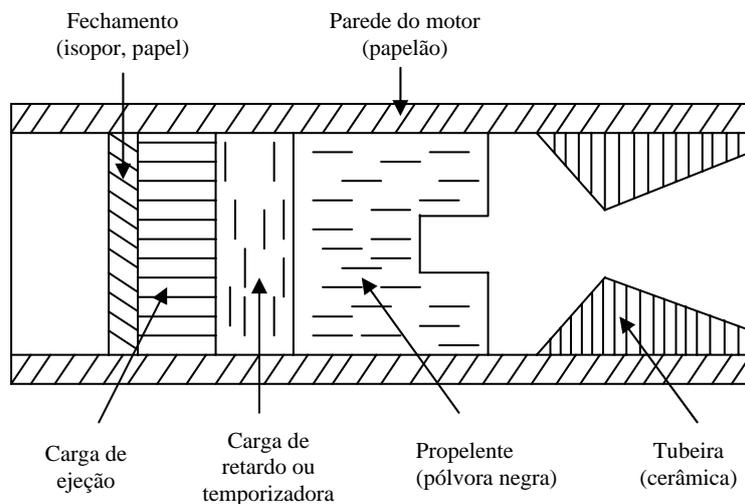


## Capítulo 2. MOTOR-FOGUETE DE ESPAÇOMODELO

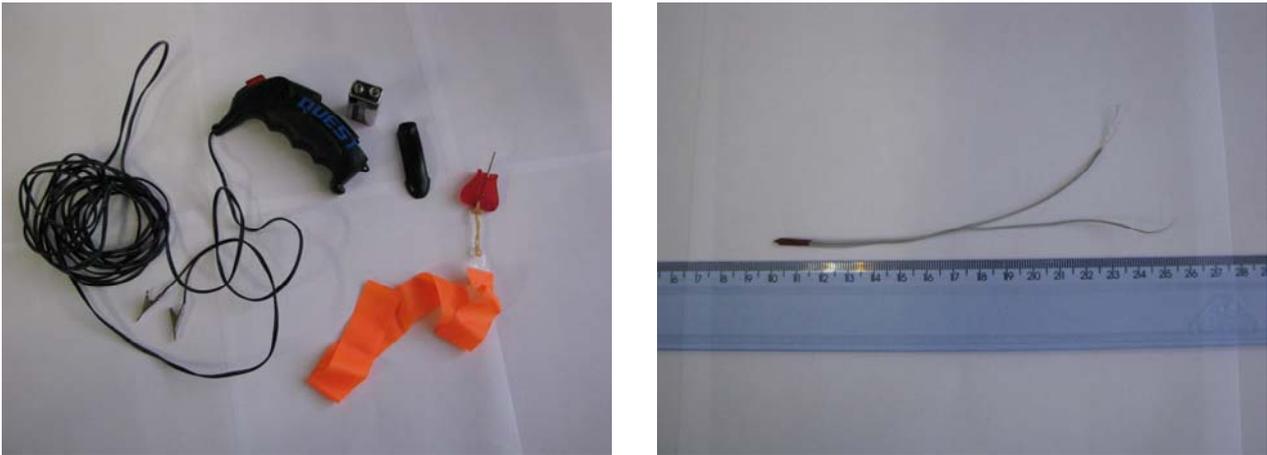
### 2.1 COMPONENTES DO MOTOR-FOGUETE

O esquema da Figura 1 mostra a estrutura típica de um motor-foguete de espaçomodelo (EM). Seus componentes são:

- Parede do motor: tubo cilíndrico circular de papelão. É a estrutura principal e maior do motor.
- Carga de propelente: quantidade de propelente que ao ser consumida gera a força de empuxo (E) do motor. Geralmente o propelente é pólvora negra. Os motores são disparados eletricamente através de um sistema de ignição e um ignitor pirotécnico, mostrados na Figura 2.
- Tubeira: é uma estrutura formada por um bocal do tipo convergente-divergente. Sua finalidade é aumentar a velocidade com que os gases, resultantes da queima do propelente, saem do motor, aumentando o empuxo.
- Carga de retardo ou temporizadora: é uma carga que é consumida com a finalidade de transcorrer um determinado intervalo de tempo, sem gerar empuxo.
- Carga de ejeção: é uma carga que é consumida rapidamente cuja finalidade é ejetar o sistema de recuperação do espaçomodelo, que pode ser um pára-quedas ou fita.
- Fechamento: é um material usado para evitar que os gases da carga de ejeção queimem a fita ou o pára-quedas do sistema de recuperação.



**Figura 1. Componentes do motor-foguete.**



**Figura 2. Sistema de ignição do tipo Quest e ignitor do tipo Bandeirante.**

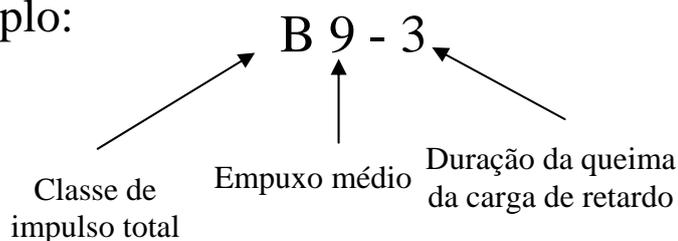
## **2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES**

De acordo com a Associação Nacional de Espaçomodelismo (National Association of Rocketry – NAR), dos Estados Unidos, os motores de espaçomodelos são classificados com um código composto por (NAR, 2004):

### **Código dos motores: Letra Número1 – Número2**

- A letra indica a classe de impulso total ( $I_t$ ) do motor, em newtons-segundos [Ns], conforme a Tabela 1.
- O primeiro número indica o valor do empuxo médio (Emed) aproximado do motor, em newtons [N].
- O segundo número indica a duração aproximada, em segundos [s], da queima da carga de retardo.

Exemplo:



Este motor tem impulso total no intervalo de 2,51 a 5,00 Ns. Seu empuxo médio é de 9 N. E a duração da queima da carga de retardo é de aproximadamente 3 s.

**Tabela 1. Classificação dos motores (NAR, 2004).**

Classe do motor	Impulso total (It) [Ns]
$\frac{1}{8}$ A	0,00 a 0,3125
$\frac{1}{4}$ A	0,3126 a 0,625
$\frac{1}{2}$ A	0,626 a 1,25
A	1,26 a 2,50
B	2,51 a 5,00
C	5,01 a 10,00
D	10,01 a 20,00
E	20,01 a 40,00
F	40,01 a 80,00
G	80,01 a 160,00

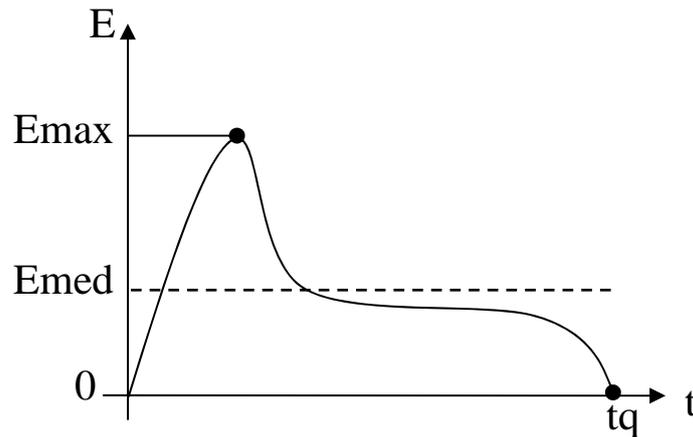
A Figura 3 mostra uma foto com seis motores-foguete de espaçomodelos do tipo A6, fabricados pela Bandeirante, do Brasil. No lado esquerdo da figura, os motores estão na vertical; e no lado direito, podem ser vistas as tubeiras dos motores.



**Figura 3. Motores-foguete de espaçomodelos da Bandeirante do tipo A6.**

## 2.3 CURVA DE EMPUXO

A curva de empuxo (Figura 4) é uma curva que representa a força propulsiva (empuxo  $E$ ) produzida pelo motor-foguete a cada instante de tempo ( $t$ ). Sua forma depende da geometria do grão-propelente. A curva de empuxo também pode ser chamada de curva empuxo-tempo ou curva de empuxo *versus* tempo.



**Figura 4. Curva de empuxo típica de espaçomodelos.**

**Grão-propelente:** é um bloco sólido que se constitui no propelente armazenado na câmara de combustão do motor. Alguns tipos de grãos podem ser vistos na Figura 5; entre parênteses são indicados os minifoguetes ou foguetes que usam cada tipo de grão. Dependendo do tipo de grão, ou se sua geometria, as curvas de empuxo podem ser do tipo regressiva, neutra ou progressiva, conforme a Figura 6.

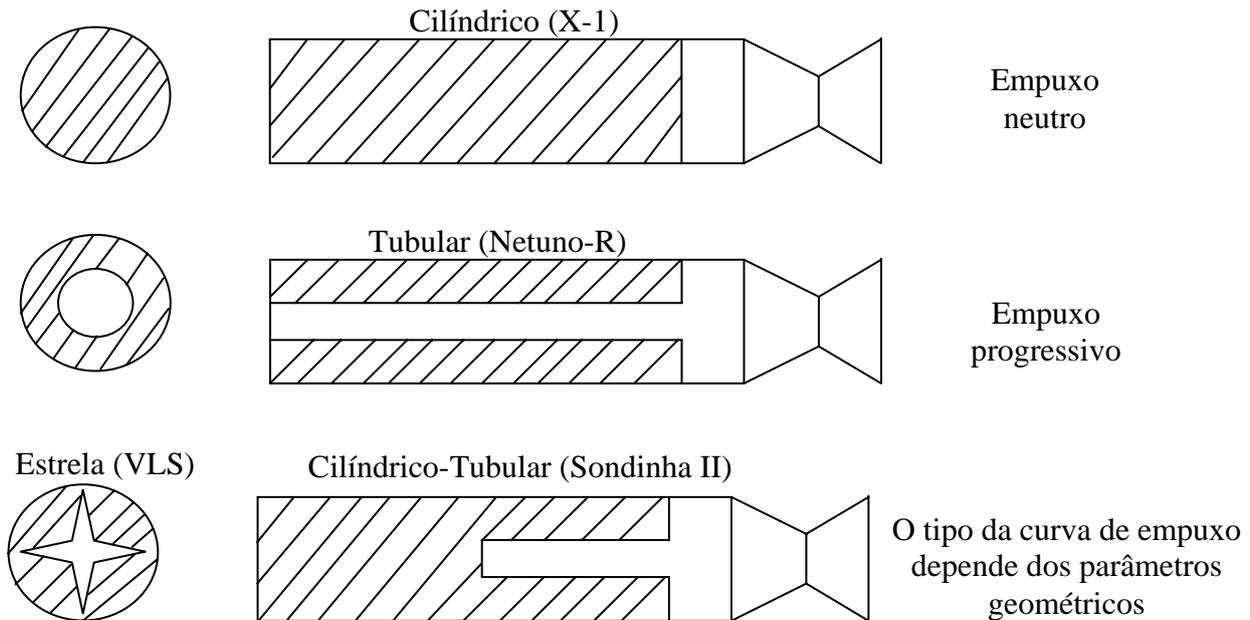
As curvas de empuxo de motores-foguete são obtidas experimentalmente através de testes estáticos. Neste tipo de teste, usa-se uma banca experimental (Figura 7), composta por um berço para o motor e uma célula de carga (transdutor de força). Um sistema de aquisição de dados computacional obtém os valores do empuxo durante a queima (Figura 8) do propelente do motor.

## 2.4 PROPELENTES DE MINIFOGUETES

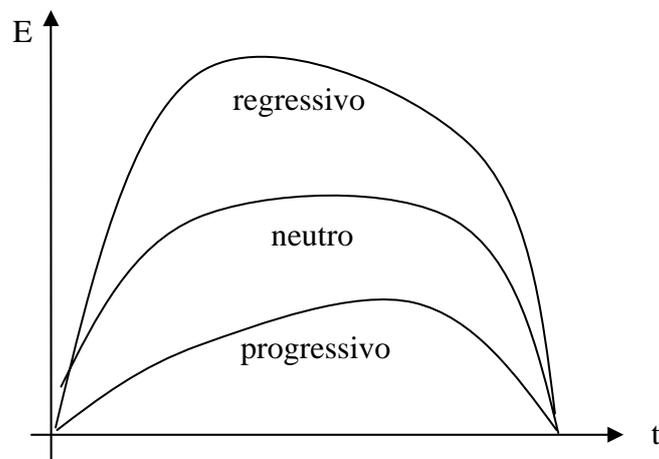
Alguns tipos de propelentes de minifoguetes são os seguintes:

- Minifoguete experimental X-1: Zinco + Enxofre = 67% Zn + 33% S
- Minifoguete experimental Netuno-R: Sacarose + Salitre = 35%  $C_{12}H_{22}O_{11}$  + 65%  $KNO_3$

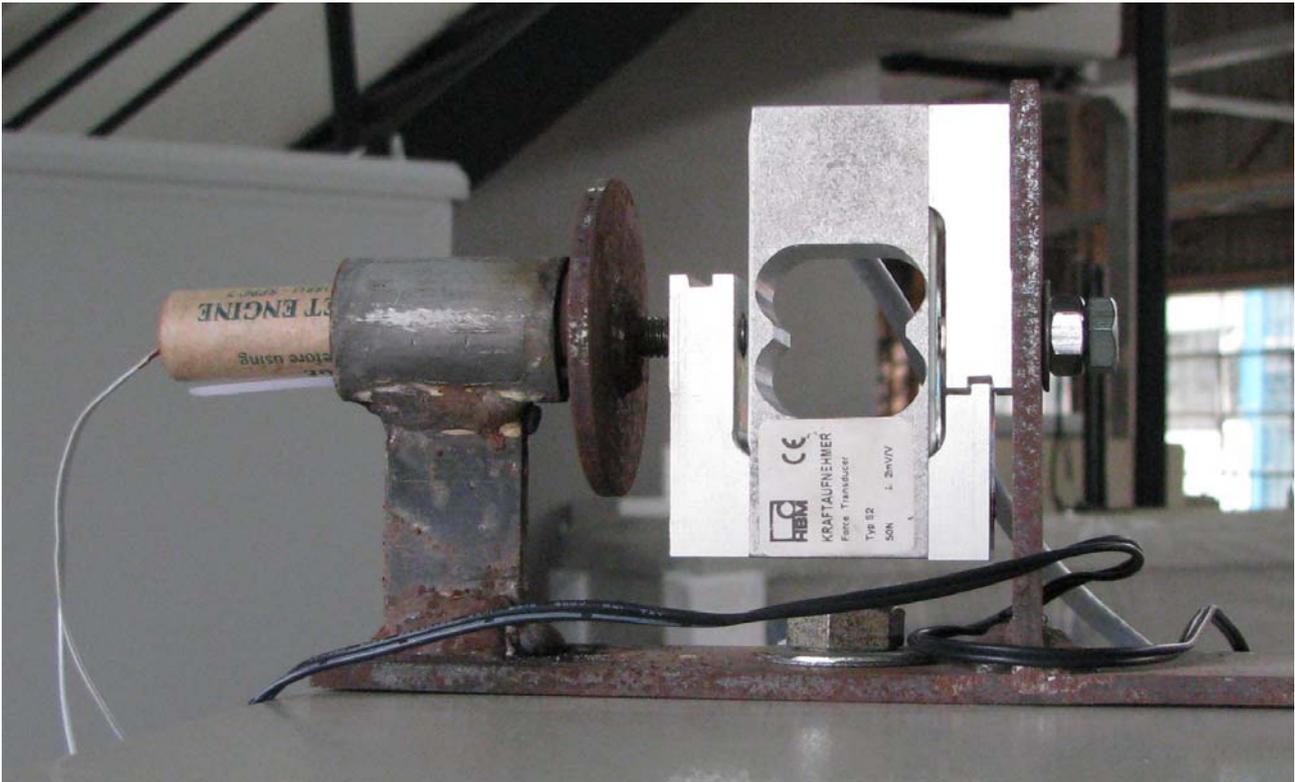
- Espaçomodelos: Pólvora negra = Carvão + Enxofre + Salitre = 14% C + 14% S + 72%  $\text{KNO}_3$ .  
Is = 60 a 100 s.
- Composite = Alumínio + Polibutadieno carboxilado + Perclorato de amônia: Al +  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  + CTPB. Is = 150 a 180 s (espaçomodelos), e 220 a 280 s (foguetes).
- Como referência, em foguetes a propelente líquido: Is = 250 a 350 s.



**Figura 5. Tipos de grãos-propelente.**



**Figura 6. Curvas de empuxo típicas de foguetes.**



**Figura 7. Foto de bancada experimental para obter a curva de empuxo de um motor-foguete de espaçomodelo preparado para o teste estático, já com o ignitor.**



**Figura 8. Foto mostrando um motor-foguete de espaçomodelo em funcionamento durante a aquisição de dados de sua curva de empuxo em banco estático.**

Diversos resultados de testes estáticos, incluindo fotos e [vídeos](#), podem ser vistos na internet no endereço [ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Testes\\_estaticos/](ftp://ftp.demec.ufpr.br/foguete/Testes_estaticos/).

## **2.5 PARÂMETROS DA CURVA DE EMPUXO**

A Figura 4 mostra uma curva de empuxo típica ou característica de espaçomodelos. Em geral, o empuxo máximo ( $E_{max}$ ) é atingido logo no início da queima, sendo razoavelmente maior do que o empuxo médio ( $E_{med}$ ). Em seguida, o empuxo se reduz para um patamar próximo do empuxo médio e permanece assim até o fim da queima do propelente. O símbolo  $t_q$  representa o tempo de queima do grão-propelente.

**Impulso total (It)**: é a quantidade de movimento total produzida pelo motor; representa uma medida da energia produzida pelo motor. O It é a integral da curva de empuxo, definida por

$$It = \int_0^{t_q} E \cdot dt \quad [Ns] \quad (2.1)$$

**Empuxo máximo (E<sub>max</sub>)**: valor máximo de empuxo da curva empuxo-tempo.

**Empuxo médio (E<sub>med</sub>)**: valor de empuxo que multiplicado pelo tempo de queima ( $t_q$ ) resulta no mesmo It. É definido por

$$E_{med} = \frac{It}{t_q} \quad [N] \quad (2.2)$$

**Velocidade média de ejeção dos gases (c)**: é a velocidade média dos gases, resultantes da queima do propelente, na saída do motor, ou na saída da tubeira do motor. É definido por

$$c = \frac{It}{M_p} \quad [m/s] \quad (2.3)$$

onde:  $M_p$  = massa de propelente total do motor [kg]

**Impulso específico médio (Is)**: é uma medida da eficiência global do motor. Seu valor representa o empuxo produzido por kg de propelente queimado durante um segundo. É definido por

$$I_s = \frac{I_t}{g M_p} \quad [s] \quad (2.4)$$

onde:  $g$  = aceleração local da gravidade [ $m/s^2$ ]

A NAR (2009) mantém uma lista (<http://www.nar.org/SandT/NARenglist.shtml>) de motores comerciais de espaçomodelos que são certificados para uso, nas diversas classes de motores. Outra lista de motores pode ser vista em [www.thrustcurve.org](http://www.thrustcurve.org). Ambas as listas apresentam curvas de empuxo dos diversos motores e seus parâmetros principais.

Exemplo: a Tabela 2 apresenta os dados principais do motor [Apogee A2-0,3,5,7](#), bem como os resultados calculados com as Eqs. (2.2) a (2.4) a partir dos dados.

**Tabela 2. Parâmetros do motor Apogee A2-0,3,5,7.**

Dados	Resultados
$I_t = 2,47 \text{ Ns}$	$E_{med} = 1,89 \text{ N}$
$t_q = 1,31 \text{ s}$	$c = 823 \text{ m/s}$
$M_p = 0,003 \text{ kg} = 3 \text{ g}$	$I_s = 84 \text{ s}$
$g = 9,8 \text{ m/s}^2$	

## 2.6 REFERÊNCIAS

NAR. **United States Model Rocketry Sporting Code**. National Association of Rocketry, 2004. p. 2.

[www.nar.org](http://www.nar.org) (2009).

[www.thrustcurve.org](http://www.thrustcurve.org) (2009).

## 2.7 EXERCÍCIOS

2.7.1 Calcular  $E_{med}$ ,  $c$  e  $I_s$  do motor [Estes ½A6-2](#).

2.7.2 Calcular  $E_{med}$ ,  $c$  e  $I_s$  do motor [Quest A6-4](#).

2.7.3 Calcular Emed, c e Is do motor [Estes B6-0,2,4,6](#).

2.7.4 Calcular Emed, c e Is do motor [Quest C6-0](#).