



QUAL PRESSÃO DE CÂMARA É ESCOLHIDA PARA MOTORES-FOGUETE EXPERIMENTAIS?

Diego Fernando Moro^a

[a] Universidade Positivo, Curitiba, Paraná, Brasil

Resumo: Ao aumentar a pressão de trabalho de um motor-foguete experimental o impulso total cresce, mas aumenta-se a massa estrutural para resistir a esta solicitação. O contrário, redução na pressão de trabalho, irá reduzir o impulso total mas deixará a estrutura mais leve. Há de forma instintiva, dependendo das funções que representam estes fenômenos, um ponto ótimo de funcionamento. O objetivo do trabalho é analisar este valor ótimo de impulso total versus massa total de um motor-foguete experimental. A metodologia utilizada se baseia em equações polinomiais ajustadas para as propriedades termodinâmicas dos gases da combustão do propelente: nitrato de potássio e açúcar, uma função objetivo relacionando impulso total e massa total foi criada, utilizou-se um modelo simplificado para a estrutura do motor-foguete. Foi analisado os motores-foguete: Netuno-R Beta do grupo de foguetes Carl Sagan da UFPR, o foguete de treinamento básico da Avibras, o foguete de sondagem Sonda II do IAE e o motor-foguete S31 (primeiro estágio do foguete VSB-30) da Avibras. Os resultados mostram que quanto maior for a tensão máxima admissível do material maior será a função objetivo, e a máxima fração de propelente obtida foi de 86%, neste caso a função objetivo foi 1,28 N.s/g.

Palavras-chave: Motor-foguete experimental, pressão ótima, impulso total, fração de propelente.

1. INTRODUÇÃO

Um motor-foguete tem por objetivo a geração de gases a altas velocidades de modo a impulsionar um foguete. Estes gases são geralmente provenientes da queima de um propelente, o qual possui parte oxidante e parte combustível, propelente este que pode ser líquido, sólido ou até híbrido (parte sólida e parte fluido) (Sutton, 1992).

Especificamente em motores-foguete a propelente sólido, há diversos tipos de propelente, cuja diferença está na relação de condensado gerada, velocidade de queima e demais características da queima.

Em aplicações de motores-foguete amadores, ou seja, com propelente e características construtivas de baixo custo e facilidade de manuseio um tipo de propelente se destaca: o KNSu, composto por Nitrato de Potássio (KNO_3) e Açúcar (geralmente referido como sucrose).

O projeto de um motor-foguete depende de características do propelente e grão-propelente utilizados e estas características influenciarão no tipo de material e forma de fixação utilizados para conter a pressão interna e a temperatura geradas.

Há diversas formas de projeto, mas especificamente para motores-foguete amadores com propelente a base de nitrato de potássio utilizados em minifoguetes experimentais, a literatura possui um autor amplamente conhecido pelo seu WebSite, iniciado com seu trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica (Nakka, 1984).

Geralmente esta pressão é admitida inicialmente e todas as demais características construtivas dependem dela, como por exemplo a espessura da parede do motor-foguete, o que irá representar a massa estrutural do motor-foguete.

Embora simples, uma análise de otimização de quanto o motor-foguete poderá gerar de impulso total naquela pressão versus massa estrutural pode fornecer uma pressão ótima de operação, na qual um determinado motor-

foguete experimental poderá fornecer o maior impulso total com a menor massa estrutural possível. Este tipo de análise pode também fornecer subsídios para explicar o motivo pelo qual a maioria dos motores-foguete amadores brasileiros (Marchi, 2017) não alcança apogeu condizente com o impulso total embarcado. Poderá também permitir uma otimização nos seus motores-foguete experimentais tornando-os mais otimizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem várias referências para projeto estrutural e dinâmico de motores-foguete, pode-se citar o livro de Sutton (1992) como referência. O autor propõe uma metodologia de projeto cujos passos são dependentes de todos os requerimentos do motor-foguete.

Apesar de ser um livro referência na área de propulsão, infelizmente Sutton (1992) não analisa qual seria uma pressão adequada do motor-foguete de propelente sólido de forma a otimizar a massa inerte ou estrutural dependendo das dimensões do motor.

Pesquisando na versão mais recente da obra (Sutton e Biblarz, 2017), o próprio autor cita que cada aplicação apresentará diferentes requisitos, ilustrando com um exemplo no qual a pressão da câmara foi fixada em 1000 psi. Desta forma, ao autor fixar uma pressão no exemplo, há a possibilidade de que este trabalho possa mostrar que uma simples função objetivo poderia auxiliar projetistas de motores-foguete experimentais a otimizar seu projeto.

Há autores que propõem forma de otimização multidisciplinar como no trabalho de Roshanian e Keshavarz (2006), onde o autor otimizou o desempenho de um foguete de sondagem em função de três áreas: trajetória, propulsão e aerodinâmica, isto utilizando o método de superfície de resposta. No final do estudo, o autor obteve um aumento na altitude de 25%.

Para motores-foguete experimentais, a especificação da pressão é um parâmetro de entrada no projeto de um motor-foguete e não um resultado, o que não otimiza a estrutura do motor-foguete em função do objetivo deste, que é gerar impulso total. Ribeiro (2013) especifica em seu motor-foguete experimental a pressão de 4 MPa.

Já no trabalho de Galvão (2018), a especificação de um tubo de aço 1040 é dada e seleciona-se de forma aleatória 9 MPa como pressão máxima de operação. De forma semelhante não há explicação clara da pressão selecionada nos motores-foguete experimentais do autor referência mais utilizado para este tipo de motor-foguete (Nakka, 1984).

3. METODOLOGIA

O autor deste trabalho obteve via versão Windows do aplicativo CProPEP (Gordon e McBride, 1994) e uso de tabelas de calores específicos da Jannaf (Chase *et al.*, 2013), polinômios em base logarítmica ajustados para algumas propriedades termodinâmicas dos produtos da combustão do propelente KNSu:

- R constante do gás (admitindo gás perfeito);
- k razão de calores específicos ajustado para escoamento bifásico (Nakka, 1997) e
- T_0 temperatura adiabática de chama.

O aplicativo utilizado para ajustar os polinômios foi o *OriginPro 8*.

A justificativa para não utilizar o aplicativo CEA da NASA, o qual possui até versão online (Snyder, 2019), é que como ambos fazem os cálculos de equilíbrio químico; para o autor, o CPropPEP permite facilidade na utilização principalmente para a obtenção direta das propriedades termodinâmicas e a armazenagem em arquivos os quais podem ser usados posteriormente, ou seja, a facilidade de seu uso aliado a programação.

3.1 Polinômios ajustados

A obtenção de expressões polinomiais para as propriedades termodinâmicas permite seu uso em outros softwares: de projeto e análise experimental de motores-foguete programados pelo autor (Moro, 2019). A consulta ponto a ponto das propriedades termodinâmicas dos produtos da combustão do propelente tornaria seu uso muito limitado ou de grande demora.

Polinômios estes ajustados para o propelente KNSu na proporção 65% nitrato de potássio e 35% de sacarose desde pressão de 0,01 Bar a 11.000 Bar (Moro, 2015).

Tais polinômios de grau 9 são representativos em relação ao resultados obtidos: o coeficiente de determinação é muito próximo da unidade, no pior caso $r^2 = 0,99992$.

Os polinômios ajustados de R , k e T_0 seguem a forma da Eq. (1) e a Tab. 1 fornece os parâmetros ajustados da mesma equação.

Tabela 1. Coeficientes ajustados de R , k e T_0 .

A_i	R	k	T_0
A_0	$3,93261975545070 \times 10^2$	$-1,37888992619268 \times 10^4$	$3,09510840624045 \times 10^0$
A_1	$-2,78261444164441 \times 10^2$	$2,63269770368983 \times 10^4$	$-3,47788297095420 \times 10^0$
A_2	$2,21731823032611 \times 10^2$	$-2,03742329478610 \times 10^4$	$2,68589018179646 \times 10^0$
A_3	$-1,00207260435184 \times 10^2$	$9,02448771642549 \times 10^3$	$-1,19233536051624 \times 10^0$
A_4	$2,74321375819001 \times 10^1$	$-2,50843498438118 \times 10^3$	$3,33445002556658 \times 10^{-1}$
A_5	$-4,67641633470184 \times 10^0$	$4,53324034236469 \times 10^2$	$-6,08847172457605 \times 10^{-2}$
A_6	$4,86891326745650 \times 10^{-1}$	$-5,31925781292568 \times 10^1$	$7,25433618821334 \times 10^{-3}$
A_7	$-2,87651336070012 \times 10^{-2}$	$3,90421818333940 \times 10^0$	$-5,43620288790910 \times 10^{-4}$
A_8	$8,00061878913493 \times 10^{-4}$	$-1,62672493431325 \times 10^{-1}$	$2,32502840539917 \times 10^{-5}$
A_9	$-5,32904201135432 \times 10^{-6}$	$2,93507026655967 \times 10^{-3}$	$-4,32683123306007 \times 10^{-7}$

Fonte: Moro (2015).

$$\phi = \sum_{i=0}^9 A_i \times \alpha^i \quad (1)$$

onde: ϕ pode ser R , k ou T_0 . A_i são os coeficientes do ajuste, cujos valores estão na Tab. 1, e $\alpha = \log_{10} p_0$, onde p_0 é a pressão de estagnação.

A equação da velocidade de ejeção (Sutton, 1992) para escoamento de expansão ótima é dada pela Eq. (2), a qual é válida para escoamento quase unidimensional compressível.

$$v_e = \sqrt{2 \times T_0 \times R \times \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2)$$

onde: p_e é a pressão externa ao motor-foguete.

A partir dos polinômios anteriormente ajustados (Moro, 2015) pode-se também obter um ajuste para a velocidade de ejeção considerando $p_e = 10^5 Pa = 1 Bar$ ou que $\alpha = 5$ na Eq. 2, a figura com o ajuste obtido é dada pela Fig. 1.

Os projetos de motores-foguete se assemelham muito a projetos de vasos de pressão, ou também chamados tanques pressurizados, pois possuem espessura de parede reduzida em função do diâmetro, portanto um projeto de tanque pressurizado pode ser utilizado para representar um motor-foguete.

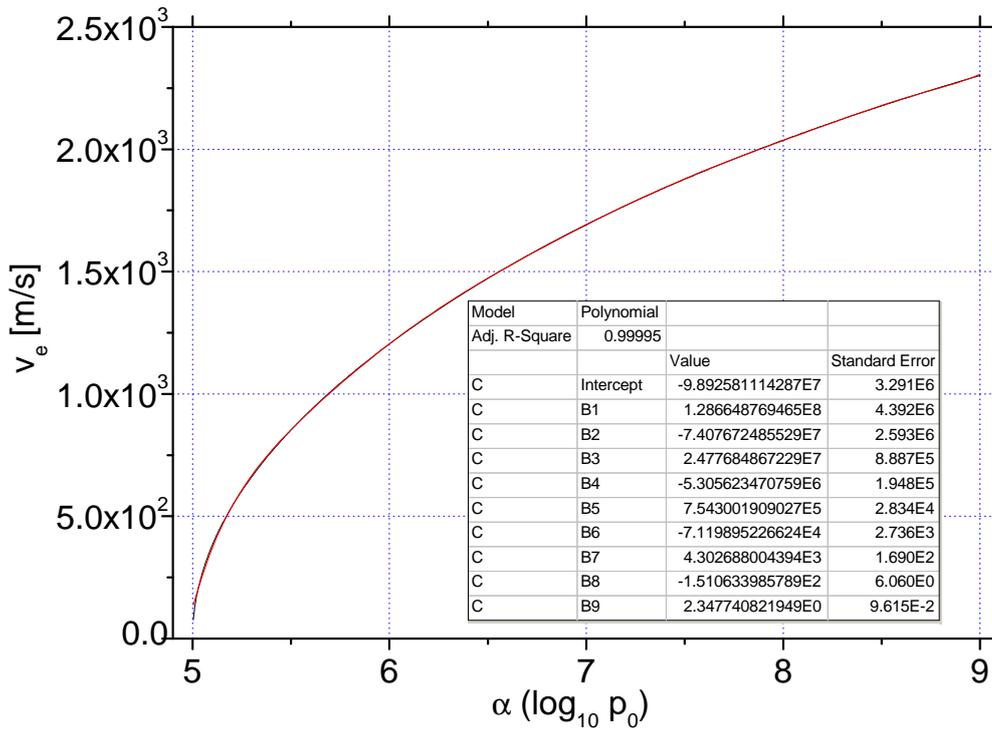
3.2 Dimensionamento de tanques pressurizados

Segundo critérios de projeto de tanques pressurizados para aplicação de sistemas espaciais (Huzel e Huang, 1992) como visto no trabalho de Foltran (2019), é recomendado, no caso de motores-foguete experimentais o cálculo da tensão máxima admissível (σ_{max}) pela equação: $\sigma_{max} = \min\left(\frac{\sigma_{esc}}{1,25}; \frac{\sigma_{res}}{1,5}\right)$, pois representa a situação onde há risco a pessoas ou a equipamentos vitais.

Considerando o invólucro como sendo cilíndrico a espessura do vaso de pressão é dada pela Eq. (3).

$$e = \frac{p_0 \times D_{int}}{2 \times \sigma_{max} \times \eta_{solda}} \quad (3)$$

Figura 1. Comportamento do ajuste do polinômio de 9 grau para v_e .



Fonte: O autor.

onde: e é a espessura do tubo, p_0 é a pressão de câmara do motor-foguete, D_{int} é o diâmetro interno do tubo utilizado, η_{solda} é a eficiência da solda do envelope (considerado 100% neste trabalho, o que significa tubo sem costura).

A forma de queima do motor-foguete está relacionada com as superfícies de queima em cada instante de funcionamento, a geometria a qual fornece uma certa área de queima de um motor-foguete é chamada grão-propelente.

3.3 Grão-propelente tubular

Segundo Sutton (1992) dependendo do tipo de grão-propelente, haverá diferentes tipos de curvas de empuxo. Em motores-foguete experimentais é comum encontrar grãos-propelente tipo tubular, Bates (vários grãos tubulares em um mesmo motor) ou ainda tipo tronco de cone, tudo dependendo da facilidade de fabricação ou intuito de queima neutra. Neste trabalho foi escolhido projetar a forma mais simples de fabricação do grão-propelente, que é o grão-propelente tubular.

A massa de um grão-propelente tubular é dada pela equação:

$$m_p = \rho_p \frac{\pi}{4} [D_{int}^2 - D_a^2] \times L \quad (4)$$

onde: ρ_p é a massa específica do propelente no estado carregado, D_a é o diâmetro da alma do grão-propelente (tipicamente chamado do diâmetro oco dentro do grão-propelente) e L é o comprimento do grão-propelente

3.4 Impulso total do motor-foguete

O impulso total de um motor-foguete representa não apenas a classe daquele motor, como é uma medida indireta do desempenho que este irá apresentar: quanto maior o impulso total de um motor com massa fixa, maior será seu apogeu. Sua obtenção é dada pela integral da força de empuxo ao longo do tempo:

$$I_t = \int_0^{t_q} F dt \quad (5)$$

onde t_q é o tempo de queima do motor-foguete e F é a força de empuxo gerada, geralmente medida em células de carga. Mas é possível obter uma outra equação para o impulso total, dependente da massa de propelente e da velocidade de ejeção efetiva média do motor-foguete:

$$I_t = [I_t/m_p] \times m_p = v_e \times m_p \quad (6)$$

Assim pode-se obter uma equação que envolve o impulso total do motor-foguete em função da velocidade de ejeção (que depende da pressão) e a massa de propelente que depende do diâmetro interno do motor.

3.5 Massa estrutural do motor-foguete

A massa estrutural do motor-foguete vai depender do material utilizado em sua confecção, espessura do tubo-motor, forma de fixação da tubeira e tampa, e também a massa da tampa e tubeira em si.

Neste trabalho será considerado que toda a massa estrutural do motor-foguete é composta do tubo-motor multiplicado por um coeficiente Y para considerar a existência da tampa e da tubeira, conforme a equação:

$$m_{motor} = \rho_{mat} \frac{\pi}{4} \left[(D_{int} + 2 \times e)^2 - D_{int}^2 \right] \times L \times Y \quad (7)$$

onde: ρ_{mat} é a massa específica do material do tubo-motor, Y é o parâmetro percentual que considera a existência da tampa e tubeira, neste trabalho foi utilizado $Y = 200\%$.

3.6 Função objetivo

Ao aumentar a pressão de trabalho do motor-foguete, isto irá aumentar a espessura da parede para resistir a esta nova pressão [Eq. (3)], o que reflete em um motor-foguete mais pesado [Eq. (7)] mas isto também irá aumentar a velocidade de ejeção [Eq. (2)] o que reflete em um aumento no impulso total do motor-foguete [Eq. (6)]. Pode ser obtido então uma equação objetivo para maximizar o impulso total e minimizando a massa total do motor-foguete na forma:

$$F_{obj} = \frac{I_t}{m_{total}} = \frac{v_e m_p}{m_p + m_{motor}} = \frac{v_e}{1 + \frac{m_{motor}}{m_p}} \quad (8)$$

onde F_{obj} é a função objetivo que deverá ser maximizada e sua unidade é m/s , mesma unidade da velocidade de ejeção, mas será usada neste trabalho a unidade $N.s/g$, principalmente para evitar confusões com variáveis.

Será portanto substituído na Eq. (8), o impulso total da Eq. (6), a velocidade de ejeção será substituída pela equação ajustada Eq. (1) da Tabela correspondente, a massa de propelente será substituída pela Eq. (4) e a massa do motor será substituída pela Eq. (7) na qual a espessura do motor será substituída pela Eq. (3).

É possível analisar na Eq. (8) que esta não será função do comprimento do motor: isto ocorre porque na razão $\frac{m_{motor}}{m_p}$ dadas pelas Eqs. (7) e (4), como há comprimento em ambas as equações, esta variável é cancelada.

3.7 Algoritmo para obtenção da espessura ótima/pressão ótima de operação

Para facilitar a compreensão, ser didático e permitir que a metodologia proposta neste artigo possa ser utilizada pela maior quantidade possível de equipes de foguetes do Brasil, é apresentado o algoritmo para obter a pressão ótima de operação, a qual maximiza a função objetivo da Eq. (8):

1. O usuário precisa especificar o diâmetro interno da tubulação D_{int} , Material do tubo (obtendo assim σ_{max} e ρ_{mat})
2. A equação ajustada para v_e é válida apenas para KNSu na proporção 65/35, portanto o usuário necessita entrar com a massa específica do KNSu ρ_p e parâmetros de projeto do grão-propelente D_a e L
3. Agora, o usuário da metodologia precisa calcular o máximo da função objetivo via métodos de resolução numérica. Neste trabalho foi obtido a derivada da função objetivo e a equação foi resolvida com o aplicativo (*Waterloo Maple 7*), foi optado também por mudar a variável de pressão p_0 para α de forma que a resolução foi mais rápida.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados de alguns motores-foguete ou até foguetes no tocante a espessura ótima de parede e seus resultados.

4.1 Motor-foguete Netuno-R β

O autor faz parte também do grupo de foguetes Carl Sagan da UFPR e um motor-foguete experimental que é utilizado no grupo desde 2016 é o Netuno-Reduzido Beta ou abreviando Netuno-R β (GFCS, 2005; Foltran, 2019).

A Fig. 2 mostra o Minifoguete Netuno-R β /Paraná-VIIIb na rampa de lançamento, este minifoguete utiliza um motor-foguete Netuno-R β , na média de 4 altímetros este minifoguete alcançou apogeu de 804 m em seu lançamento.

Figura 2. Minifoguete Netuno-R β /Paraná-VIIIb na rampa de lançamento.



Fonte: Marchi (2013).

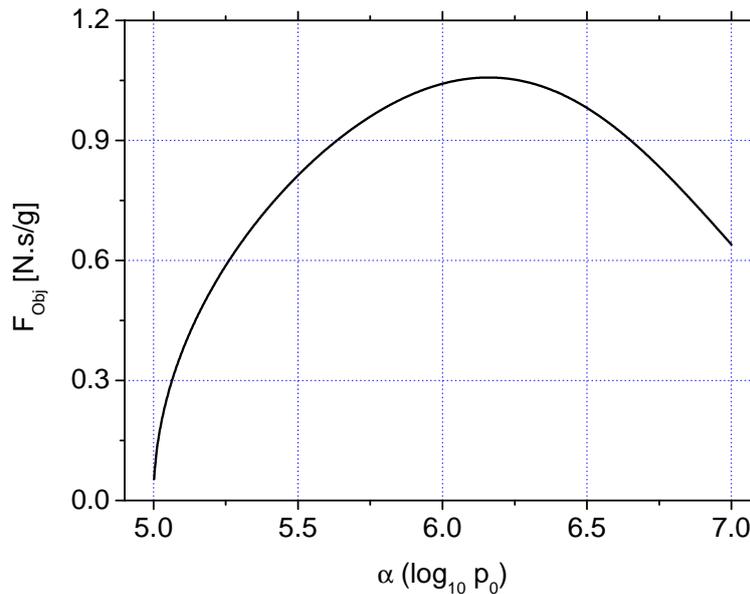
Este motor possui diâmetro interno de 1.1/2" ou 38,1 mm e é usinado na liga de alumínio 6063-T5 ($\sigma_{esc} = 105$ MPa, $\sigma_{res} = 145$ MPa e $\rho_{mat} = 2600$ kg/m³) a fixação de tampa e tubeira é feita com rosca 1.9/16" 20 UN.

Este motor possui comprimento útil de propelente aproximado de 150 mm, o diâmetro da alma é próximo de 25 mm e o propelente é KNSu prensado a frio de massa específica 1400 kg/m³.

É analisado para estes dados qual seria a pressão de trabalho ótima e espessura de parede ótima. Primeiro como varia a função objetivo com a variação da pressão, ou α como usado neste trabalho, portanto é gerado a Fig. 3 na qual percebe-se que há um valor máximo da função objetivo em relação a α , tal ponto é obtido derivando a função objetivo e igualando-a a zero. Resolvendo obtêm-se os resultados da Tab. 2 para o motor-foguete Netuno-R β Ótimo.

Analisa-se que no caso do motor-foguete Netuno-R β Ótimo a fração de propelente, ou seja, a variável m_p/m_{total} é 81,6%, ou seja apenas 19,4% da massa embarcada é massa estrutural do motor-foguete. A espessura de parede obtida neste caso é de 0,327 mm, o que pode por questões construtivas ser inviável, isto pois os tubos comerciais são vendidos em espessuras de até 1 mm, e no caso do diâmetro interno deste motor a espessura comercial mínima encontrada foi de 1,5 mm, seria necessário portanto uma processo de usinagem

Figura 3. Variação da função F_{obj} com α .



Fonte: O autor.

para reduzir ainda mais a espessura do tubo.

Para comparação, a espessura de parede dos motores-foguete Netuno de liga 6063-T5 é de 1/8" ou 3,175 mm, nesta espessura tem-se os resultados da Tab. 2 para o motor-foguete Netuno-R β Original.

Embora a pressão de trabalho obtida seja 140 Bar, experimentalmente esta pressão não é superior a 20 Bar nos motores-foguete reais utilizados pelo Grupo de Foguetes Carl Sagan.

Se fosse implementado a espessura de parede ótima obtida desta abordagem nos motores-foguete Netuno, não seria possível utilizar fixação da tampa e tubeira por rosca, deveria ser utilizado uma fixação por parafusos, pinos ou similar. Alternativamente poderia ser aplicado espessura maior na região próxima da tubeira e tampa, mantendo a fixação original.

A razão entre a massa de propelente embarcada e a massa total do motor-foguete, também chamada de fração de propelente no caso ótimo ficou em 81,6%, percebe-se que haveria um enorme ganho ao utilizar a pressão ótima de trabalho e espessura correspondente neste tipo de motor versus esta razão utilizada nos motores reais (próxima de 29,8%).

De acordo com a equação de Tsiolkovsky quanto maior for o valor da fração de propelente, maior será a variação da velocidade obtida com aquele estágio de foguete, ou seja, maior será o apogeu do minifoguete experimental, ou ainda maior a carga útil que poderá ser levada para um apogeu mais baixo.

Há ainda um outro estudo interessante, por exemplo, se fosse modificado a liga de alumínio utilizada para uma com menor resistência por exemplo a liga 1100 recozida ($\sigma_{esc} = 15$ MPa, $\sigma_{res} = 75$ MPa e $\rho_{mat} = 2600$ kg/m³) ou também uma liga de aço SAE 1020 ($\sigma_{esc} = 350$ MPa, $\sigma_{res} = 420$ MPa e $\rho_{mat} = 7870$ kg/m³), para os mesmos dados anteriores obtêm-se os resultados da Tab. 2 para o motor-foguete Netuno-R β Al. 1100 e Aço 1020.

Analisando os resultados, a pressão ótima reduziu de 14,43 Bar no caso Ótimo com Al. 6063-T5 para 4,43 Bar na liga Al. 1100 recozida. Isto equivale a uma redução de 69,3%, e ainda na comparação da função objetivo o qual apresentava 1,06 N.s/g agora apresenta 0,65 N.s/g isto representa uma redução de 34,9%.

Comparando os resultados entre a liga de Aço 1020 e no caso Ótimo com Al. 6063-T5, nota-se que estes são muito semelhantes, embora exista um leve aumento de 8,4% na pressão de trabalho e aumento de 1,9% na função objetivo utilizando a liga de aço SAE 1020.

Comparando os resultados percebe-se que quanto maior for a resistência mecânica do material utilizado como corpo do motor-foguete maior será a função objetivo, também menor será a espessura do motor e maior

será o impulso total produzido.

4.2 Motor-foguete do Foguete de Treinamento Básico (FTB) da Avibras

Segundo Krebs (2016) o foguete de treinamento Básico da Avibras consiste em um veículo com diâmetro de 5" ou 127 mm e comprimento total de 3,04 m, analisou-se as figuras disponíveis na internet e este foguete possui aproximadamente 1,8 m de comprimento de motor, massa total de 68 kg e carga útil de 5 kg. O motor-foguete utilizado é o mesmo do sistema ASTROS, especificamente do SS-30, este é lançado a partir de um tubo como se fosse um foguete balístico, o foguete em si é mostrado juntamente com o Foguete de Treinamento Intermediário (FTB) na Fig. 4.

Figura 4. Foguete de Treinamento Básico (abaixo) e Foguete de Treinamento Intermediário (acima).



Fonte: AVIBRAS (2019).

Considerando os dados do propelente KNSu e a liga de aço 4340 ($\sigma_{esc} = 470$ MPa, $\sigma_{res} = 745$ MPa (revenido) e $\rho_{mat} = 7872$ kg/m³) como o material utilizado no tubo (mesmo do foguete de sondagem Sonda II o qual será apresentado a seguir). Foi considerado um diâmetro de alma proporcional a 2.13/16" ou 73,03mm, baseado em uma relação de áreas interna e da alma próximas do caso do Sonda II. Para estes dados foi obtido os resultados da Tab. 2 para o foguete FTB com liga de Aço 4340 e a liga 4340 normalizada.

Em ambos os casos a massa total (de propelente e motor) fica similar a 26 kg o que representa pouco menos que metade da massa total do veículo.

Novamente, esta comparação visa apenas analisar pressões, espessuras e impulso total ótimos, até porque não foi obtido neste trabalho a curva de velocidade de ejeção para o propelente realmente utilizado neste motor-foguete.

4.3 Motor-foguete do Foguete de Sondagem Sonda II

Segundo Gouveia (2003) o foguete de sondagem brasileiro Sonda II baseou-se no foguete canadense Black Brant IV. De denominação S-20 (Wade, 2017a) pela Avibras o qual apresenta comprimento de propelente de 3,32 m e diâmetro de 0,3 m, possui massa na decolagem de 360 kg, massa útil de 44 kg e massa de propelente de 229 kg. Um modelo em escala real pode ser visto no Museu Aeroespacial Brasileiro (MAB) localizado em São José dos Campos-SP, mostrado na Fig. 5.

Como referência, o propelente utilizado não é um propelente amador, como o nitrato de potássio e açúcar, mas ou propelente dito compósito (geralmente polibutadieno (HTPB), perclorato de amônio e alumínio) ou

Figura 5. Foguete de sondagem Sonda II no Museu Aeroespacial Brasileiro.



Fonte: O autor.

base dupla (nitroglicerina e nitrocelulose), mas a análise aqui exposta tem o objetivo apenas de comparação.

Considerando portanto os dados do propelente KNSu e a liga de aço 4340 como o material utilizado no tubo (Gouveia, 2003). Foi considerado um diâmetro de alma proporcional a 6.1/2" ou 168,3 mm para igualar a massa embarcada com a massa de propelente conhecida. Para estes dados foram obtidos os resultados da Tab. 2 para o foguete Sonda II com liga de Aço 4340 e a liga 4340 normalizada ($\sigma_{esc} = 862$ MPa, $\sigma_{res} = 1279$ MPa).

Pelos resultados a pressão de operação aumenta em 55 % ao utilizar a liga 4340 normalizada, a espessura reduziu em 15 % e o impulso total aumentou em 7 %.

É analisado, por este exemplo, novamente que quanto maior for a tensão máxima admissível do material menor poderá ser a espessura e maior será o impulso total do motor.

4.4 Motor-foguete S31

O motor-foguete S31 também de propelente compósito do IAE equipa o primeiro estágio do VSB-30 (Wade, 2017b), apresenta comprimento de 3,2 m e diâmetro de 0,56 m, apresenta massa na decolagem de 900 kg e massa de propelente de 616 kg. Um modelo em escala real pode ser visto no Museu Aeroespacial Brasileiro (MAB) localizado em São José dos Campos-SP, mostrado na Fig. 6.

Considerando portanto os dados do propelente KNSu e a liga de aço 4340 como o material utilizado no tubo. Foi considerado um diâmetro de alma proporcional a 14.5/8" ou 371,48 mm, para igualar a massa embarcada com a massa de propelente conhecida. Para estes dados foi obtido os resultados da Tab. 2 para o motor S31 com liga de Aço 4340 e a liga 4340 normalizada.

Novamente percebe-se ganhos semelhantes ao caso do motor-foguete Sonda II e o FTB da Avibras.

Tabela 2. Resultados obtidos de todos os casos analisados no artigo.

Motor/Foguete	Netuno-R β (Ótm. e Orig. com liga Al. 6063-T5)				FTB	
Caso ou Liga	Ótimo	Original	Al. 1100	Aço 1020	Aço 4340	Aço 4340 norm.
α	6,1592	7,146	5,646	6,194	6,337	6,528
p_0 (Bar)	14,43	140	4,43	15,64	21,7	33,7
m_p/m_{total} (%)	81,6	29,8	67,1	81,9	84,0	86,1
e (mm)	0,327	3,175	0,703	0,106	0,37	0,31
m_p (g)	136,3	136,3	136,3	136,3	21,82	21,82
m_{motor} (g)	30,8	321,1	66,9	30,2	4,16	3,52
I_t (N.s)	176,7	238,5	132,1	179,7	30.400	32.400
Classe	H	H	H	H	O	O
I_t/m_{total} (N.s/g)	1,06	0,52	0,65	1,08	1,17	1,28

	Sonda II		S31	
	Aço 4340	Aço 4340 norm.	Aço 4340	Aço 4340 norm.
α	6,343	6,534	6,28	6,465
p_0 (Bar)	22,01	34,2	18,9	29,2
m_p/m_{total} (%)	84,1	86,2	83,2	85,5
e (mm)	0,88	0,75	1,40	1,18
m_p (g)	229,0	229,0	617,9	617,9
m_{motor} (g)	43,4	36,8	124,8	105,1
I_t (N.s)	319.000	341.000	840.000	900.000
Classe	R	S	T	T
I_t/m_{total} (N.s/g)	1,17	1,28	1,13	1,24

Fonte: O autor.

5. ANÁLISES E CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado diferentes tipos de motores-foguete e materiais, foi encontrado a espessura ótima para maximizar a função objetivo, que consiste na razão entre o impulso total e a massa de decolagem do foguete.

Foi considerado para todos os casos a aplicação do par propelente: Nitrato de Potássio e Açúcar (KNSu), isto não é verdadeiro a não ser no primeiro caso para o motor Netuno-R β . Embora o uso de diferentes geometrias, materiais e pressões de trabalho propiciou uma análise da função objetivo em comparação a estas variáveis. Obviamente, independente do tipo de motor, quanto maior for a função objetivo melhor será o desempenho do motor. Pode-se concluir:

1. Da forma como a função objetivo foi concebida, esta fica independente do comprimento do motor-foguete, ou seja, a variável não se altera conforme o motor se torna mais curto ou comprido.
2. Os materiais que, independente da geometria, geram o maior valor da função objetivo são em ordem decrescente: liga de aço 4340 normalizado; liga 4340 revenido; liga SAE 1020; liga de alumínio 6063-T5 e liga 1100 recozida, em outras palavras, quanto maior a tensão máxima admissível maior será o valor da função objetivo.
3. Quanto maior a massa de propelente embarcada maior será a função objetivo, no entanto há limites, principalmente em relação a queima erosiva, para o diâmetro mínimo de alma que pode ser utilizado.
4. É proposto uma metodologia simples, de função objetivo, para melhorar o projeto de motores-foguete experimentais, de modo a permitir que grupos de foguetes brasileiros possam melhorar a fração de prope-

Figura 6. Foguete VSB30 no Museu Aeroespacial Brasileiro.



Fonte: O autor.

lente embarcada, desta forma pode-se obter aumento no apogeu, ou ainda, redução na massa embarcada para alcançar um determinado apogeu.

5. Foi obtido frações de propelente de até 67,1% para liga de alumínio 1100; 81,6% para liga 6063-T5, 81,9% para liga SAE 1020; 84% para liga 4340; e 86% para liga 4340 normalizada e função objetivo para o melhor caso (4340 normalizado) de 1,28 N.s/g.

É sugerido para trabalhos futuros uma análise mais acurada considerando propelentes realmente aplicados nos motores-foguete mostrados, ou seja, utilizando as propriedades termodinâmicas dos produtos da combustão destes propelentes reais, uma função objetivo considerando existência real de tubeira e tampa ao invés de um fator de aumento de massa, uma função multi-objetivos juntamente com cálculos de trajetória; todas estas melhorias poderiam ser utilizadas para se aproximar do propelente, motor-foguete, e condições reais de voo respectivamente.

Seria recomendado também comparações com os resultados obtidos e dados estruturais e de desempenho de todos os motores-foguete mostrados, infelizmente por se tratar de informações as quais ou são sigilosas ou de importância estratégica da defesa, isto possivelmente não será viável.

6. REFERÊNCIAS

- AVIBRAS, 2019. “Mísseis e foguetes”. Disponível em: <<https://www.avibras.com.br/site/nossos-produtos-e-servicos/misseis-e-foguetes.html>>. Acesso em: 15 de jul. de 2019.
- Chase, M.W., Davies, C.A., Downey., J.R., Frurip, D.J., McDonald, R.A. e Syverud, A.N., 2013. “Nist janaf thermochemical tables”. *Standard Reference Data Program National Institute of Standards and Technology*.

- Foltran, A.C., 2019. “Revisão de projeto do motor Netuno”. *Relatório do grupo de pesquisa CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes*, pp. 1–5.
- Galvão, M.F.T., 2018. “Projeto estrutural de um motor-foguete acadêmico a combustível sólido”. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica, Natal, RN.
- GFCS, 2005. “Grupo de foguetes Carl Sagan”. Disponível em: <<http://www.foguete.ufpr.br/>>. Acesso em: 15 de jul. de 2019.
- Gordon, S. e McBride, B.J., 1994. “Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications: I. analysis”. *NASA Reference Publication 1311*, pp. 1–61.
- Gouveia, A., 2003. “Esboço histórico da pesquisa espacial no Brasil”. *Relatório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)*, pp. 1–119.
- Huzel, D.K. e Huang, D.H., 1992. *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, Vol. 147. AIAA, Washington, USA.
- Krebs, G.D., 2016. “Foguetes de treinamento básico”. Disponível em: <https://space.skyrocket.de/doc_lau/ftb.htm>. Acesso em: 27 de mar. de 2019.
- Marchi, C.H., 2013. “Blog de divulgação das atividades do grupo de foguetes Carl Sagan da UFPR”. Disponível em: <<http://fogueteufpr.blogspot.com/>>. Acesso em: 15 de jul. de 2019.
- Marchi, C.H., 2017. “Registro de voos de minifoguetes experimentais brasileiros com apogeu maior que 300 metros”. *Registro da Associação Brasileira de Minifoguetes (ABMF, BAR)*, pp. 1–2.
- Moro, D.F., 2015. “Propriedades termodinâmicas do KNSu 65/35 de 0,01 bar a 11 kbar”. *Relatório do grupo de pesquisa CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes*, pp. 1–6.
- Moro, D.F., 2019. “Minicursos ministrados pelo prof. moro durante o festival brasileiro de minifoguetes 2019”. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Festival2019/minicursos/>>. Acesso em: 21 de ago. de 2019.
- Nakka, R.A., 1984. “Solid propellant rocket motor design and testing”. Bachelor of Science in Mechanical Engineering Thesis, University of Manitoba, Manitoba, CA.
- Nakka, R.A., 1997. “Richard Nakka’s Experimental Rocketry Web Site”. Disponível em: <<https://nakka-rocketry.net>>. Acesso em: 19 de mar. de 2019.
- Ribeiro, M.V.F., 2013. *Metodologia de projeto e validação de motores-foguete a propelente sólido*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Roshanian, J. e Keshavarz, Z., 2006. “Multidisciplinary design optimization applied to a sounding rocket”. *J. Indian Inst. Sci.*, Vol. 86, pp. 363–375.
- Snyder, C.A., 2019. “Chemical Equilibrium with Applications”. Disponível em: <<https://cearun.grc.nasa.gov/>>. Acesso em: 21 de ago. de 2019.
- Sutton, G.P., 1992. *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons, New York, USA, 6a edição.
- Sutton, G.P. e Biblarz, O., 2017. *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 9a edição.
- Wade, M., 2017a. “S-20 engine”. Disponível em: <<http://www.astronautix.com/s/s-20.html>>. Acesso em: 28 de mar. de 2019.
- Wade, M., 2017b. “S-30 engine”. Disponível em: <<http://www.astronautix.com/s/s-30engine.html>>. Acesso em: 28 de mar. de 2019.