

### 3 - MOTOR-FOGUETE PROPOSTO

O Centro de Estudos de Foguetes Espaciais de Carpina propôs ao Laboratório de Atividades Espaciais o desenvolvimento do motor-foguete apresentado neste capítulo. O Laboratório de Atividades Espaciais deu a este projeto a denominação de: Projeto Netuno.

#### 3.1 - \* OBJETIVO DO PROJETO

O objetivo do projeto é desenvolver um mini-foguete experimental, a propelente sólido, capaz de transportar uma carga útil de 300 g. a uma altura de 1.800 m., com as seguintes especificações:

##### 3.1.1 - \* Propelente

O propelente será constituído por uma mistura de 70% de nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ) e 30% de sacarose ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ).

##### 3.1.2 - \* Tempo de queima do propelente

O tempo total para a queima de todo propelente será de 0,5 segundos (s).

##### 3.1.3 - \* Pressão de combustão

A pressão de combustão será de: 40  $\text{Kgf/cm}^2$ .

---

(\*) Todos os dados deste capítulo assinalados com um asterisco, indicam valores e informações experimentais fornecidos pelo CEPEC e que são relativos ao motor-foguete proposto e já testado.

### 3.1.4 - \* Massa do mini-foguete

3.1.4.1 - Massa de propelente:..... 350 g.

3.1.4.2 - Massa da ogiva:..... 40 g.

3.1.4.3 - Massa do motor-foguete e empenas:..... 950 g.

3.1.4.4 - Massa total do mini-foguete:..... 1340 g.

### 3.2 - \* SELEÇÃO DO TUBO-MOTOR

O tubo-motor deverá apresentar as seguintes especificações:

-Sem costura.

-Resistência a pressão<sup>1</sup>: 160 Kgf/cm<sup>2</sup>.

-Diâmetro interno: 35 a 40 mm.

-Ser constituído por um material com densidade menor que o aço.

De acordo com as características desejadas, optou-se pelo seguinte tubo-motor: tubo de alumínio, ligas especiais 2014-T6 ou 6063-T6-C, pois: -é sem costura.

-resistência a pressão: 180 Kgf/cm<sup>2</sup>.

-diâmetro interno: 38,1 mm.

-densidade do alumínio é menor que o aço.

### 3.3 - PROJETO DA TUBEIRA

As dimensões da tubeira ficam definidas através dos cálculos dos parâmetros abaixo desenvolvidos.

#### 3.3.1 - Impulso

<sup>1</sup>Utilizou-se um fator de segurança = 4, isto é, o tubo-motor a ser escolhido, deverá suportar no mínimo 4 vezes a pressão de combustão real a ser exercida nas paredes do tubo-motor.

Impulso é a força fornecida pelo motor-foguete, resultante da queima de sua carga de propelente por segundo.

$F_I = \frac{c \cdot q}{g}$ , onde:  $F_I$  = impulso do motor-foguete;  $c$  = velocidade de ejeção do propelente, ou seja, velocidade com a qual os gases resultantes da queima do propelente, na câmara de combustão, são ejetados pela tubeira;  $q$  = massa de propelente consumida por segundo;  $g$  = aceleração da gravidade.

Dados:  $^*c = 490,5 \text{ m/s}$ ;  $^*q = 0,7 \text{ Kg.}$ ;  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

$$F_I = \frac{(490,5) \times (0,7)}{(9,8)} \quad F_I = 35 \text{ Kgf/s}$$

### 3.3.2 - Empuxo

Empuxo é a força resultante do quociente do impulso pelo tempo de duração da queima do propelente.

$F_E = \frac{F_I}{t_q}$ , onde:  $F_E$  = empuxo do motor-foguete;  $F_I$  = impulso do motor-foguete;  $t_q$  = tempo de queima do propelente.

Dados:  $F_I = 35 \text{ Kgf/s}$ ;  $^*t_q = 0,5 \text{ s}$

$$F_E = \frac{(35)}{(0,5)} \quad F_E = 70 \text{ Kgf}$$

### 3.3.3 - Pressão de combustão

Pressão de combustão é a pressão exercida nas paredes da câmara de combustão, resultante da queima do propelente nesta.

$^*P_C = 40 \text{ Kgf/cm}^2$ , onde:  $P_C$  = pressão de combustão.

### 3.3.4 - Coeficiente de empuxo

O coeficiente de empuxo é um parâmetro adimensional que mede

o desempenho da tubeira. É função das propriedades termodinâmicas do propelente, da pressão de combustão e da geometria da tubeira.

Dados:  $*C_e = 1,567$ , onde:  $C_e =$  coeficiente de empuxo.

### 3.3.5 - Área da garganta

A área da garganta é a área existente no fim da seção cônica convergente da tubeira.

$A_g = \frac{F_E}{P_c \cdot C_e}$ , onde:  $A_g =$  área da garganta;  $F_E =$  empuxo do motor-foguete;  $P_c =$  pressão de combustão;  $C_e =$  coeficiente de empuxo.

Dados:  $F_E = 70 \text{ Kgf}$ ;  $P_c = 40 \text{ Kgf/cm}^2$ ;  $C_e = 1,567$

$$A_g = \frac{(70)}{(40) \times (1,567)} \quad A_g = 1,12 \text{ cm}^2$$

### 3.3.6 - Diâmetro da garganta

Diâmetro da garganta é o diâmetro existente no fim da seção cônica convergente da tubeira.

$D_g = \sqrt{\frac{4 \cdot A_g}{\pi}}$ , onde:  $D_g =$  diâmetro da garganta;  $A_g =$  área da garganta;  $\pi =$  pi radiano.

Dados:  $A_g = 1,12 \text{ cm}^2$ ;  $\pi = 3,14$

$$D_g = \sqrt{\frac{(4) \times (1,12)}{(3,14)}} \quad D_g = 1,19 \text{ cm}$$

### 3.3.7 - Razão de expansão

A razão de expansão é uma relação adimensional entre a área da seção de saída e a área da garganta.

Dados:  $*E = 6,996$ , onde:  $E =$  razão de expansão.

3.3.8 - Área da seção de saída

A área da seção de saída é a área existente no fim da seção cônica divergente da tubeira.

$A_s = E \cdot A_g$ , onde:  $A_s$  = área da seção de saída;  $E$  = razão de expansão;  $A_g$  = área da garganta.

Dados:  $E = 6,996$ ;  $A_g = 1,12 \text{ cm}^2$

$$A_s = (6,996) \times (1,12) \quad A_s = 7,84 \text{ cm}^2$$

3.3.9 - Diâmetro da seção de saída

Diâmetro da seção de saída é o diâmetro existente no fim da seção cônica divergente da tubeira.

$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot A_s}{\pi}}$ , onde:  $D_s$  = diâmetro da seção de saída;  $A_s$  = área da seção de saída;  $\pi$  = pi radiano.

Dados:  $A_s = 7,84 \text{ cm}^2$ ;  $\pi = 3,14$

$$D_s = \sqrt{\frac{(4) \times (7,84)}{(3,14)}} \quad D_s = 3,16 \text{ cm}$$

3.3.10 - Comprimento do convergente

O comprimento do convergente é a altura da seção cônica convergente da tubeira.

$L_c = \frac{|D_c - D_g|}{2 \cdot \text{tg } 45^\circ}$ , onde:  $L_c$  = comprimento do convergente;  $D_c$  = diâmetro interno da câmara de combustão;

$D_g$  = diâmetro da garganta;  $\text{tg } 45^\circ = 1$ .

Dados:  $D_c = 3,81 \text{ cm}$ ;  $D_g = 1,19 \text{ cm}$ ;  $\text{tg } 45^\circ = 1$

$$L_c = \frac{\left| \frac{(3,81) - (1,19)}{1} \right|}{2} \quad L_c = 1,31 \text{ cm}$$

### 3.3.11 - Comprimento do divergente

O comprimento do divergente é a altura da seção cônica divergente da tubeira.

$$L_d = \frac{\left| \frac{D_s - D_g}{\text{tg } 15^\circ} \right|}{2}, \text{ onde: } L_d = \text{comprimento do divergente; } D_s = \text{diâmetro da seção de saída; } D_g = \text{diâmetro da garganta; } \text{tg} = \text{tangente.}$$

Dados:  $D_s = 3,16 \text{ cm; } D_g = 1,19 \text{ cm; } \text{tg } 15^\circ = 0,268$

$$L_d = \frac{\left| \frac{(3,16) - (1,19)}{(0,268)} \right|}{2} \quad L_d = 3,68 \text{ cm}$$

### 3.4 - PARÂMETROS DO MOTOR-FOGUETE

Abaixo são desenvolvidos alguns parâmetros importantes do motor-foguete proposto.

#### 3.4.1 - Impulso específico

Impulso específico é o empuxo produzido pela queima de uma unidade de massa de propelente, na unidade de tempo (segundo).

$I_P = \frac{F_E \cdot t_q}{m}$ , onde:  $I_P$  = impulso específico;  $F_E$  = empuxo do motor-foguete;  $t_q$  = tempo de queima do propelente;  $m$  = massa do grão-propelente.

Dados:  $F_E = 70 \text{ Kgf; } t_q = 0,5 \text{ s; } m = 0,35 \text{ Kg.}$

$$I_P = \frac{(70) \times (0,5)}{(0,35)} \quad I_P = 100 \text{ s (teórico)}$$

Observação: para obter-se o impulso específico real, consi-

dera-se 50% de perdas sobre o valor teórico calculado.

$$I_p = (100) \times (0,5) \quad I_p = 50 \text{ s (real)}$$

#### 3.4.2 - Velocidade de ejeção

Velocidade de ejeção é a velocidade com a qual os gases resultantes da combustão do propelente atravessam a seção de saída da tubeira.

$$V_e = I_p \cdot g, \text{ onde: } V_e = \text{velocidade de ejeção; } I_p = \text{impulso específico; } g = \text{aceleração da gravidade.}$$

$$\text{Dados: } I_p = 50 \text{ s; } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$V_e = (50) \times (9,81) \quad V_e = 490,5 \text{ m/s (teórico)}$$

Observação: a velocidade de ejeção real é obtida considerando-se 50% de perdas sobre o valor teórico obtido.

$$V_e = (490,5) \times (0,5) \quad V_e = 245,25 \text{ m/s (real)}$$

#### 3.4.3 - Vazão mássica da tubeira

A vazão mássica da tubeira é o parâmetro que determina a quantidade de propelente queimado por segundo na câmara de combustão.

$$\dot{m} = \frac{m}{t_q}, \text{ onde: } \dot{m} = \text{vazão mássica da tubeira; } m = \text{massa do grão-propelente; } t_q = \text{tempo de queima do propelente.}$$

$$\text{Dados: } m = 350 \text{ g; } t_q = 0,5 \text{ s}$$

$$\dot{m} = \frac{(350)}{(0,5)} \quad \dot{m} = 700 \text{ g/s}$$

### 3.5 - PROJETO DO GRÃO-PROPELENTE

O preparo do grão-propelente e suas dimensões são apresentados abaixo bem como o desenvolvimento de alguns parâmetros importantes para os demais cálculos.

#### 3.5.1 - Tipo do grão-propelente

Para este projeto adotou-se o grão-propelente tipo cilíndrico com alma<sup>2</sup>.

#### 3.5.2 - Especificação dos materiais

As especificações que o nitrato de potássio e a sacarose devem apresentar são: 99% de pureza, serem micropulverizados e não possuírem traços de umidade.

#### 3.5.3 - Volume do grão

Volume do grão é o volume que o grão-propelente ocupa dentro da câmara de combustão.

$$V_p = \frac{m}{d}, \text{ onde: } V_p = \text{volume do grão; } m = \text{massa do propelente; } d = \text{densidade do propelente.}$$

$$\text{Dados: } m = 350 \text{ g ; } *d = 1,2 \text{ g/cm}^3$$

$$V_p = \frac{(350)}{(1,2)} \qquad V_p = 291,67 \text{ cm}^3$$

#### 3.5.4 - Velocidade de queima do propelente<sup>3</sup>

A velocidade de queima do propelente é o parâmetro que re-

<sup>2</sup>Alma é um espaço vazio, com forma cilíndrica, existente no centro do grão-propelente.

<sup>3</sup>A queima deste propelente processa-se no sentido longitudinal, isto é, da tubeira para a extremidade superior do tubo-motor e no sentido radial, ou seja, do centro do propelente para sua periferia.



presenta a velocidade com a qual o propelente é queimado.

$V_q = 0,116 \cdot (P_c)^{0,65}$ , onde:  $V_q$  = velocidade de queima do propelente; 0,116 = constante;  $P_c$  = pressão de combustão do propelente; 0,65 = constante.

Dados: \*  $P_c = 40 \text{ Kgf/cm}^2$

$$V_q = (0,116) \times (40)^{0,65} \quad V_q = 1,276 \text{ cm/s}$$

### 3.5.5 - Espessura do grão

Espessura do grão é o parâmetro que representa a espessura existente entre o diâmetro externo e o interno do grão-propelente.

$E_p = V_q \cdot t_q$ , onde:  $E_p$  = espessura do grão;  $V_q$  = velocidade de queima do propelente;  $t_q$  = tempo de queima do propelente.

Dados:  $V_q = 1,276 \text{ cm/s}$ ;  $t_q = 0,5 \text{ s}$

$$E_p = (1,276) \times (0,5) \quad E_p = 0,64 \text{ cm}$$

### 3.5.6 - Diâmetro externo do grão

Diâmetro externo do grão é o valor que indica o diâmetro máximo que o grão-propelente possui.

$D_e = D_c$ , onde:  $D_e$  = diâmetro externo do grão;  $D_c$  = diâmetro interno da câmara de combustão.

Dados: \*  $D_c = 3,81 \text{ cm}$

$$D_e = 3,81 \text{ cm}$$

### 3.5.7 - Diâmetro interno do grão

O diâmetro interno do grão é o parâmetro que determina o diâmetro interno do grão-propelente e que representa o diâmetro da alma do propelente.

$D_i = D_e - 2 \cdot E_p$ , onde:  $D_i$  = diâmetro interno do grão;  $D_e$  = diâmetro externo do grão;  $E_p$  = espessura do grão.

Dados:  $D_e = 3,81$  cm;  $E_p = 0,64$  cm.

$$D_i = (3,81) - 2 \cdot (0,64) \quad D_i = 2,53 \text{ cm.}$$

### 3.5.8 - Comprimento do grão

O comprimento do grão é o valor que indica o comprimento do grão-propelente ocupado na câmara de combustão.

$L_p = \frac{4 \cdot V_p}{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)}$ , onde:  $L_p$  = comprimento do grão;  $V_p$  = volume do grão;  $D_e$  = diâmetro externo do grão;  $D_i$  = diâmetro interno do grão;

$\pi$  = pi radiano.

Dados:  $V_p = 291,67$  cm<sup>3</sup>;  $D_e = 3,81$  cm;  $D_i = 2,53$  cm;

$$\pi = 3,14$$

$$L_p = \frac{4 \times (291,67)}{3,14 \times [(3,81)^2 - (2,53)^2]} \quad L_p = 45,75 \text{ cm}$$

### 3.5.9 - Preparação do grão-propelente

O preparo do grão-propelente deverá seguir o roteiro abaixo descrito:

-Pese 245 g. de nitrato de potássio e coloque-o em um recipiente.

- Pese 105 g. de sacarose e coloque-o em um recipiente.
- Caso existam aglomerados de nitrato de potássio e/ou sacarose, devem ser triturados.
- Com uma peneira de 270 ABNT<sup>4</sup>, peneire os compostos em separado.
- Misture as duas substâncias em um recipiente e com o auxílio de uma espátula de madeira proceda a mistura por 10 minutos.
- Em seguida junte aos poucos acetona, à mistura, até que a mesma torne-se uma pasta tipo areia com água.
- Nesta etapa o tubo-motor do mini-foguete já deverá estar preparado com um tubo cilíndrico de diâmetro igual ao diâmetro interno do grão e colocado exatamente no centro do tubo-motor.
- Coloca-se aos poucos a pasta de propelente no tubo-motor até que todo o propelente (350 g) se esgote.
- Em seguida comprime-se o propelente com um pistão de madeira, sem bater nem socar com vigor, mas sim lentamente.
- Deixa-se o tubo-motor já carregado com o propelente em um local ventilado, por um período de 4 dias para secagem.
- Retira-se o tubo cilíndrico do centro do tubo-motor vagarosamente, pois se o grão rachar provocará uma explosão.
- O tubo-motor está pronto e carregado para ser testado.

#### 3.5.10 - Denominação do propelente

A denominação do Laboratório de Atividades Espaciais (LAE) para este propelente é: Sassu-B.

---

<sup>4</sup>ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas, órgão que regulamenta a utilização de equipamento técnico no Brasil.

### 3.6 - MODIFICAÇÕES NO PROJETO

Visando a finalidade específica deste mini-foguete que é o lançamento de pequenas cápsulas<sup>5</sup>, o LAE decidiu-se por realizar pequenas modificações no motor-foguete proposto e apresentar os demais componentes necessários.

#### 3.6.1 - Tampa superior

O comprimento de 20 mm (vide fig. 3-1) de rosca para conexão da tampa superior ao tubo-motor é inalterável, pois este comprimento é necessário para resistir a pressão de combustão que será exercido na câmara de combustão.

Com relação a função de conexão que a tampa superior possui entre ela e a ogiva, pode sofrer alteração visando a finalidade específica do projeto.

A nova tampa superior é apresentado na fig. 3-2. Este novo conector além de permitir a conexão exercida pelo anterior, permite que a ogiva seja conectada ao foguete através de parafusos, o que torna-se essencial no caso do resgate do mini-foguete através de um sistema de recuperação por pára-quadras. Além disto praticamente não houve alteração na massa final da tampa superior.

#### 3.6.2 - Tubeira

Conforme a fig. 3-1, a tubeira proposta está conectada ao tubo-motor através de 49,9 mm de rosca. Mas, segundo o próprio CEFEC, um comprimento de 30 mm de rosca já seriam suficientes para garantir a fixação da tubeira ao tubo-motor e resistir a pressão de combustão.

---

<sup>5</sup>A cápsula consiste no conjunto formado pela ogiva e sua carga útil, que no caso de mini-foguetes são pequenos instrumentos com finalidades científicas como câmaras fotográficas, sinalizadores de FM, sistemas de recuperação por pára-quadras, receptores de rádio controle e outros.

O novo desenho da tubeira é exposto na fig. 3-3, além disto a nova tubeira foi desenhada externamente visando a conexão a esta do anel de fixação das empenas.<sup>6</sup>

### 3.6.3 - Garras de fixação na rampa

Para este projeto o LAE decidiu-se por utilizar o sistema de trilho para a plataforma de lançamento. É um sistema amplamente utilizado pela maioria dos clubes espaciais brasileiros e que demonstra ser o mais eficaz.

Baseado neste critério, as garras de fixação na rampa desenvolvidas para este projeto são apresentados na fig. 3-4. São duas garras fixadas através de rosca externamente ao tubo-motor, sendo que uma penetra na tampa superior e outra na tubeira. As duas garras situam-se em uma mesma linha vertical de referência no tubo-motor.

### 3.6.4 - Ogiva

Com a finalidade de simplificar a configuração aerodinâmica da ogiva e simplificar sua fabricação, optou-se pela utilização de uma ogiva cônica que é vista na fig. 3-5.

### 3.6.5 - Tubo-motor

O desenho do tubo-motor proposto (vide fig. 3-1) sofreu uma leve diminuição em seu comprimento, devido ao novo desenho da tubeira e às garras de fixação na rampa.

### 3.6.6 - Grão-propelente

Na fig. 3-7 é exposto o desenho do grão-propelente proposto, que não sofreu nenhuma modificação.

---

<sup>6</sup> O anel de fixação nas empenas consiste em um tubo cilíndrico com alma ao qual são fixados externamente as empenas.

### 3.6.7 - Anel de fixação das empenas

O desenho do anel de fixação das empenas é visto na fig.3-8 tendo como função fixar as empenas, que estão ligadas externamente ao anel, ao motor-foguete. Este sistema foi projetado com o objetivo de utilizar um mesmo mini-foguete para o lançamento de várias cápsulas diferentes, variando-se para isto somente o conjunto de empenas.

Caso as empenas fossem fixadas diretamente ao tubo-motor um mesmo mini-foguete somente poderia ser utilizado para o lançamento de uma determinada cápsula com uma massa especificada, pois a utilização de cápsulas com massas diferentes faz com que haja alteração no centro de gravidade do mini-foguete o que requer o emprego de empenas diferentes para estabilizar o mesmo mini-foguete.

### 3.7 - MINI-FOGUETE NETUNO

O desenho completo do mini-foguete Netuno, com todos os seus componentes exceto as empenas, é apresentado na fig. 3-9.