

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

LABORATÓRIO DE ATIVIDADES ESPACIAIS

VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA TUBEIRA E DO  
PROPELENTE SOBRE O DESEMPENHO DO MINIFOGUETE NETUNO-R

Carlos H. Marchi  
Bernardo M. Besozzi  
Marcello Ciceroni  
Sandro F. Hering

Florianópolis, julho de 1990.

## RESUMO

O motor do minifoguete Netuno-R é fabricado em ligas de alumínio. Sua massa é de 500 gramas, incluindo 120 gramas de propelente que é composto por nitrato de potássio e sacarose.

Estudou-se o efeito de quatro tipos de tubeira, e de três formulações e três granulometrias do propelente sobre o desempenho do motor do minifoguete Netuno-R.

Foram realizados 23 ensaios num banco estático mecânico, construído para este trabalho, com obtenção da curva força versus tempo de queima do motor.

Verificou-se que a geometria da tubeira, a formulação e granulometria do propelente, bem como outros parâmetros, têm grande influência sobre o desempenho do minifoguete.

O apogeu previsto para o minifoguete Netuno-R, com o melhor resultado dos ensaios, é de 620 metros  $\pm$  20%.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Clovis R. Maliska, Rodi Hickel, Vicente P. Nicolau e Carlos A. C. Selke, da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio recebido.

Ao engenheiro Axel Dihlmann pelas filmagens de vários ensaios e outras colaborações durante os experimentos.

Ao Departamento de Apoio à Pesquisa, da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo financiamento parcial do trabalho.

Ao engenheiro Ozualdo S. Toyoda pelos conhecimentos técnicos transmitidos que contribuíram para o aprimoramento do trabalho.

## Í N D I C E

1 - Introdução .....	5
2 - Motor-foguete Netuno-R .....	6
3 - Equipamentos de apoio	
3.1-Banco estático .....	7
3.2-Sistema de ignição .....	7
4 - Experimentos efetuados e resultados obtidos	
4.1-Preparo e carregamento do grão-propelente .....	9
4.2-Experimentos efetuados .....	9
4.3-Obtenção das curvas de empuxo .....	10
4.4-Resultados obtidos dos ensaios .....	10
5 - Análise dos resultados e comentários	
5.1-Desempenho dos protótipos .....	12
5.2-Simulação de trajetória .....	12
5.3-Comentários .....	13
5.4-Análise dos resultados .....	14
6 - Conclusão .....	17
Figuras .....	18
Fotos .....	27
Tabelas .....	32
7 - Referências .....	40

## 1 - INTRODUÇÃO

O Laboratório de Atividades Espaciais (LAE) iniciou o desenvolvimento do minifoguete Netuno em 1988 seguindo a concepção básica [1] proposta pelo Centro de Estudos de Foguetes Espaciais do Carpina (CEFEC), de Carpina (PE). Segundo o CEFEC, o Netuno alcançaria 1800 metros de apogeu com 300 gramas de carga útil.

Visando o desenvolvimento de um sistema de recuperação, o LAE projetou o Netuno-R, versão reduzida do Netuno com 1/3 de seu comprimento. O Netuno passou a ser denominado Netuno-S.

Em 1988 foi realizado o primeiro teste com o Netuno-R com sucesso; o motor funcionou sem qualquer problema. Ainda neste ano, quatro lançamentos com este minifoguete (MF) foram efetuados, dois dos quais com sistema de recuperação. Verificou-se que o desempenho do Netuno-R era muito baixo, alcançando cerca de 100 e 200 metros com e sem carga útil, respectivamente [2].

Visando melhorar o desempenho do MF Netuno-R, dois projetos foram estabelecidos. No primeiro, investigou-se o efeito da geometria das tubeiras. Foram realizados 16 ensaios estáticos durante o ano de 1989 com quatro tipos de tubeiras.

As tubeiras de MF, normalmente, são projetadas usando-se a solução analítica quase-unidimensional do escoamento compressível de gases perfeitos [3]. O comprimento das tubeiras é determinado pela escolha do projetista dos ângulos dos bocais convergente e divergente que compõem a tubeira. Conforme [4], recomenda-se a faixa de 15 a 45° para o convergente e de 8 a 20° para o divergente. Ainda de acordo com esta referência, a melhor escolha é usar os ângulos de 30° e 15° para os bocais convergente e divergente, respectivamente. Nos ensaios efetuados, foram cobertas as faixas de 14 a 57° para o ângulo convergente e de 9 a 23° para o ângulo divergente.

No segundo projeto, procurou-se melhorar o desempenho do MF Netuno-R variando-se a formulação do propelente e a granulometria das substâncias químicas usadas no seu preparo. Três formulações e três granulometrias foram testadas em 7 ensaios estáticos no decorrer de 1990.

Oito protótipos do MF Netuno-R e um banco estático foram fabricados para o desenvolvimento deste trabalho que engloba 23 ensaios estáticos.

Descreve-se, a seguir: o motor-foguete Netuno-R; o banco estático e o sistema de ignição usados nos ensaios; o preparo e carregamento do propelente, os experimentos efetuados e os resultados obtidos; análise e comentários sobre os ensaios realizados, incluindo a previsão da trajetória do MF Netuno-R; e a conclusão do trabalho.

## 2 - MOTOR-FOGUETE NETUNO-R

Na Fig. 1 é mostrado o motor-foguete Netuno-R. O material empregado na fabricação da tubeira e tampa superior é a liga de alumínio ABNT 2024-T3. O tubo-motor usa tubo sem costura de liga de alumínio ABNT 6063-T5.

As principais dimensões do Netuno-R são:

- diâmetro interno do tubo-motor = 38.1 mm
- diâmetro externo do tubo-motor = 44.5 mm
- comprimento da câmara de combustão = 145 mm
- volume da câmara de combustão = 165 cm<sup>3</sup>
- comprimento total do tubo-motor = 185 mm
- comprimento total do motor = 220 mm.

A massa da configuração básica do Netuno-R está assim distribuída:

- tampa superior = 75 g
- tubeira = 110 g
- tubo-motor = 195 g
- grão-propelente = 120 g
- Netuno-R = 500 g

A tampa superior e a tubeira são conectados ao tubo-motor por meio de roscas do tipo Whitworth normal com 12 fios/polegada e comprimento de 20 mm.

O propelente do motor Netuno-R é constituído por:

- combustível = C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub> (sacarose)
- oxidante = KNO<sub>3</sub> (nitrato de potássio).

### 3 - EQUIPAMENTOS DE APOIO

#### 3.1 - BANCO ESTÁTICO

O banco estático usado, BMB-1, é do tipo mecânico e pode ser visto nas Fotos 1 e 2. A medição do empuxo é feita na direção horizontal através de um elemento mecânico, uma mola helicoidal. Os componentes que integram o banco são:

- motor elétrico
- bobina de papel com 75 mm de largura
- cilindro para tracionar a bobina de papel
- cilindro para fixar a bobina de papel
- mola helicoidal ( $k = 2.21 \text{ N/mm}$ )
- placa de fixação da mola
- caneta
- bateria de 12V
- base de madeira
- trilho de alumínio
- 100 m de fio 2 x 1
- 2 abraçadeiras

Os 100 metros de fio são utilizados para possibilitar o acionamento do motor elétrico a uma distância segura do banco estático onde encontra-se o minifoguete.

O resultado fornecido pelo banco BMB-1 é a curva de deformação da mola versus o comprimento do gráfico do motor-foguete ensaiado.

#### 3.2 - SISTEMA DE IGNIÇÃO

O sistema de ignição é do tipo elétrico e baseia-se no projeto apresentado em [5], sendo constituído de:

- caixa de ignição
- bateria de 12V/36A
- ignitor
- 2 m de fio 2 x 1.5 entre a bateria e a caixa de ignição
- 100 m de fio 2 x 1 entre a bateria e o ignitor.

O operador com a bateria e a caixa de ignição ficam situados a 100 metros

do banco estático. Quando o operador aciona a chave de ignição, a bateria energiza o sistema provocando um curto-circuito na resistência elétrica do ignitor, que está instalado na tubeira do minifoguete, ocorrendo a queima da porção de pólvora-negra granulada que provoca a pressão e temperatura necessários, no interior do MF, para dar início à queima do grão-propelente.



## 4 - EXPERIMENTOS EFETUADOS E RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 - PREPARO E CARREGAMENTO DO GRÃO-PROPELENTE

Depois da pesagem da sacarose e do nitrato de potássio, que serão empregados no preparo do propelente, eles são triturados e peneirados separadamente. Procede-se, então, à mistura das duas substâncias por 30 minutos. Após isto, adiciona-se acetona à mistura na proporção de 0.5 cm<sup>3</sup> por grama de propelente.

Um tubo de PVC com 25 mm de diâmetro externo é colocado no centro do tubo-motor para servir de molde durante o carregamento do propelente, dando a forma tubular ao grão após a sua retirada.

A cada porção de aproximadamente 30 gramas de propelente que são despejadas no interior do tubo-motor, comprime-se o propelente manualmente sem muita força.

Terminado o carregamento, aguarda-se cerca de cinco horas para retirar o tubo de PVC de dentro do grão-propelente. Deixa-se o propelente secando por mais cinco dias antes de usá-lo.

As substâncias químicas (reagentes analíticos) usados no preparo do propelente, para os ensaios realizados, foram adquiridas em junho de 1989, possuindo as seguintes especificações:

- nitrato de potássio: - peso molecular = 101.11 g/mol  
- impurezas = 0.026%
- sacarose: - peso molecular = 342.30 g/mol  
- impurezas = 0.111%

### 4.2 - EXPERIMENTOS EFETUADOS

Na Tab. 1 são mostrados os tipos de tubeiras usadas nos testes, as porcentagens de sacarose e de nitrato de potássio e os tamanhos das peneiras utilizadas no preparo do propelente. A abertura das peneiras ABNT 30, 40 e 60 são 0.59, 0.42 e 0.25 mm, respectivamente.

Os quatro tipos de tubeiras foram ensaiados nos testes TE-8 a TE-23. Elas são apresentadas na Fig. 2. Os ensaios de formulação e granulometria ocorreram nos testes TE-24 a TE-30.

Nos ensaios TE-22 e TE-23 o diâmetro interno do grão-propelente era de 14.9 mm e nos demais 25.0 mm.

Estão relacionados na Tab. 2 a data de realização dos ensaios. Na Tab. 3 mostra-se os testes nos quais cada protótipo foi utilizado. Nas Tab. 4 e 5 são listadas as dimensões das tubeiras, de acordo com a nomenclatura da Fig. 3, e os ensaios nos quais foram utilizadas. As características dos grãos-propelentes são apresentadas na Tab. 6.

#### 4.3 - OBTENÇÃO DAS CURVAS DE EMPUXO

O gráfico que se obtinha do banco estático, em cada ensaio, tinha como abscissa um deslocamento proporcional ao tempo e como ordenada, um deslocamento proporcional à força do MF sobre a mola.

Para se obter a curva de empuxo é necessário transformar o deslocamento no eixo das abscissas em tempo e o deslocamento no eixo das ordenadas em força.

Conhecendo-se a constante da mola, para calcular a força basta multiplicar esta constante pelo deslocamento de cada ponto do gráfico no eixo das ordenadas.

O valor do tempo é calculado pela razão entre o deslocamento no eixo das abscissas, de cada ponto do gráfico, e a velocidade do papel no banco estático.

A velocidade do papel, para cada ensaio, era calculado pela razão entre o comprimento total do gráfico e o tempo durante o qual o motor elétrico do banco estático, que traciona o papel, ficava ligado.

O comprimento dos gráficos, da região com empuxo registrado, oscilou entre 54 e 243 mm. O número de pontos usados para discretizar as curvas obtidas com o banco estático ficou entre 27 e 57 pontos.

#### 4.4 - RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS

1º Campanha. O TE-8 foi realizado fora do banco estático, por precaução, e teve por objetivo verificar a possibilidade de reutilizar os MF Netuno-R. Esse era o segundo ensaio do PT-6 cujo tubo-motor estava com coloração alterada depois de ter passado pelo seu primeiro teste. O ensaio transcorreu normalmente sem qualquer problema.

Nos TE-9 e TE-11 não registrou-se qualquer empuxo. É mostrado na Fig. 4 a curva de empuxo do TE-10.

As Fotos 3 e 4 foram obtidas durante os TE-10 e TE-11, respectivamente.

2º Campanha. O registrador do banco estático travou durante os TE-13, TE-15 e TE-17 não permitindo a obtenção da curva de empuxo dos motores.

Durante o TE-14 não foi registrado qualquer empuxo. Neste ensaio a carga de

pólvora-negra granulada (PN-G) usada no ignitor foi de 3.0 gramas.

As curvas de empuxo dos TE-12 e TE-16 são mostradas nas Fig. 5 e 6 respectivamente. A Foto 5 foi obtida durante o TE-16.

Verificou-se que no decorrer dos TE-15 e TE-16 o empuxo foi suficiente para provocar um pequeno deslocamento do banco estático.

3º Campanha. Problemas técnicos impediram a obtenção da curva de empuxo do TE-18.

Nas Fig. 7 a 9 são mostradas as curvas de empuxo dos TE-19, TE-20 e TE-21, respectivamente. Durante estes ensaios também o empuxo foi suficiente para provocar um pequeno deslocamento do banco estático.

Como o grão-propelente do TE-22 possuía o diâmetro interno de 14.9 mm, diferente de todos os ensaios anteriores, este ensaio foi realizado fora do banco estático por precaução. A queima do propelente foi muito rápida mas não houve explosão do protótipo.

O grão-propelente usado no TE-23 também tinha 14.9 mm de diâmetro interno. O banco estático ficou inutilizado após este ensaio devido ao elevado valor do empuxo produzido pelo motor. Apesar disso, conseguiu-se registrar o tempo de queima do motor que foi de aproximadamente 0.2 s.

4º Campanha. Na Fig. 10 é mostrado a curva de empuxo do TE-24. Não foi registrado qualquer empuxo durante o TE-25. Apesar das duas tentativas realizadas, não ocorreu a ignição do motor no TE-26.

5º Campanha. Durante o TE-27 nenhum empuxo foi registrado. Nas Fig. 11 a 13 são mostradas as curvas de empuxo dos TE-28, TE-29 e TE-30, respectivamente. As Fotos 6 e 7 foram obtidas durante estes dois últimos testes.

O tempo durante o qual o motor permaneceu ejetando gases da combustão do propelente é mostrado na Tab. 7 para os testes estáticos que foram filmados.

O impulso total e empuxo médio das Fig. 4 a 13 foram calculados da seguinte forma. O impulso total pela integração de cada curva de empuxo. O empuxo médio pela razão entre o impulso total e o tempo total de queima do grão-propelente.