

Curso: Projeto e Teste de Minifoguete

Prof. Carlos Henrique Marchi

Grupo de Foguetes Carl Sagan (GFCS)

Laboratório de Atividades Espaciais (LAE)

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Setor de Tecnologia (TC)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba (PR), 2020.



Motores da Estes (primeiro fabricante mundial para foguetemodelo).
Testes estáticos no LMH/UFPR em Curitiba (PR), 8 Dez 2019. Foto: Carlos Henrique Marchi.

Capítulo 2.

Motor para foguetemodelo

Curitiba, 9 Jan 2020.

2.1 COMPONENTES DO MOTOR-FOGUETE

Mostrar fisicamente alguns tipos de motores.

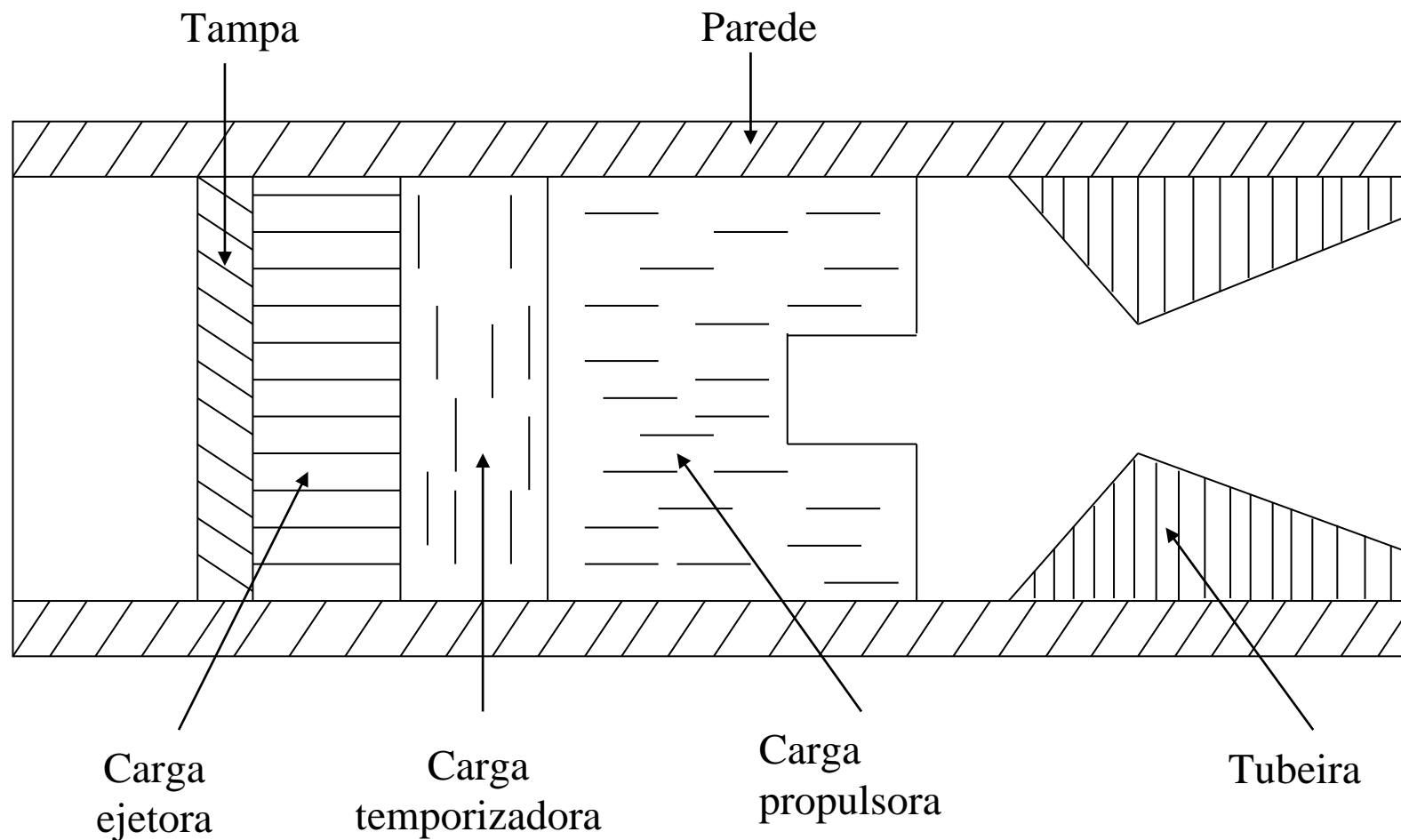


Figura 1. Componentes de motor para foguetemodelo.

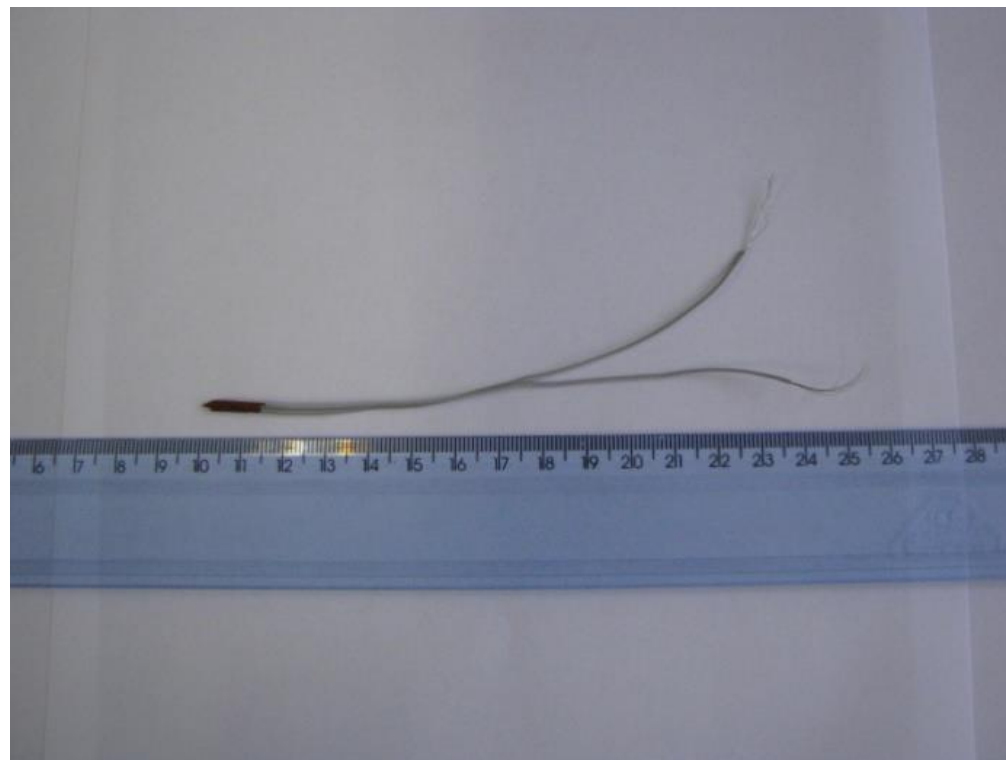
O esquema da Figura 1 mostra a estrutura típica de um motor para foguetemodelo. Seus componentes são:

- Parede: a parede do motor é um tubo cilíndrico circular feito de papelão, fenolite, plástico, acrílico, fibra de carbono entre outros. É a estrutura principal e maior do motor.
- Carga propulsora: é a carga principal de propelente que ao ser consumida gera a força de empuxo (E) do motor. Geralmente o propelente é pólvora negra e é um bloco maciço. Os motores são disparados eletricamente através de um sistema de ignição e um ignitor pirotécnico, mostrados na Figura 2.
- Tubeira: é uma estrutura que idealmente é formada por um bocal do tipo convergente-divergente; mas em motores de foguetemodelos, geralmente não existe o bocal convergente e a garganta (região com menor diâmetro) é um tubo. A finalidade da tubeira é aumentar a pressão dos gases que resultam da queima do propelente dentro do motor. A tubeira também é usada para aumentar a velocidade com que estes gases saem do motor. Assim, a tubeira aumenta o empuxo produzido pelo motor. Geralmente a tubeira é de cerâmica.
- Carga temporizadora: é uma carga pequena de propelente que é consumida lentamente e gera pequeno empuxo. Ela é usada para existir um determinado intervalo de tempo entre a queima das cargas propulsora e ejetora. Geralmente é um bloco maciço.
- Carga ejetora: é uma carga muito pequena de propelente que é consumida rapidamente. Sua finalidade é ejetar o sistema de recuperação do foguetemodelo, que comumente é um paraquedas ou fita. Geralmente é na forma granulada.
- Tampa: é usada para manter a carga ejetora em seu lugar. Geralmente é feita de isopor ou papelão.

Existem motores do tipo booster que só têm a carga propulsora. Eles não têm as cargas temporizadora e ejetora.



Figura 2. Sistema de ignição do tipo Quest



Ignitor do tipo Bandeirante

Mostrar fisicamente um SI e ignitores.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES

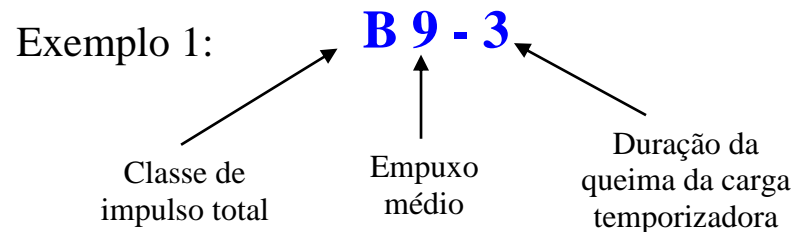
De acordo com a Associação Nacional de Foguetemodelismo (National Association of Rocketry – NAR), dos Estados Unidos, os motores de foguetemodelos são classificados com um código composto por (NAR, 2004):

Código dos motores: Letra Número1 – Número2

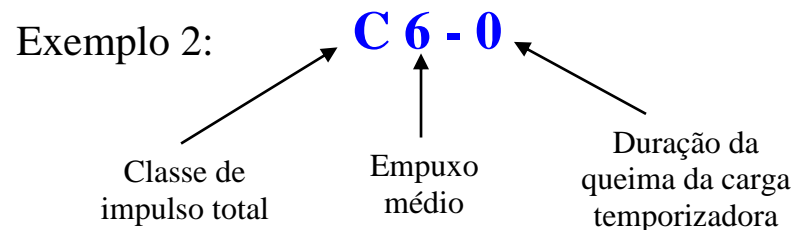
- **A letra indica a classe de impulso total** (It) do motor, em newton-segundo [N.s], conforme a Tabela 1.
- **O primeiro número indica o valor do empuxo médio** (Emed) do motor expresso em newton [N]. Geralmente Emed é arredondado para um dígito significativo.
- **O segundo número indica o tempo de queima da carga temporizadora**, medido em segundos [s]. Geralmente seu valor é arredondado para um número inteiro.

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

Categoria	Classe do motor	Impulso total (It) [N.s]		
Micro	$\frac{1}{8}$ A	0,00	a	0,3125
Baixa potência	$\frac{1}{4}$ 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
Média potência	D	10,01	a	20,00
	E	20,01	a	40,00
	F	40,01	a	80,00
	G	80,01	a	160,00



O motor do exemplo 1 tem impulso total no intervalo de 2,51 a 5,00 N.s. Seu empuxo médio é de aproximadamente 9 N. E a duração da queima da sua carga temporizadora é de aproximadamente 3 s.



O motor do exemplo 2 tem impulso total no intervalo de 5,01 a 10,00 N.s. Seu empuxo médio é de aproximadamente 6 N. E a duração da queima da sua carga temporizadora é zero; isso significa que este motor é do tipo booster, tendo apenas a carga propulsora (ele não têm as cargas temporizadora e ejetora).

No link <http://servidor.demec.ufpr.br/foguete/Recordes/> podem ser vistos os recordes atuais e passados do Brasil de minifoguetes com motores de diversas classes, tanto comerciais como não comerciais. Estes recordes fornecem uma referência em relação à altura que se consegue atingir com cada classe de motor. Um extrato da última edição é mostrado abaixo.

Recordes Brasileiros de Minifoguetes

comprovados com altímetro a bordo

17ª edição: 2 de janeiro de 2020 (resumo)

Categorias com novos recordes: classe D e 10 s

Este documento apresenta os recordes brasileiros relacionados a minifoguetes, registrados pela *Associação Brasileira de Minifoguetes* ou *Brazilian Association of Rocketry (BAR)*. Inclui os recordes obtidos nos Festivais de Minifoguetes.

Apogeu máximo para minifoguete com um único motor comercial em cada classe/categoria: livre

Categoria	Reorde (m)	Data	Minifoguete	Equipe / Instituição	NAR (m)
Classe $\frac{1}{8}$ A	49	23 Jul 2017	LAE-99	LAE- $\frac{1}{8}$ A/GFCS/UFPR	36
Classe $\frac{1}{4}$ A	113	17 Dez 2016	LAE-89	LAE- $\frac{1}{4}$ A//GFCS/UFPR	102
Classe $\frac{1}{2}$ A	136	29 Abr 2017	LAE-115	LAE- $\frac{1}{2}$ A/GFCS/UFPR	319
Classe A	185	17 Dez 2016	LAE-92	LAE-A/GFCS/UFPR	347
Classe B	336	12 Dez 2015	Gama-13	Gama/GFCS/UFPR	484
Classe C	444	19 Abr 2015	Gama-10	Gama/GFCS/UFPR	673
Classe D	751	02 Dez 2019	LAE-137	LAE-pós/GFCS/UFPR	856
Classe E	723	08 Ago 2015	Épsilon-8	Épsilon/GFCS/UFPR	1359

NAR: National Association of Rocketry (Estados Unidos) [recordes acessados em 27 Dez 2018, www.nar.org]

Apogeu máximo para minifoguete com um único motor não comercial em cada classe/categoria: livre

Categoria	Reorde (m)	Data	Minifoguete	Equipe / Instituição
Classe F	370	19 Dez 2015	Netuno-R/Paraná-I	LAE/GFCS/UFPR
Classe G	799	07 Set 2017	Netuno-R-β/Paraná-VIIb	Gralha Azul (UFPR-UP-UTFPR)
Classe H	1219	07 Set 2018	Urano/Paraná-XVb	Gralha Azul (UFPR-UP-UTFPR-UNIVAP)

Extrato da última edição dos Recordes Brasileiros de Minifoguetes

Na Figura 3 são mostradas tubeiras de motores da Bandeirante do tipo C6-5. Na Figura 4 pode ser vista a tampa de fechamento de isopor, a carga ejetora e a carga temporizadora.



Figura 3. Foto mostrando tuberas de motores da Bandeirante do tipo C6-5.

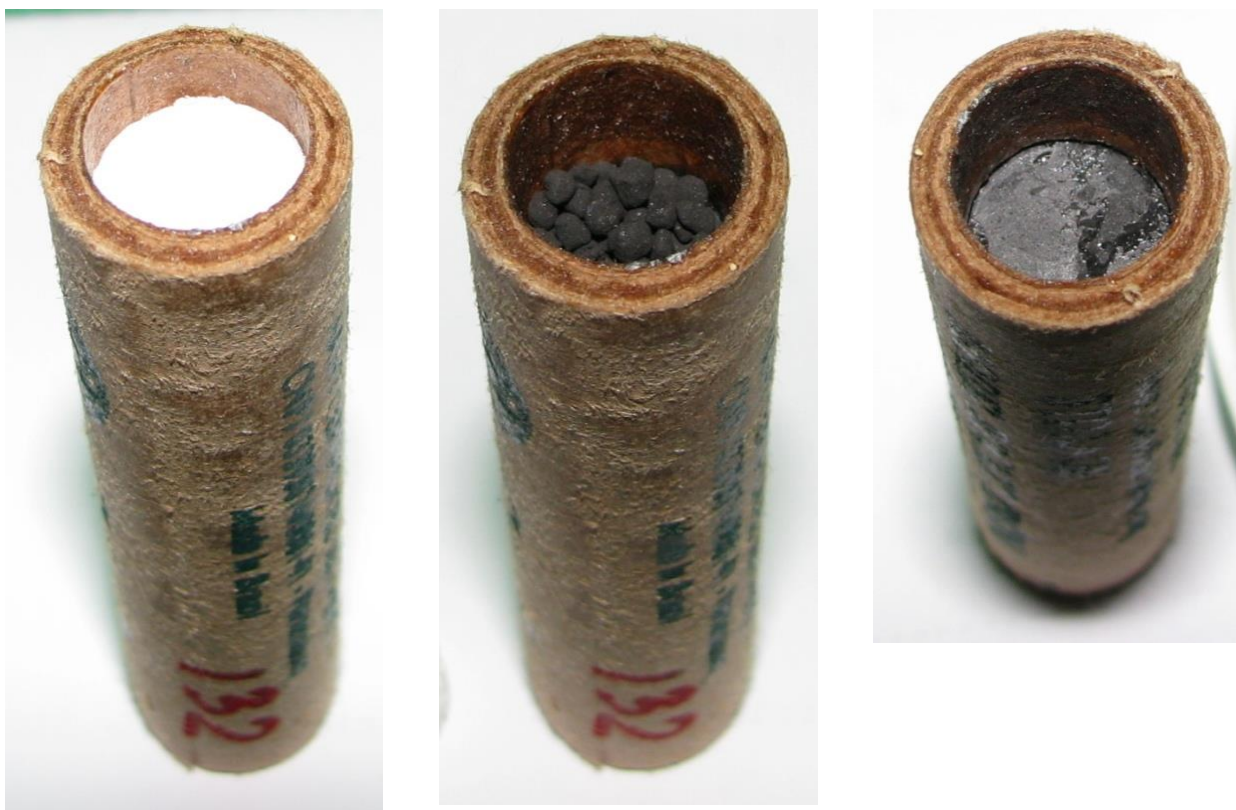


Figura 4. Fotos mostrando a tampa de fechamento, a carga ejetora e a carga temporizadora de motores da Bandeirante do tipo C6-5.

As Figuras 5 a 7 mostram as três fases da queima do propelente de um motor da Bandeirante do tipo C6-5, ou seja, a queima da sua carga propulsora, seguida pela queima da sua carga temporizadora e finalizando com a queima da sua carga ejetora.



Figura 5. Foto mostrando um motor Bandeirante C6-5 durante a queima da sua carga propulsora.



Figura 6. Foto mostrando um motor Bandeirante C6-5 durante a queima da sua carga temporizadora.



Figura 7. Foto mostrando um motor Bandeirante C6-5 durante a queima da sua carga ejetora.

Mostrar vídeos de motores A6-0, B6-0, C6-0, C6-5 e E6-0 da Bandeirante durante a queima do propelente.

2.3 CURVA DE EMPUXO

A curva de empuxo (Figura 8) é uma curva que representa a força propulsiva (empuxo E) produzida pelo motor-foguete a cada instante de tempo (t). A forma da curva de empuxo depende da geometria do grão-propelente. A curva de empuxo também pode ser chamada de curva empuxo-tempo ou curva de empuxo *versus* tempo.

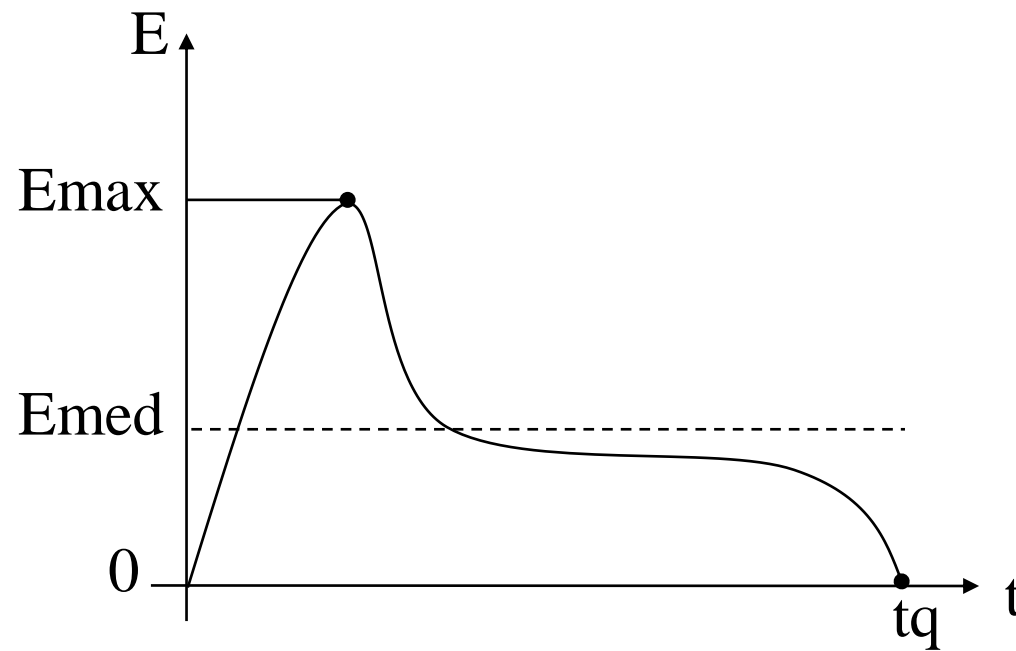


Figura 8. Curva de empuxo típica de motor de foguete modelo.

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 9; entre parênteses são indicados os nomes dos minifoguetes ou foguetes que usam cada tipo de grão. Dependendo do tipo de grão, ou da sua geometria, as curvas de empuxo podem ser do tipo regressiva, neutra ou progressiva, conforme é mostrado na Figura 10.

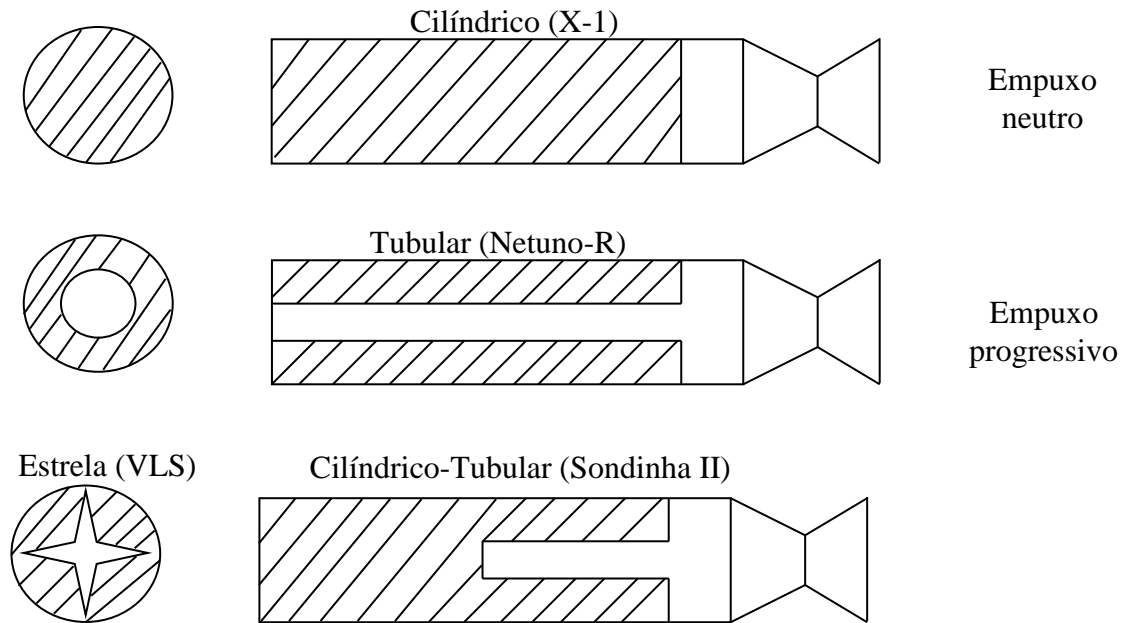


Figura 9. Tipos de grão-propelente.

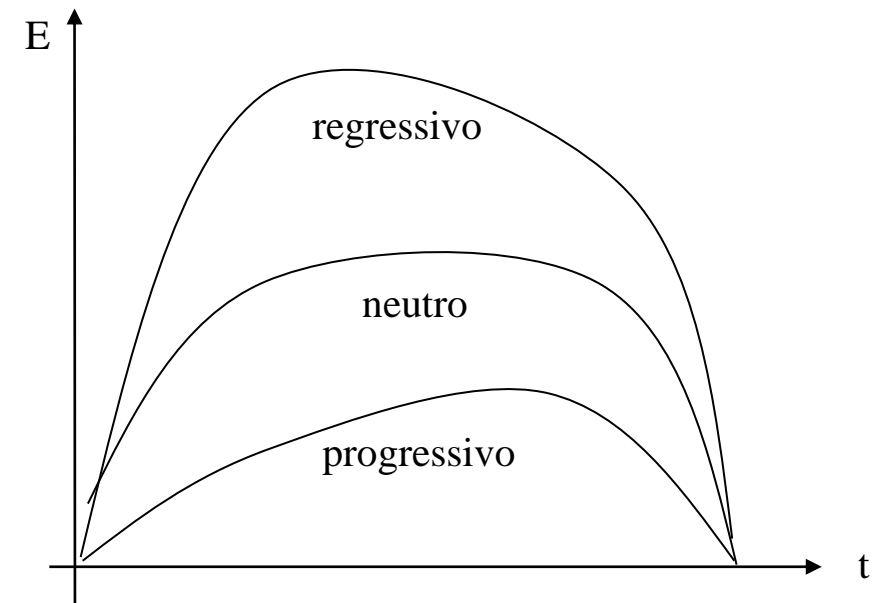


Figura 10. Curvas de empuxo típicas de foguetes.

Mostrar vídeo da queima de um motor C6-7: <https://www.youtube.com/watch?v=xvVJQSGHts&feature=youtu.be>

(Intervalos: 0 a 1:40 e 4:20 a 8:07)

As curvas de empuxo de motores são obtidas experimentalmente através de testes estáticos. Neste tipo de teste, usa-se uma banca experimental (Figura 11), composta por um berço para o motor e uma célula de carga (transdutor ou sensor de força). Um sistema de aquisição de dados computacional obtém os valores do empuxo durante a queima (Figura 12) do propelente do motor.

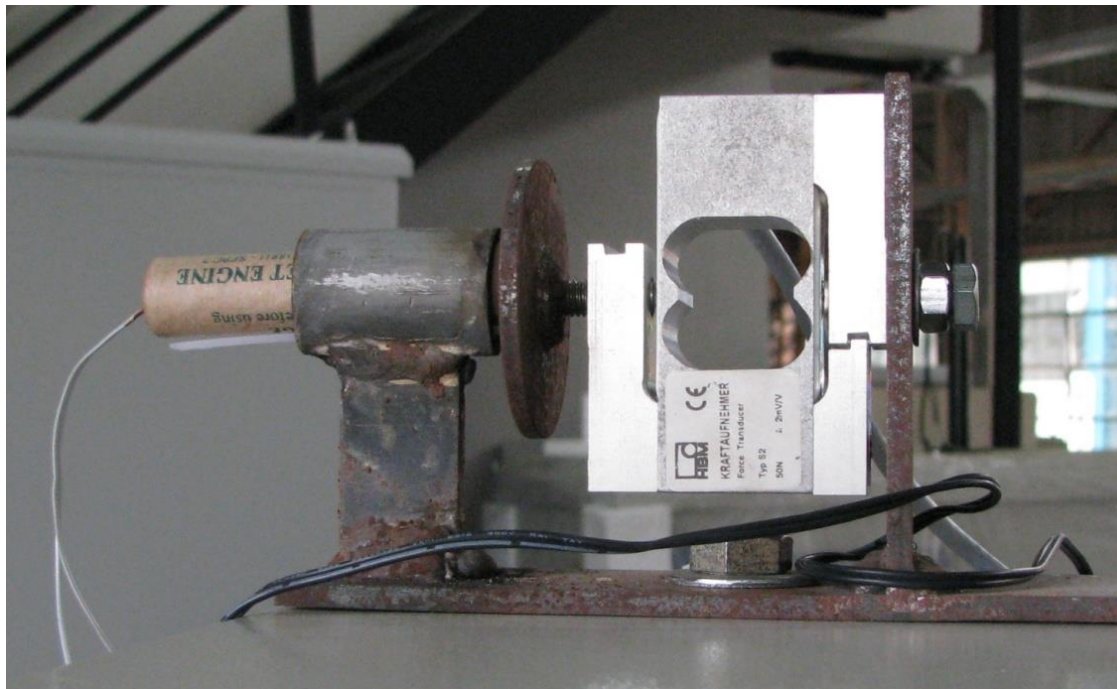


Figura 11. Bancada experimental para obter a curva de empuxo de um motor de foguete modelo preparado para o teste estático, já com o ignitor instalado no motor.

Nas Figuras 13 a 17 são mostradas curvas de empuxo de motores Bandeirante de testes estáticos realizados pelo **Grupo de Foguetes Carl Sagan**, no LMH/UFPR, em Curitiba (PR), em 2010 a 2013.



Figura 12. Um motor da Bandeirante do tipo C6-0 em funcionamento durante a aquisição de dados da sua curva de empuxo em banco estático.

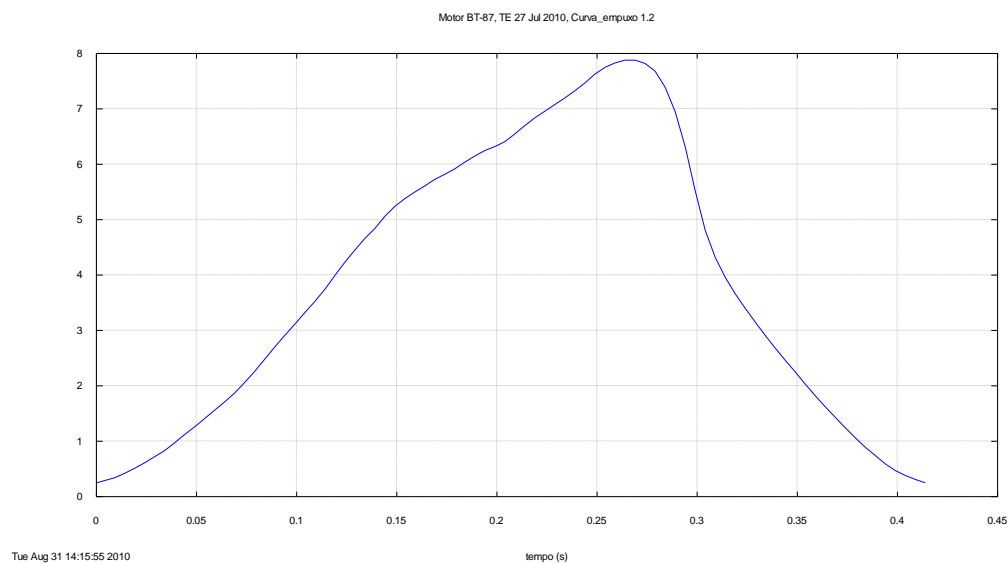


Figura 13. Curva de empuxo *versus* tempo de motor Bandeirante A6-0.

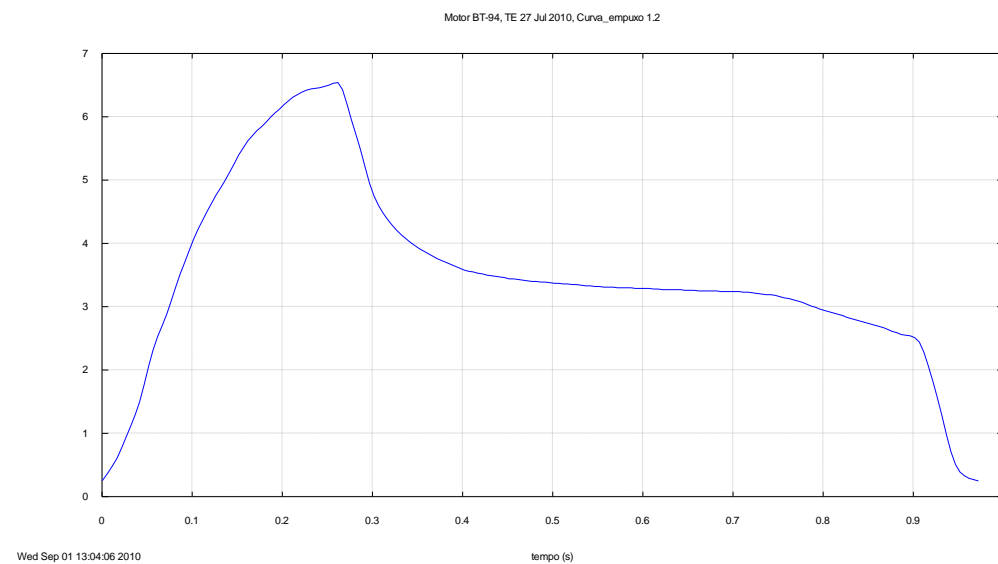


Figura 14. Curva de empuxo *versus* tempo de motor Bandeirante B6-0.

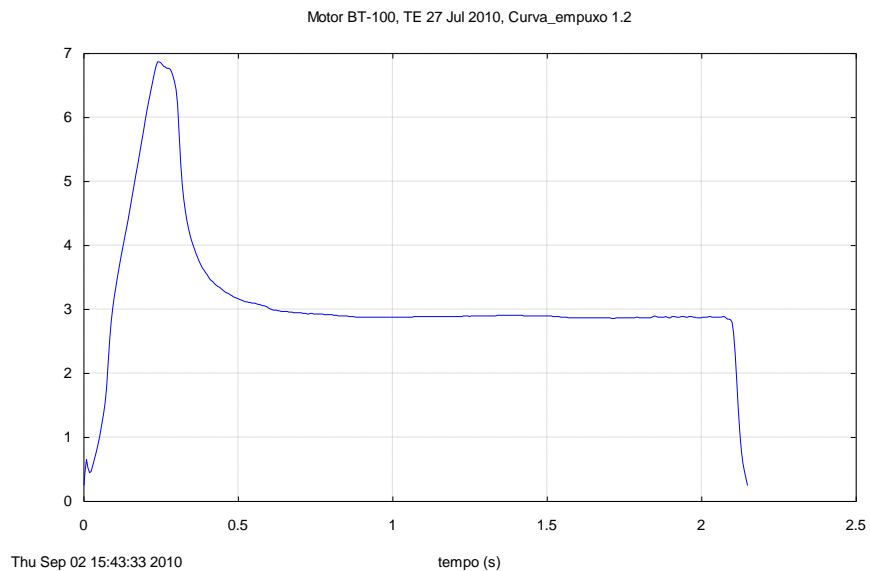


Figura 15. Curva de empuxo *versus* tempo de motor Bandeirante C6-0.

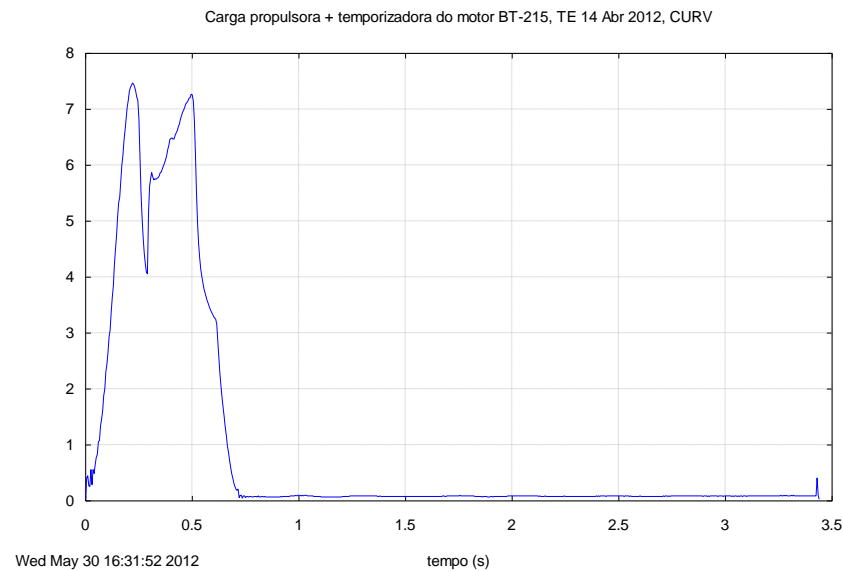


Figura 16. Curva de empuxo *versus* tempo de motor Bandeirante B6-4.

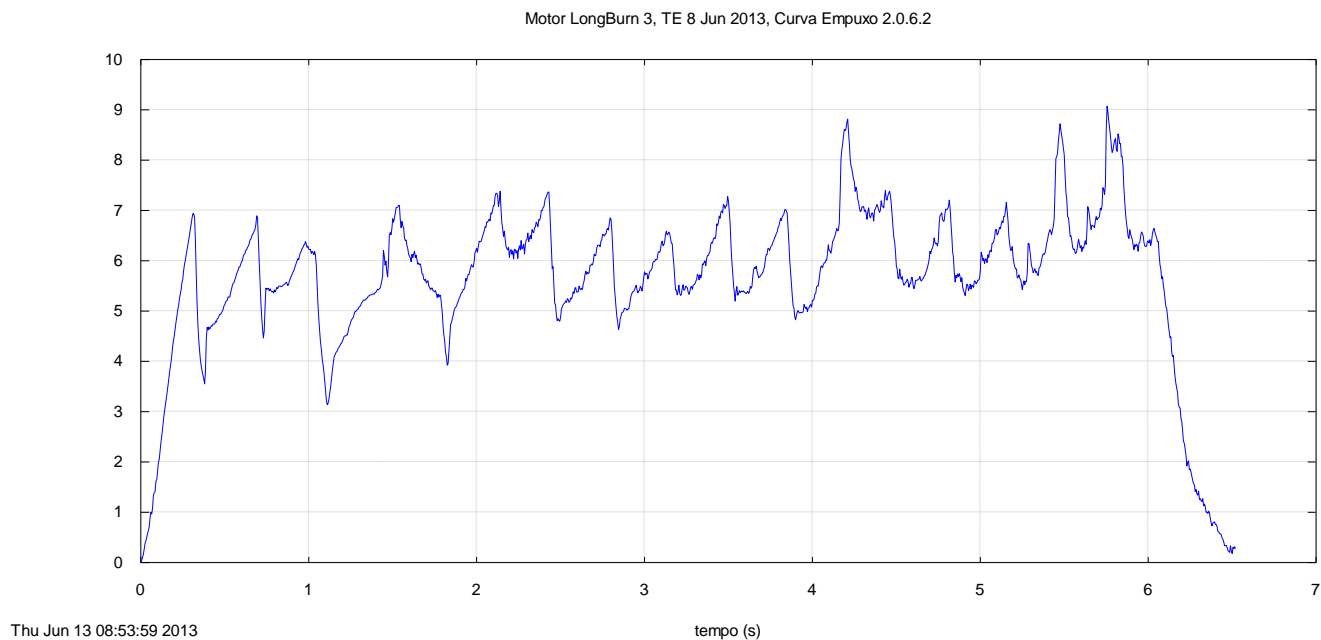


Figura 17. Curva de empuxo *versus* tempo de motor Bandeirante E6-0.

2.4 PARÂMETROS DA CURVA DE EMPUXO

A Figura 8 mostra uma curva de empuxo típica ou característica de foguetemodelos. 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 (I_t): é a quantidade de movimento (massa x velocidade) total produzida pelo motor. O I_t é a integral da curva de empuxo ou a área que está abaixo da curva de empuxo. Ele é definido por

$$I_t = \int_0^{t_q} E \, dt \quad [\text{N.s}] \quad (2.1)$$

Empuxo máximo (E_{\max}): é o valor máximo do empuxo medido em uma curva de empuxo.

Empuxo médio (E_{med}): é o valor de empuxo que multiplicado pelo tempo de queima (t_q) resulta no I_t . Ele é definido por

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

Velocidade média de ejeção dos gases (c): é a velocidade média dos gases na saída da tubeira do motor; esta média é tanto no espaço quanto no tempo. Ela é definida por

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

onde M_p é a massa total de propelente no motor [kg].

Impulso específico médio (Is): é uma medida da eficiência global do motor. Seu valor representa o empuxo produzido durante um segundo por unidade de peso ($M_p \times G$) de propelente consumido. Ele é definido por

$$I_s = \frac{I_t}{M_p G} = \frac{c}{G} = \frac{E_{med} t_q}{M_p G} \quad [s] \quad (2.4)$$

onde G é a aceleração gravitacional ao nível do mar ($9,80665 \text{ m/s}^2$).

Fluxo de massa médio (fm): é a quantidade de massa de propelente consumida por unidade de tempo. Ele é definido por

$$f_m = \frac{M_p}{t_q} \quad [\text{kg/s}] \quad (2.5)$$

A NAR (2017) mantém uma lista (<http://www.nar.org/standards-and-testing-committee/nar-certified-motors/>) de motores comerciais de foguetemodelos que são certificados para uso, nas diversas classes de motores. Outra lista de motores pode ser vista em 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](#), bem como os resultados calculados com as Eqs. (2.2) a (2.5) a partir dos seus dados.

Tabela 2. Parâmetros do motor Apogee A2.

Dados	Resultados
$I_t = 2,47 \text{ Ns}$	$E_{med} = 1,89 \text{ N}$
$t_q = 1,31 \text{ s}$	$c = 823 \text{ m/s}$
$M_p = 0,0030 \text{ kg} = 3,0 \text{ g}$	$I_s = 84,0 \text{ s}$
$G = 9,80665 \text{ m/s}^2$	$f_m = 2,29 \text{ g/s}$

2.5 PROPELENTES DE MINIFOGUETES

Alguns tipos de propelentes de minifoguetes são os seguintes:

- Minifoguete experimental X-1: **micrograin** = 67% Zn (zinco) + 33% S (enxofre). $I_s \sim 30 \text{ s}$
- Minifoguete experimental Netuno-R: **KNSu** = 35% $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ (sacarose) + 65% KNO_3 (nitrato de potássio). $I_s = 50 \text{ a } 100 \text{ s}$
- Foguetemodelos: **pólvora negra** = 14% C (carvão) + 14% S (enxofre) + 72% KNO_3 (nitrato de potássio). $I_s = 60 \text{ a } 100 \text{ s}$.
- **Composite** = Al (alumínio) + NH_4ClO_4 (perclorato de amônia) + CTPB (polibutadieno carboxilado).
 $I_s = 150 \text{ a } 180 \text{ s}$ para foguetemodelos
 $I_s = 220 \text{ a } 280 \text{ s}$ para foguetes de grande porte
- Como referência, em foguetes a propelente líquido: $I_s = 250 \text{ a } 350 \text{ s}$.

Uma estimativa da massa de propelente em função do impulso total é: $M_p \approx I_t$ [g]

Esta estimativa vale aproximadamente para os propelentes pólvora negra e KNSu considerando-se $I_s = 100 \text{ s}$ e I_t em N.s.

2.6 REFERÊNCIAS

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

www.nar.org (2017).

www.thrustcurve.org (2017).

2.7 EXERCÍCIOS (considerar $G = 9,80665 \text{ m/s}^2$)

2.1 Com I_t , t_q e M_p do motor [Estes ½A6-2](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .

2.2 Com I_t , t_q e M_p do motor [Quest A6-4](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .

2.3 Com I_t , t_q e M_p do motor [Estes B6](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .

2.4 Com I_t , t_q e M_p do motor [Quest C6-0](#), calcular E_{med} , c , I_s e f_m .