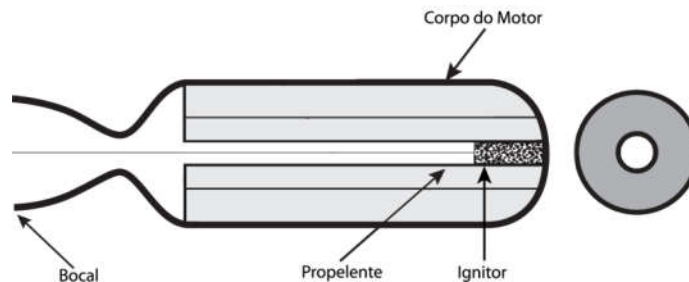


Figura 2. Estrutura de um Motor de Combustão Sólida, com visão de corte. Imagem adaptada (Rogers, 2008).

### 2.3. O combustível Sólido – Propelente

O propelente é uma substância química utilizada na produção de energia para propulsão de veículos ou projéteis. A energia é liberada termicamente de forma rápida através da expansão de um gás e é convertida em energia cinética, que imprime ao objeto uma certa velocidade.

Propelentes podem ser em seu estado inicial tanto sólidos, quanto líquidos, mas no caso de minifoguetes ele será considerado exclusivamente como combustível sólido. Durante o processo da combustão, entretanto, este assume diversas formas de matéria, sendo geralmente uma mistura de líquido, gás e plasma.

A temperatura de combustão de propelentes é tão elevada, que faz o processo de conversão de energia extremamente eficiente, se comparado com outros métodos de obtenção de energia. Essa temperatura elevada faz com que as reações químicas envolvidas no processo sejam aceleradas, atingindo praticamente combustão completa. Isso faz com que a energia liberada seja por volta de 95 a 99,5% do máximo possível.

A composição química de propelentes utilizados em minifoguetes é baseada em dois componentes principais: o combustível e o oxidante. O combustível é a substância que vai reagir com o oxigênio e gerar calor, enquanto o oxidante é a substância que fornece esse oxigênio para a mistura.

### 2.4. Bocal de um Motor de Combustão Sólida

A função primária de um bocal é a de converter a energia térmica liberada nas reações químicas pela queima do combustível em energia cinética através da expansão termodinâmica. Esta conversão é feita de forma a maximizar a velocidade dos gases de exaustão, garantindo que esta esteja no sentido do eixo principal do foguete, assim, obtendo um maior impulso total.

A geometria de bocal mais utilizada em minifoguetes e foguetes é a chamada de bocal convergente-divergente (CD) ou “bocal de Laval”, em homenagem a seu inventor *Gustaf de Laval*, que desenvolveu esse bocal originalmente em 1888 para a otimização de turbinas à vapor (Rogers, 2008).

O princípio dessa geometria é um perfil que garanta que o escoamento dos gases de exaustão seja isentrópico. Isto é, um escoamento que é dependente apenas da área de seção do bocal. Para que esse objetivo seja alcançado, existem duas exigências, em primeiro lugar que não exista atrito entre os gases e o bocal e em segundo que o escoamento seja adiabático (sem perda de calor) (Incropera *et al.* 2013).

Em um bocal real, essas exigências não podem ser completamente alcançadas, e, portanto, se traduzem na redução do atrito, redução das perturbações no escoamento e redução das condições que podem levar a formação de ondas de choque. Além disso, as perdas por troca de calor são minimizadas. Dessa forma, o escoamento real se torna quase isentrópico e pode ser considerado, com uma precisão aceitável, dependente apenas da variação da área de seção do bocal. A geometria de um bocal CD pode ser visto em corte na

Figura 3.

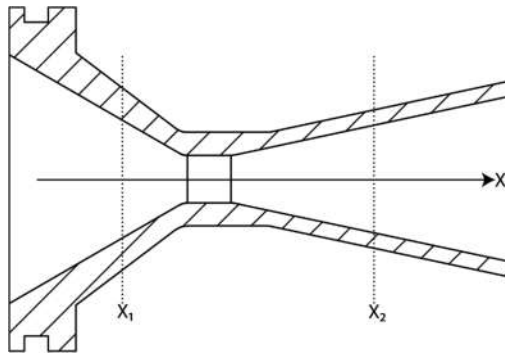


Figura 3. Geometria de um bocal CD.

#### 2.4.1. Condição de Projeto do Bocal

A relação ótima entre a área crítica e a área de saída é determinada por (Sutton, *et al.*, 2010):

$$\frac{A^c}{A_e} = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left( \frac{P_e}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (\text{Eq. 2-1})$$

Onde  $k$  é o coeficiente de expansão adiabática (constante de Poisson),  $A^c$  é a área crítica (menor área do bocal),  $A_e$  é a área de saída,  $P_0$  é a pressão na câmara de combustão, e  $P_e$  é a pressão na saída do bocal

Esta equação é conhecida como Condição de Projeto do Bocal, essa condição garante que o motor atinja um impulso máximo para uma dada massa de combustível. A razão  $A_e/A^c$  é a razão de expansão ótima, e frequentemente utilizado em projeto de bocais.

### 3. METODOLOGIA

O estudo define como objetivo atingir um maior impulso específico, visto que esse é frequentemente o parâmetro principal utilizado na indústria. Os fatores selecionados para o estudo foram: redução de área no bocal convergente-divergente e quantidade de combustível utilizada.

A geometria do bocal convergente-divergente é o principal fator que determina a pressão da câmara de combustão. Essa pressão é diretamente correlacionada com a razão entre a redução de área da câmara de combustão e a do pescoço do bocal. Serão estudados dois casos: Nenhuma redução de área crítica (ausência de bocal) e uma redução de área crítica de aproximadamente 8,5 vezes.

Finalmente a quantidade de combustível é a quantidade de energia total disponível dentro da câmara, e pode ditar se a combustão vai durar o suficiente para atingir equilíbrio e fluxo constante, ou não.

Os fatores podem ser encontrados em resumo na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros estudados.**

| Fator                  | Nível |       |
|------------------------|-------|-------|
|                        | 1     | 2     |
| Redução Área Bocal     | 1:1   | 1:8,5 |
| Quantidade Combustível | 50 g  | 90 g  |

#### 3.1. Planejamento de Experimentos

Os experimentos são definidos na Tabela 2. Para garantir aleatoriedade, a ordem em que foram executados os experimentos foi definida pelo algoritmo de geração de experimentos fatoriais completos do software Minitab.

**Tabela 2. Planejamento de testes por fatores**

| Número do Teste | Redução Bocal | Quantidade de Combustível |
|-----------------|---------------|---------------------------|
| 1               | 0 vezes       | 50 g                      |
| 2               | 0 vezes       | 90 g                      |
| 3               | 8,5 vezes     | 50 g                      |
| 4               | 8,5 vezes     | 90 g                      |

### 4. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O aparato utilizado consistiu em uma plataforma capaz de manter o motor de combustão sólida estável verticalmente, permitindo apenas dois graus de liberdade para movimentos verticais e rotacionais. O motor é posicionado verticalmente em uma célula de carga que é capaz de medir a força exercida nela, e, portanto, o impulso do motor. Os dados da célula de carga são interpretados e transportados através de um módulo de aquisição de dados e enviados para um computador.

#### 4.1. Aparato de Teste

O aparato consiste de dois discos de ferro fundido cinzento com diâmetro de 200 mm e espessura de 9,6 mm. Cada disco contém 4 furos passantes distantes 90° entre si pelos quais atravessam barras roscadas de aço carbono de 22 mm, e um furo central onde o motor de combustão é posicionado. Através das 16 porcas, é possível ajustar a altura de cada um dos discos. O aparato completo pode ser visto na

Figura 4.



Figura 4. Aparato de teste.

#### 4.2. Motor de Combustão

O motor de combustão utilizado teve como objetivo principal ser reutilizável e modular. Para isto, é necessário que todas as suas partes internas sejam acessíveis por algum tipo de instrumento para limpeza e manutenção adequada.

O motor foi fabricado em três partes: Câmara de combustão, bocal e anteparo. Tanto o anteparo quanto o bocal são fixados na câmara de combustão através de parafusos, e, portanto, quaisquer componentes com a furação adequada poderiam também ser conectados na câmara. Todos os componentes do material foram fabricados de aço inoxidável AISI 304.

A câmara de combustão foi projetada com um comprimento total de 200 mm, e recebeu 3 furos passantes espaçados  $120^\circ$  para encaixe do bocal, e 4 furos espaçados  $90^\circ$  cada para encaixe do anteparo.

O bocal é fixado por três parafusos M4 espaçados  $120^\circ$  entre si. A vedação entre a câmara e o elemento ocorre por dois canais com o-ring. Este possui um meio o ângulo convergente de  $30^\circ$ , e um divergente de  $12^\circ$ , e com diâmetro crítico de 9 mm. Este diâmetro proporciona uma redução da área da câmara para o bocal de 8,5 vezes. O anteparo foi construído de forma similar ao bocal, porém com canal único de o-ring. Além disso, é fixado por quatro parafusos. O bocal e anteparo podem ser vistos na **Error! Reference source not found.**



Figura 5. Bocal CD e Anteparo.

#### 4.3. Combustível Sólido

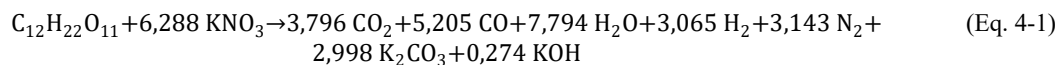
O combustível foi composto de 65% Nitrato de Potássio ( $\text{KNO}_3$ ), fornecido pela Asher (99,9% de pureza) e 35% de Sacarose ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), obtido a partir de açúcar comum, esse composto químico recebe o nome de KNSU. Ambos os componentes tinham granulometria ultra-fina. Para garantir a precisão entre a proporção dos componentes, foi utilizada uma balança industrial para todas as pesagens.

Ambos os componentes misturados em um misturador de bambolê para garantir uma mistura homogênea e cozinhados em imersão de água em uma panela. O processo, tanto por segurança quanto por praticidade, só permitiu uma preparação e no máximo 100 gramas de matéria prima por vez.

A mistura foi mantida aquecida até que o açúcar completasse a caramelização e houvesse total homogeneização com o nitrato de potássio, momento no qual ele era despejado diretamente na câmara de combustão. Este processo é conhecido como *case bonding*.

#### 4.3.1. Reação Química e Propriedades Ideais

A reação do combustível e do oxidante é representada na Equação 4-1 a seguir (O. S. Olaoye, 2014), e os compostos são descritos na Tabela 3. Finalmente, suas principais propriedades estão descritas na Tabela 4:



**Tabela 3. Estado físico e nome dos produtos envolvidos na reação (Nakka, 2017).**

| Composto                                  | Estado  | Nome                  |
|-------------------------------------------|---------|-----------------------|
| $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ | Sólido  | Sacarose              |
| $\text{KNO}_3$                            | Sólido  | Nitrato de Potássio   |
| $\text{CO}_2$                             | Gás     | Dióxido de Carbono    |
| $\text{CO}$                               | Gás     | Monóxido de Carbono   |
| $\text{H}_2\text{O}$                      | Gás     | Água                  |
| $\text{H}_2$                              | Gás     | Hidrogênio            |
| $\text{N}_2$                              | Gás     | Nitrogênio            |
| $\text{K}_2\text{CO}_3$                   | Líquido | Carbonato de potássio |
| $\text{KOH}$                              | Gás     | Hidróxido de Potássio |

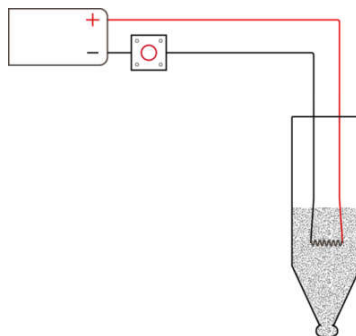
**Tabela 4. Principais propriedades do KNSU.**

| Ref.     | Parâmetro                             | Valor                  |
|----------|---------------------------------------|------------------------|
| d        | Densidade                             | 1,89 g/cm <sup>3</sup> |
| $I_{sp}$ | Impulso específico Ideal              | 166 s                  |
| r        | Taxa de queima linear em 1000 psi     | 15,29                  |
| $T_o$    | Temperatura na Combustão em 1000 psi  | 1200 °C                |
| $T_{cr}$ | Temperatura de Auto-ignição           | > 300 °C               |
| M        | Massa Molar dos produtos da combustão | 42 g/mol               |
| k        | Razão dos calores específicos         | 1,133                  |

#### 4.4. Sistema de Ignição

O sistema de ignição foi construído a partir de um pequeno recipiente preenchido de pólvora, com dois fios elétricos conectados por um filamento de tungstênio dentro do mesmo. O cabo é conectado a uma bateria 9V e uma botoeira normalmente aberta, e é ilustrado na Figura 6.

Assim que o botão é pressionado, o sistema era fechado, e o filamento de tungstênio aquecia rapidamente, iniciando a ignição da pólvora dentro do recipiente, que por sua vez inicia a combustão do propelente no motor. Esse sistema permite que a ignição seja iniciada a uma distância segura do motor, reduzindo os riscos envolvidos.



**Figura 6. Sistema de ignição**

#### 4.5. Aquisição de Dados

A célula de carga utilizada foi o modelo MS-200 fabricada pela Excel Sensor. Esta é capaz de medir cargas em tração e compressão, tem uma carga máxima de 200 Kg, com até 10.000 divisões em sua medição. O ganho de tensão na saída é de  $2 \pm 0,002$  mV/V de excitação.

A voltagem de excitação recomendada pelo fabricante é de 6 a 10 volts de corrente contínua, para garantir a alimentação adequada é utilizado uma fonte de corrente contínua Minipa mpl-1303 Power Line II. A voltagem utilizada é a de 10 Vcc, fornecendo um sinal de saída de  $20 \pm 0,002$  mV.

Para a leitura da voltagem da célula de carga, é utilizado o módulo de aquisição de dados USB-6009 fabricado pela National Instruments. Este, tem uma precisão de leitura de 1,53 mV que é adequada para a leitura do sinal da célula de carga.

A aquisição de dados é feita através do software LabView com uma frequência de leitura de 1000 Hz. Com aplicação posterior filtro de média móvel de 50 Hz para redução de ruído nos dados.

#### 4.5.1. Calibração

Diversos experimentos com massas conhecidas foram executados para encontrar o fator de calibração e tara adequados. Como a condição de operação da célula de carga era exclusivamente sob compressão, ela foi testada apenas nessa condição.

Como o impulso do motor de foguete tem uma duração pequena, cada teste permitiu a um décimo de segundo para estabilização da carga. Os melhores resultados se deram com um fator de calibração de 9000, e um fator de tara de 3,5 kgf. Os resultados obtidos por esta calibração podem ser vistos Figura 7.

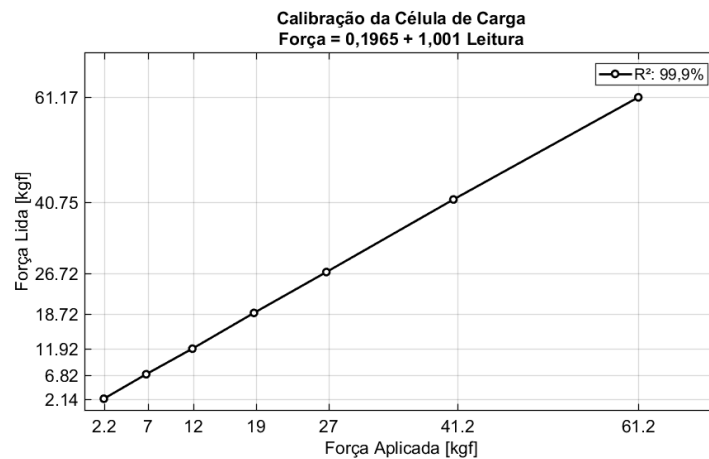


Figura 7. Calibração da célula de carga.

#### 4.6. Procedimento dos testes

O aparato de teste completo, no local do teste, pode ser visto na Figura 8. Os testes foram executados a céu aberto, em uma localização que garantia distância segura de pessoas. Todos os testes foram executados utilizando luvas resistentes à temperatura e óculos de proteção.



Figura 8. Aparato de teste montado

## 5. RESULTADOS

O período de combustão foi definido como o momento em que a força na célula de carga excede 1 Newton, até o momento em que a força fica abaixo deste mesmo valor. Como a aquisição dos dados foi de 1 Hz, 0,1 segundos no gráfico da Figura 9 representam 100 leituras da célula de carga.

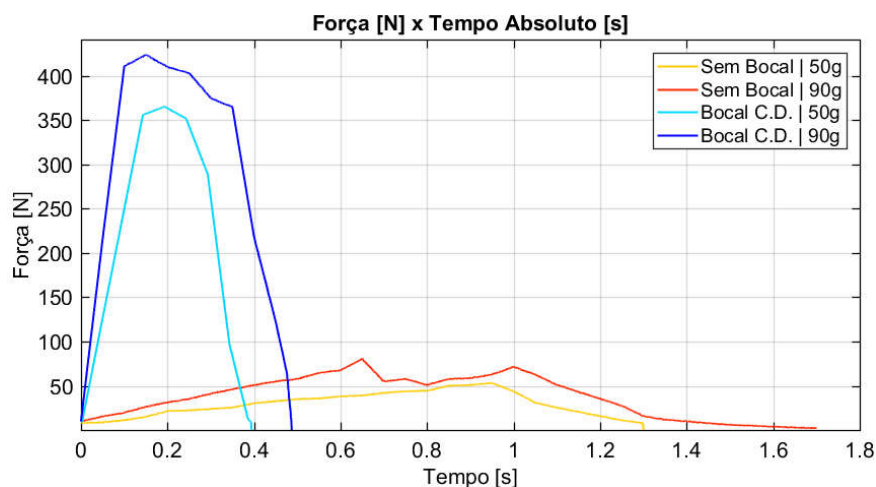


Figura 9. Curvas da força gerada por tempo durante a combustão.

Pelas curvas, é possível analisar que configurações de motor sem bocal (redução de 0 vezes) não foram capazes de atingir estado estacionário de pressão interna e força exercida. Isso faz sentido, pois a grande área da câmara permite uma queda de pressão muito elevada. Já as configurações com bocal apresentaram curvas similares, porém a com maior quantidade de combustível apresentou um estado estacionário de maior duração.

### 5.1. Força Máxima ( $F_{max}$ )

A força máxima considerada é o maior valor obtido durante o teste, enquanto a força média é a média da força obtida durante o tempo da combustão. A influência das configurações do motor nesses fatores pode ser vista em gráficos de intervalo na Figura 10.

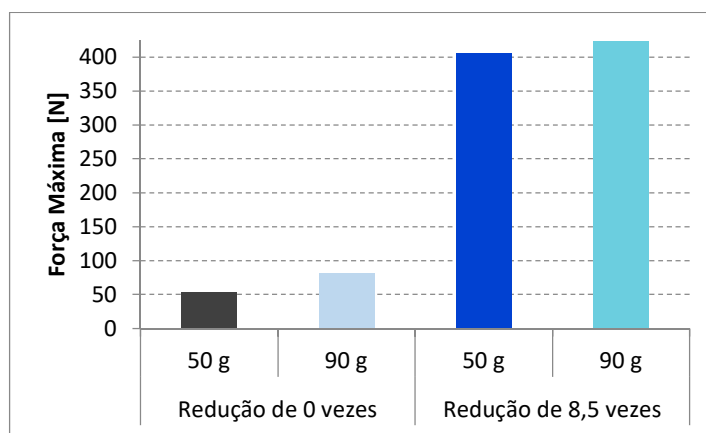


Figura 10. Gráfico de intervalos das configurações estudadas pela força máxima obtida.

Conforme esperado, a utilização do bocal teve uma influência de, no mínimo, duplicar as forças obtidas, se comparado às configurações sem bocal. A teoria prediz que as geometrias com bocal apresentariam uma maior pressão interna, e, portanto uma maior força.

Um aumento na massa de combustível não causou grandes mudanças em ambas as forças para geometrias sem bocal. Nas configurações que utilizavam bocal, é possível ver claramente que a força média aumentou em quase 50% enquanto a força máxima não apresentou grandes alterações. Uma maior quantidade de combustível prolonga o tempo de combustão, e, portanto, a duração da combustão em estado estacionário.



## 5.2. Tempo de Queima ( $t$ )

O tempo de queima foi definido como a duração total da combustão do motor. Os efeitos da influência das configurações do motor no tempo de queima podem ser vistos no gráfico de intervalo na Figura 11.

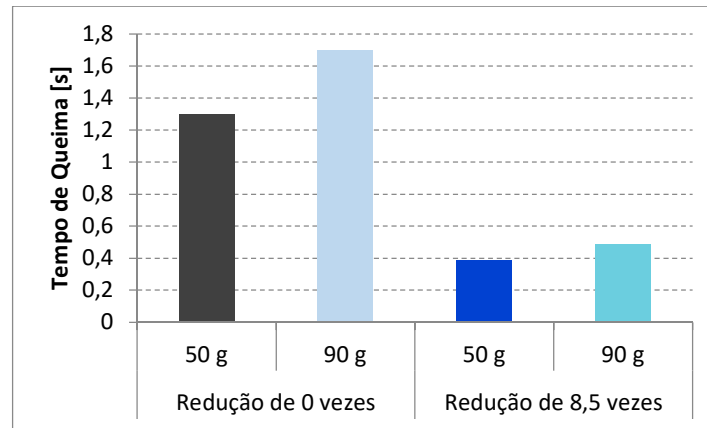


Figura 11. Gráfico de intervalos das configurações estudadas pelo tempo de queima obtido.

A utilização do bocal reduziu consideravelmente o tempo de combustão, quando comparado às configurações sem bocal, um resultado das maiores pressões encontradas.

Uma maior quantidade de combustível aumentou o tempo de combustão, visto que quanto mais combustível, maior o tempo para a combustão do mesmo.

## 5.3. Impulso Total ( $I_T$ )

A utilização do bocal aumentou o impulso total obtido consideravelmente, como mostra a Figura 12. Uma consequência das maiores pressões internas obtidas.

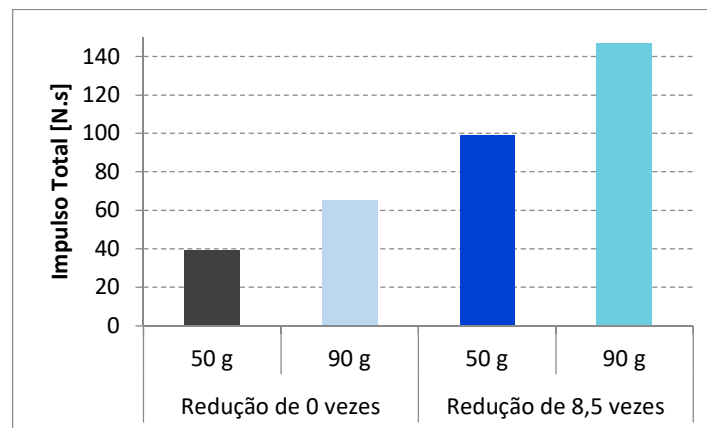


Figura 12. Gráfico de intervalos das configurações estudadas pelo impulso total obtido.

Finalmente, uma maior quantidade de combustível influenciou positivamente no impulso total gerado, devido a uma maior duração do tempo de queima, é plausível que o impulso também aumente, visto a dependência deste com o tempo.

## 6. CONCLUSÕES

Dentre as configurações de motores estudados, demonstrou-se que o fator que mais contribuiu para a performance do motor foi o bocal CD com redução de área de 8,5 vezes, pois para uma mesma quantidade de combustível pode-se notar um aumento expressivo na força máxima e no impulso gerados. Além disso, demonstra-se a construção de um aparato de teste que permite a execução de testes estáticos para a determinação curvas de desempenho para diferentes configurações de motores. O aparelho é detalhado de forma que possa ser construído por qualquer pessoa com disponibilidade e recursos para tal.

A revisão bibliográfica apresentou modelos teóricos descrevendo a combustão de foguetes, porém esses não puderam ser aplicados devido à natureza do fenômeno da combustão em pequena escala (minifoguete) ter uma duração curta e de regime transiente, não foi possível fazer uma comparação precisa entre dados teóricos e os resultados experimentais.

Como sugestão para estudos futuros, os autores recomendam que um sistema de fixação diferente seja utilizado, como por exemplo, uma rosca externa no bocal para reduzir as vibrações envolvidas de um sistema de fixação por parafusos.

## 7. REFERÊNCIAS

- Incropera, Frank P. e David, P. DeWitt. 2013. Introduction to Heat Transfer. 6º ed. Wiley. Hoboken, NJ.
- ESTES Rocket Lab. 2008. Model Rocket Engines.
- Nakka, Richard. 2017. KN-Sucrose (KNSU) Propellant Chemistry and Performance Characteristics. Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site. Disponível em: <<https://www.nakka-rocketry.net/succhem.html>>. Acesso em: 01 de Julho de 2017.
- NAR. National Association of Rocketry. Disponível em: <<http://www.nar.org/>>. Acesso em: 16 de Junho de 2017.
- O. S. Olaoye, O. A. Abdulhafeez. 2014. Design and Performance Characteristics of a Rocket. Vol. 3. Ogbomoso, Nigeria. ISSN (Online): 2319-7064.
- Rogers, Lucy. 2008. It's ONLY Rocket Science: An Introduction in Plain English: Springer Science. Isle of Wight, UK. ISBN: 978-0-387-7-75377-5.
- Sutton, George P. e Biblarz, Oscar. 2010. Rocket Propulsion Elements. 8th: John Wiley & Sons, INC. Hoboken, New Jersey.
- White, Frank M. 2011. Mecânica dos Fluidos. 6º ed. AMGH Editora Ltda. Porto Alegre:

## 8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# The Influence of the Use of Convergent-Divergent Nozzles on the Impulse Generated by Solid Combustion Engines for Minifoguets

Alexandre Lima, [alexandre.silva.lima@cefet-rj.br](mailto:alexandre.silva.lima@cefet-rj.br)<sup>1</sup>

Josmar Cristello, [Josmarbcristello@gmail.com](mailto:Josmarbcristello@gmail.com)<sup>1</sup>

Rafael Mendes, [rafmendes@globo.com](mailto:rafmendes@globo.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Depto. Eng. Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil

**Abstract.** *This article presents a comparison between the results of static tests of different configurations of solid combustion motors for model rockets in order to determine the impact that the use of convergent-divergent nozzles (CD) has on the generated impulse. For the accomplishment of the experiments, a test apparatus was proposed, designed and constructed. In this apparatus, four engine configurations were tested with the presence or absence of a divergent convergent nozzle, and two fuel levels: 50 and 90 grams. The fuel used in all cases was the KNSU, a solid propellant composed of 65% by weight of potassium nitrate and 35% of sucrose. By analyzing the results, we can see how significant the impact the presence of a convergent-divergent nozzle has on the performance of the engine. In addition to the total impulse generated, the maximum force and the combustion time are also analyzed.*

**Keywords:** *Impulse, Space modeling, Convergent-divergent nozzle*