IME

Foguete Sonda 360-BD
FELIX I
Memorias 1958

Secção de

8 vol I

MINISTÉRIO DA GUERRA
ESTADO MAIOR DO EXÉRCITO
ESCOLA TÉCNICA DO EXÉRCITO

CURSO INDUSTRIAL E DE ARMAMENTO

Foguete S O N D A 360 - BD
(FELIX I)

OBJETIVO:

Estudar um foguete com alcance da ordem de 300 Km usando como propelente, a pólvora de base dupla de 1000 Calorias, de fabricação corrente na Fábrica Presidente Vargas.

Não dispondo de elementos para o cálculo de trajetórias de projéteis com velocidades superiores a 1200 m/s e também para o levantamento de trajetórias dessa ordem, no caso do lançamento do foguete, foi resolvido projetar um foguete sonda, visando o seguinte:

1º) Não paralizar o estudo dos foguetes de longo alcance, enquanto eram resolvidas as dificuldades acima;

2º) O foguete sonda, sendo lançado na vertical nos possibilitará uma série de observações úteis ao prosseguimento do estudo dos foguetes de longo alcance.

Sendo o foguete lançado na vertical, poderemos com um acelerômetro, levantar a curva aceleração - tempo, que por uma dupla integração nos dará a curva espaço - tempo.

Assim sendo, poderemos medir com bastante aproximação a altitude máxima atingida pelo mesmo e em consequência ter uma idéia de seu alcance quando lançado numa trajetória inclinada.

Em consequência, foi executado o seguinte projeto:

- Um foguete para ser lançado na vertical à uma altitude de 120 Km;
- A ogiva (carga útil) pesando 30 kg.;
- A ogiva levará instrumentos destinados à medida

da altitude e um sistema de pára-quedas que permita recuperá-la.

Pelo diagrama I (anexo) concluiu-se que para atingir a altitude de 120 km, a velocidade em fim de combustão deveria ser da ordem de 1950 m/s.

ELEMENTOS INICIAIS DO PROJETO:

- Pêso da ogiva..... 30 kg.
- Altitude máxima..... 120 km.
- Velocidade máxima.....1950 m/s.
- Propelente: pólvora BD.....1000 C.

CARACTERÍSTICAS DO PROPELENTE:

- Potencial..... h = 1000 Kcal/kg
- Temperatura da combustão. θ_1 = 2723°K
- Massa molecular..... m = 24,86 kg/mol-kg
- Relação de calores específicos..... γ = 1,26
- Massa específica..... ρ_p = 1,6 g/cm^3

Depois de vários estudos, chegamos ao seguinte:

MASSAS DO FOGUETE

- Pêso do propelente.....	180 kg
- Ogiva completa, com instrumentos, cone e sistema de pára-quedas.....	30 kg
- Câmara de combustão com sistema de fechamento, tubeiras e fixação.....	102,5 kg
- Suporte do propelente.....	6,0 kg
- Sistema de iniciação composto de 2 estopilhas elétricas.....	0,5 kg
Pêso Total:	319,0 kg.

DIÂMETRO DO FOGUETE 360 mm

PRESSÃO INTERNA 30 atm.

VELOCIDADE DE COMBUSTÃO DA PÓLVORA a 30 atm.

u_{30} = 0,52 cm/s (valor experimental).

RELAÇÃO DE EXPANSÃO NA TUBEIRA

Damos à pressão de saída um valor maior que o da pressão atmosférica, pelas razões seguintes:

- evitar, com segurança, a produção de ondas de choque no interior do trecho divergente;
- assegurar uma queda conveniente das pressões ao longo da tubeira;
- reduzir o pêso da tubeira, uma vez que a condição de fazer a pressão de saída (p_s) igual à pressão atmosférica (p_a) implicaria em alongá-la, aumentando o pêso, sem que isso trouxesse vantagem sensível.

Adotou-se $p_s = 3$ atm.

Relação de expansão

$$\varepsilon = \frac{p_i}{p_s} = \frac{30}{3} = 10$$

CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DÉBITO

$$\triangle = 0{,}007235 \sqrt{\frac{m}{\theta_i}}$$

m = 24,86 kg/mol.Kg (massa molecular do propelente)

$\theta_i = 2723^\circ$ K (temperatura de combustão)

$$\triangle = 0{,}007235 \sqrt{\frac{24{,}86}{2723}} =$$

$$\triangle = 0{,}00069129 .$$

$$\triangle = 6{,}913 \text{ g/s} - \text{atm} - \text{cm}^2 .$$

DÉBITO DA TUBEIRA

É calculado pela expressão:

$$q = \triangle \cdot p_i \cdot A_c \cdot$$

onde

$\triangle = 6{,}913 \ \ g/s - atm - cm^2$

$p_i = 30 \ \ atm$

A_c = área da seção reta da garganta, em cm^2

q = débito da tubeira, em g/s.

COEFICIENTE DE PROPULSÃO

Para $\gamma = 1{,}26$ e $\overline{\omega} = 10$

calculamos (coeficiente de prop.)

$\mathcal{L} = 1{,}56$

FÔRÇA DE PROPULSÃO INTRÍNSECA

A fôrça de propulsão intrínseca F_i, em kg, é dada pela expressão:

$$F_i = \mathcal{L} \cdot p_i \cdot A_c$$

COEFICIENTE DE ESTRANGULAMENTO (K)

Relação entre a superfície de combustão do propergol e a área da seção reta da tubeira, na garganta.

$$K = \frac{S}{A_c}$$

CÁLCULO DA SUPERFÍCIE DE COMBUSTÃO DO PROPELENTE

Grãos usados: Prismáticos de seção retangular.

28 grãos com as seguintes dimensões:..... 40 x 100 x 1000 mm

Volume de um grão:..... $4000\ cm^3$

Pêso de cada grão:..... 4000 x 1,6

$$m = 6,4\ Kg.$$

Pêso total do propelente:..... $m = 180\ Kg.$

A superfície de combustão é:

$$S = 13.520\ cm^2$$

O restante da superfície dos grãos é inibida com acetato de celulose.

CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ESTRANGULAMENTO (K).

$$K = \frac{\triangle\ p_i}{W\ \rho_p}$$

$\triangle = 6,913$ (coeficiente de débito)

$p_i = 30$ (pressão interna)

$W = 0,52$ (velocidade de combustão da pólvora)

$\rho_p = 1,6$ (massa específica)

$$K = \frac{6,913 \times 30}{0,52 \times 1,6} = 250$$

CÁLCULO DA ÁREA DA GARGANTA DAS TUBEIRAS

$$A_c = \frac{S}{K} = \frac{13520}{250} = 54,08\ cm^2$$

Área da garganta de cada tubeira:

Número de tubeiras de grafite:..... 4

$$\frac{54,08}{4} = 13,52$$

$$13,52 + 0,25 \times 13,52 = 16,9 \text{ cm}^2$$

DIÂMETRO DA GARGANTA

$$d_c = 46,5 \text{ mm}$$

ÁREA DA SEÇÃO DE SAÍDA DA TUBEIRA

Obtem-se através da relação:

$$\frac{A_s}{A_c} = \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \cdot \frac{\overline{\omega}^{\frac{1}{\gamma}}}{\sqrt{1 - \overline{\omega}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}}}$$

$\gamma = 1,26$ (relação dos calores específicos)

$\overline{\omega} = 10$ (relação de expansão)

Calculando-se, obtem-se:

$$\frac{A_s}{A_c} \approx 3$$

Para cada tubeira:

$$A_s = 3 \times 16,9 = 50,7 \text{ cm}^2$$

DIÂMETRO DA SAÍDA DAS TUBEIRAS

$$d_s = 80 \text{ mm}$$

FÔRÇA DE PROPULSÃO INTRÍNSECA

$$F_i = \alpha \; p_i \; A_c$$

$$F_i = 1{,}56 \times 30 \times 1{,}033 \times 54{,}08$$

$$F_i = 2615 \text{ Kg.}$$

FÔRÇA DE PROPULSÃO

$$F' = F_i - p_a \; A_s$$

$$F' = 2615 - 253 = 2362 \text{ Kg.}$$

VALOR DO DÉBITO

Conhecida a área da garganta, pode-se calcular o débito pela fórmula:

$$q = \triangle \; p_i \; A_c .$$

$\triangle$ = 6,913 (coeficiente de débito)

p_i = 30 (pressão interna)

A_c = 54,08 (área das gargantas das tubeiras)

VALOR EXPERIMENTAL DO DÉBITO

$$q = 0{,}83 \times 6{,}913 \times 30 \times 54{,}08$$

$$\boxed{q = 9{,}32 \text{ Kg/s.}}$$

DURAÇÃO DA COMBUSTÃO

$$T = \frac{m}{q}$$

m = 180 Kg. (massa do propelente)

q = 9,32 Kg/s (débito do propelente)

$$T = \frac{180}{9,32} = 19,3 \text{ s}$$

$$\boxed{T = 19,3 \text{ s}}$$

VELOCIDADE EFICAZ

A velocidade eficaz, no caso geral, é dado pela expressão:

$$u_e = \frac{F}{q}$$

$$u_e = \frac{2362 \times 9,81}{9,32} = 2480 \text{ m/s.}$$

IMPULSÃO ESPECÍFICA

A impulsão específica é definida, por:

$$U'_f = u_e \, lg_e \left(\frac{M_o}{M_f}\right)$$

Impulsão específica é igual a velocidade do engenho no fim de ejeção

$u_e = 2480$ m/s (velocidade eficaz)

$M_o = 319$ Kg (massa inicial do engenho)

$M_f = 139$ Kg (massa do engenho no fim de ejeção)

Substituindo êstes valores, encontra-se:

$$U'_f = 2480 \; lg_e \frac{319}{139}$$

$$U'_f = 2480 \; lg_e \; 2,295$$

$$U'_f = 2480 \times 0,83 = 2060 \text{ m/s.}$$

V A L O R E S P R Á T I C O S

FÔRÇA DE PROPULSÃO

$$F = 81{,}5\ \% \times 2362 = 1920\ Kg$$

$$\boxed{F = 1920\ Kg}$$

IMPULSÃO ESPECÍFICA (prática)

$$U_f = 0{,}95\ U'_f$$

$$U_f = 0{,}95 \times 2060$$

$$\boxed{U_f = 1960\ m/s}$$

ACELERAÇÃO INICIAL (Γ_o)

Como a fôrça de propulsão é igual ao produto da massa pela aceleração, temos:

$$F \times g = M_o \Gamma_o$$

$$\Gamma_o = \frac{F}{M_o} \cdot g$$

$$\Gamma_o = \frac{1920}{319} \cdot g = 6\ g$$

$$\boxed{\Gamma_o = 6\ g}$$

RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Diâmetro do foguete.....	360 mm
Pêso do propelente	180 Kgf
Pêso total do foguete.....	319 Kgf
Altitude máxima.....	120 Km
Velocidade no fim de combustão....	1960 m/s
Fôrça de propulsão.....	1920 Kgf
Duração de combustão.....	19,3 s
Aceleração inicial.....	6 g

ELEMENTOS NA GARGANTA DA TUBEIRA

TEMPERATURA NA GARGANTA

$$\theta_c = \frac{2}{\gamma + 1}\ \theta_i$$

$\gamma = 1{,}26$ (Relação dos calores específicos)

$\theta_i = 2723^{o}$ K (Temperatura de combustão da pólvora)

$\theta_c = 0{,}885 \times 2723 = 2410^{o}$ K.

PRESSÃO NA GARGANTA

$$P_c = p_i \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$p_i = 30$ (pressão interna)

$$P_c = 0{,}553 \times 30 = 16{,}6$$

$$P_c = 16{,}6 \text{ atm}$$

VELOCIDADE DO SOM NA GARGANTA

$$a_o = \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}}\ u_i$$

$$u_i = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \cdot \frac{R}{m} \cdot \theta_i}$$

$$a_o = 0{,}339 \sqrt{9{,}69 \frac{8320}{24{,}86} \cdot 2723} = 1007\ m/s.$$

ELEMENTOS NA SEÇÃO TERMINAL DA TUBEIRA

VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

$$u'_s = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \cdot \sqrt{1 - \varpi^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \times u_o$$

$$u_s = 1650\ m/s$$

TEMPERATURA NA SAÍDA

$$\theta_s = \frac{\theta_i}{\varpi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \frac{2723}{10^{0{,}206}} = 1702^{\circ}\ K.$$

$$\theta_s = 1702^{\circ}\ K$$

VELOCIDADE DO SOM NA SAÍDA

$$a_s = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R}{m} \cdot \theta_s} =$$

$$= \sqrt{1{,}26 \times 334 \times 1702} = 840\ m/s$$

$$a_s = 840\ m/s.$$

TRAÇADO DA TUBEIRA

Cálculo do número de Mach local (M_s) e Ângulo de Mach.

$$M_s = \frac{u_s}{a_s}$$

$a_s = 840\ m/s$ (velocidade do som na saída)

$u_s = 1650\ m/s$ (velocidade de escoamento)

$$\text{sen}\ \alpha = \frac{1}{M_s} = \frac{a_s}{u_s}$$

$$\text{sen}\ \alpha = \frac{840}{1650} = 0{,}5075$$

$\alpha = 30^\circ\ 26'$ Ângulo de Mach.

Ângulo de partida do perfil divergente θ para $\gamma = 1{,}26$ e relação de expansão $\overline{\omega} = 10$

Do diagrama correspondente

$$\theta = 10^\circ$$

VALORES NO VÁCUO

ALTITUDE ATINGIDA

$$e = \frac{V_o^2}{2g} = \frac{\overline{1960}^2}{2 \times 9{,}81} \approx 185\ Km$$

TEMPO DE ASCENSÃO

$$t = \frac{V_o}{g} = \frac{1960}{9{,}81} = 198\ s.$$

OGIVA DO FOGUETE S O N D A 360 - DB

A ogiva levará um acelerômetro ligado a um transmissor que emitirá sinais na frequência de 73 Mc/s e êstes serão registrados num receptor - registrador.

Obteremos assim registrada a curva de aceleração - tempo que por uma dupla integração nos dará a curva espaço - tempo. Levará também um rádio sonda que transmitirá a pressão, a temperatura e a umidade do ar nas várias camadas atmosféricas, na frequência de 403 Mc/s. Êsses sinais do rádio sonda serão registrados em outro receptor - registrador e servirão ainda para orientar um rádio - teodolito que indicará a tôdo instante a posição da ogiva do foguete.

Um sistema de dois pára-quedas permitirá a recuperação da ogiva. O primeiro é composto de 5 discos metálicos, com uma área total de 4500 cm^2 que regulará a velocidade da ogiva durante a descida nas altas camadas da atmosfera. O segundo que será acionado por um pára-quedas pilôto, funcionará numa altitude de 5000 m, durante a queda da ogiva.

Como ainda houvesse espaço na ogiva e precisassemos completar seu pêso (30 Kg) a fim de que êste correspondesse ao da carga útil quando empregado o foguete para fins militares, foi resolvido instalar em seu interior uma câmara pressurisada, onde viajará um animal vivo.

A cabine em que viajará o animal é de forma cilíndrica e contém um sistema de condicionamento do ar constituído de uma instalação de regeneração do ar. A cabine encerra além da cama para o animal, instrumentos para transmissão das pulsações e outros aparelhos que precisam as condições gerais no interior, temperatura e pressão notadamente.