

## DESEMPENHO EXPERIMENTAL DE SETE TIPOS DE DIVERGENTE DE TUBEIRA DE MOTOR-FOGUETE A PROPELENTE SÓLIDO

**MORO, D. F.**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Curitiba, PR  
difmoro@ufpr.br

**MARCHI, C. H.**

Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Curitiba, PR  
marchi@ufpr.br

**ANDRADE E PAULA, J. R.**

Boa Vista Modelismo Ltda.  
Recife, PE  
atendimento@boavistamodelismo.com.br

**MARQUES, A.**

Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Curitiba, PR  
amarques@ufpr.br

**Resumo:** *O objetivo deste trabalho é verificar experimentalmente o efeito de sete geometrias de divergentes de tubeiras sobre o desempenho de motores-foguete a propelente sólido. As geometrias testadas são quatro cônicas, uma corneta, uma sino e uma reta, todas sem bocal convergente. Foram realizados dez testes estáticos com cada um dos sete tipos de tubeiras, medindo-se a força de empuxo do motor durante a queima do seu propelente, que é a pólvora negra. A partir dos resultados experimentais do empuxo, foram calculados o impulso total, empuxo médio e outros parâmetros. Os resultados experimentais mostram que seis tipos de tubeiras tem desempenho equivalente e maior do que a tubeira do tipo sino.*

**Palavras-chave:** *tubeira, motor-foguete, propulsão, espaçomodelo, minifoguete, propelente sólido*

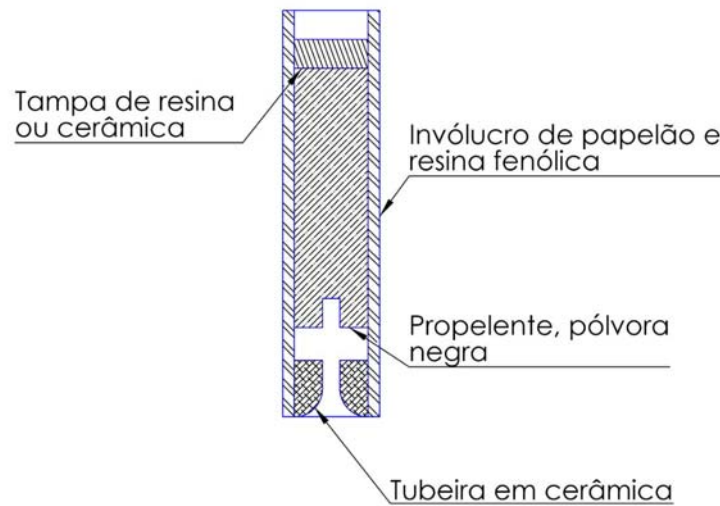
### 1 Introdução

A empresa brasileira Boa Vista Modelismo Ltda. (Bandeirante, 2014) fabrica motores-foguete para espaçomodelos (Fig. 1), também chamados de minifoguetes. Estes motores tem estrutura em papelão, pólvora negra como propelente, fechamento de resina e tubeira de cerâmica, conforme a Fig. (2). A tubeira padrão usada pela Bandeirante é do tipo corneta (Fig. 3), com razão de expansão de áreas ( $\varepsilon$ ) 10,0. Já a fabricante norte-americana Estes (2013) usa razão de expansão 2,0 e geometria cônica, para motores com empuxo equivalente aos da Bandeirante, e com o mesmo tipo de propelente. Os dois fabricantes usam tubeiras sem bocal convergente.

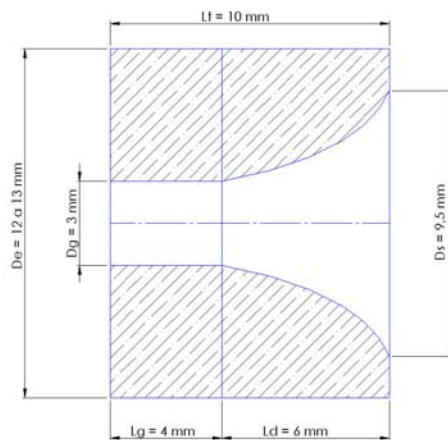
Segundo a teoria (Sutton, 1992) de escoamento 1D em tubeiras, o  $\varepsilon$  usado pela Estes é compatível com o nível de empuxo de seus motores, enquanto que o  $\varepsilon$  da Bandeirante é extremamente alto, teoricamente levando a superexpansão e perda grande de empuxo do motor. Isso nos motivou a projetar algumas geometrias de divergentes e verificar experimentalmente seus efeitos sobre o empuxo produzido pelo motor.



**Figura 1. Decolagem de um espaçomodelo**



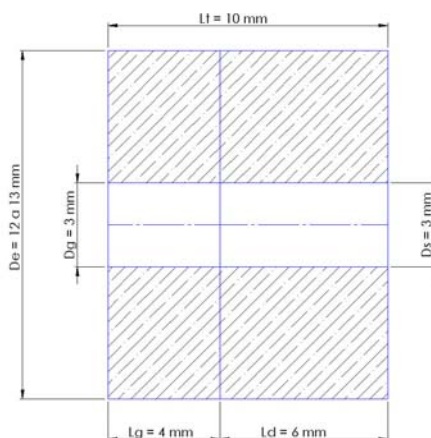
**Figura 2. Esquema do motor-foguete de um espaçomodelo**



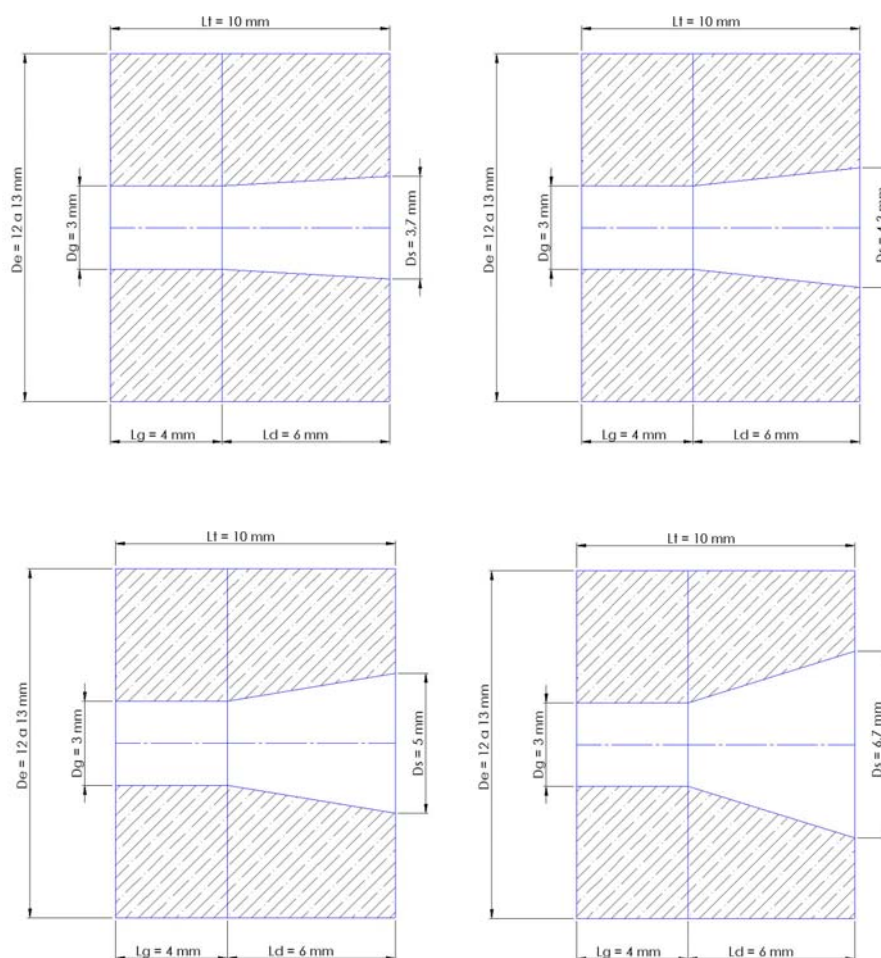
**Figura 3. Tuboira padrão da Bandeirante, do tipo corneta (geometria VI)**

## 2 Dados dos motores e tubeiras testados

Neste trabalho foram testadas sete geometrias de divergentes de tubeiras. Na Fig. (4) é mostrada a geometria do tipo I que é simplesmente um duto de diâmetro constante entre a câmara de combustão e o ambiente; pode-se chamar de tubeira reta. Na Fig. (5) são mostradas quatro geometrias de tubeiras cônicas. E, finalmente, na Fig. (6) é apresentada a geometria da tubeira do tipo sino.



**Figura 4. Tubeira reta: geometria do tipo I**



**Figura 5. Tubeiras cônicas: geometrias do tipo II a V**

Nas Figs. (3) a (5) são apresentadas as dimensões nominais de projeto. Nestas figuras,  $D_g$ ,  $D_s$  e  $D_e$  são respectivamente os diâmetros da garganta, de saída e externo da tubeira; e  $L_g$ ,  $L_d$  e  $L_t$  são os comprimentos da garganta, do divergente e total da tubeira.

Para este trabalho, foram fabricados dez motores para cada um dos sete tipos de geometrias de tubeiras, resultando em 70 motores, mostrados na Fig. (7).

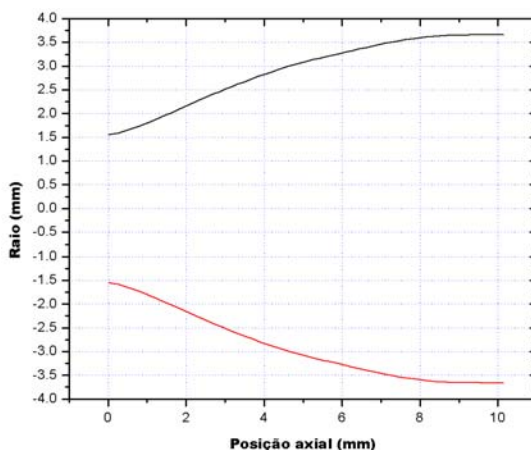


Figura 6. Tubeira do tipo sino (geometria VII)



Figura 7. Foto dos 70 motores testados

A Tab. (1) apresenta os valores reais médios das tubeiras fabricadas, bem como suas incertezas (U), para confiabilidade de 95%, calculadas conforme ABNT (1997). Os diâmetros de garganta foram obtidos utilizando-se cilindros padrão.

Tabela 1. Diâmetros de garganta e de saída, e razão de expansão reais das tubeiras

Tipo de Tubeira	I	II	III	IV	V	VI	VII
Dg (mm)	3,008	2,973	2,984	2,816	2,649	2,795	2,883
U de Dg (mm)	0,072	0,120	0,311	0,122	0,153	0,111	0,262
U de Dg (%)	2,377	4,051	10,418	4,338	5,775	3,980	9,095
Ds (mm)	3,131	3,493	4,182	4,693	6,304	12,095	7,269
U de Ds (mm)	0,054	0,084	0,129	0,174	0,132	0,356	0,084
U de Ds (%)	1,717	2,403	3,076	3,717	2,099	2,946	1,158
$\epsilon$	1,083	1,380	1,964	2,777	5,663	18,726	6,357

A Tab. (2) apresenta os valores reais médios dos seguintes parâmetros dos motores-foguete fabricados: diâmetro externo ( $D_e$ ); comprimento total ( $L_m$ ); massa antes do teste estático ( $M_o$ ); massa depois do teste estático ( $M_f$ ); e massa de propelente ( $M_p$ ), definida pela diferença entre  $M_o$  e  $M_f$ . Além disso, esta tabela apresenta a incerteza (U) para confiabilidade de 95%. Todas as medidas de massa foram obtidas com base numa medição de 1 min em uma balança Marte AY220, com resolução de 0,1 mg. Todas as medidas de comprimento foram obtidas com base na média de 3 medições com um paquímetro digital de 150 mm, Lee Tools, com resolução de 0,01 mm.

**Tabela 2. Dados dos motores-foguete**

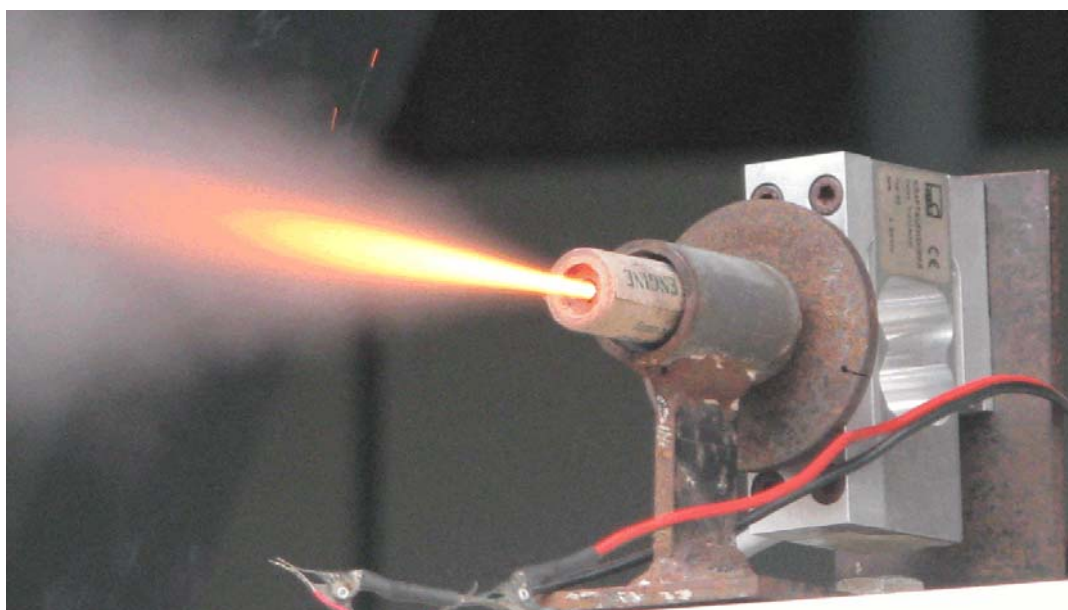
Tipo de Tubeira	I	II	III	IV	V	VI	VII
De (mm)	17.290	17.333	17.207	17.322	17.300	17.353	17.275
U de De (mm)	0,505	0,190	0,178	0,202	0,276	0,171	0,410
U de De (%)	2,922	1,098	1,032	1,167	1,595	0,988	2,371
Lm (mm)	69,897	69,895	69,917	69,971	69,955	69,978	70,072
U de Lt (mm)	0,118	0,092	0,136	0,308	0,105	0,130	0,217
U de Lt (%)	0,169	0,132	0,195	0,440	0,150	0,186	0,310
Mo (g)	19,944	19,797	19,640	19,876	19,573	19,859	19,792
U de Mo (g)	1,652	0,707	1,254	1,024	1,168	0,808	0,935
U de Mo (%)	8,281	3,572	6,384	5,151	5,969	4,067	4,723
Mf (g)	13,125	13,015	12,754	13,147	12,841	13,066	12,707
U de Mf (g)	1,388	0,406	0,521	0,453	0,956	0,614	1,199
U de Mf (%)	10,575	3,118	4,081	3,444	7,444	4,698	9,433
Mp (g)	6,820	6,782	6,886	6,730	6,732	6,793	7,084
U de Mp (g)	0,551	0,371	0,843	1,166	0,488	0,822	1,227
U de Mp (%)	8,078	5,467	12,235	17,326	7,246	12,106	17,326

O propelente utilizado nos motores-foguete da Bandeirante é a pólvora negra, constituída por 68,18% de  $\text{KNO}_3$ , 22,73% de C e 9,09% de S, em massa. Esta é a composição química ótima para o propelente da Bandeirante, no entanto, como o próprio fabricante diz, esta composição não é nada sem um rigoroso controle da granulometria de cada componente. Quanto maior é a área de contato entre o oxidante e o combustível, mais rápida é a reação química.

### 3 Resultados

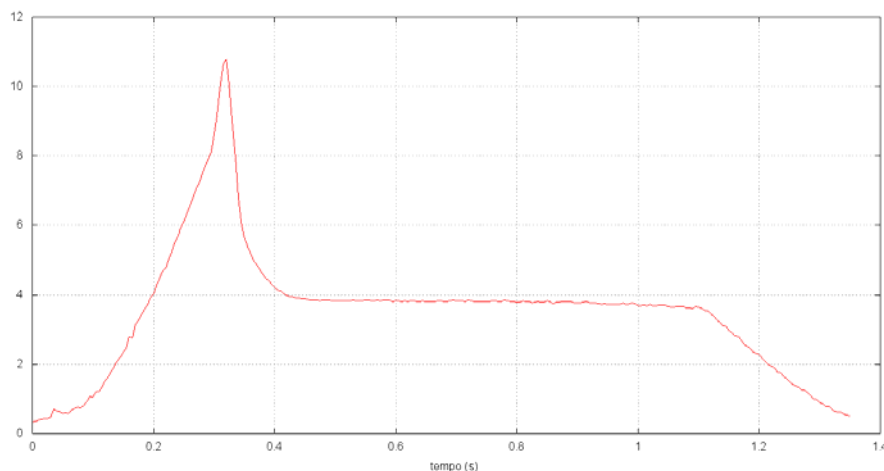
Os 70 motores foram testados em outubro de 2013. A bancada experimental usada durante cada teste estático dos motores pode ser vista na Fig. (8), mostrando um motor durante a sua queima. Nesta mesma figura, também é mostrada a célula de carga empregada, que é do tipo S2, de 50 N, da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH), cuja classe de acurácia é de 0,025 N. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o Spider 8 da HBM, com o aplicativo computacional Catman 4.5.

Em cada teste estático, obteve-se a força de empuxo do motor durante o tempo de queima do propelente com frequência de aquisição de dados de 200 Hz, resultando em 0,005 s o intervalo de tempo entre duas medidas consecutivas. Os motores-foguete ficaram com seu eixo longitudinal na posição horizontal durante a queima, como pode ser visto na Fig. (8). Detalhes do procedimento experimental empregado podem ser vistos em Marchi (2010).

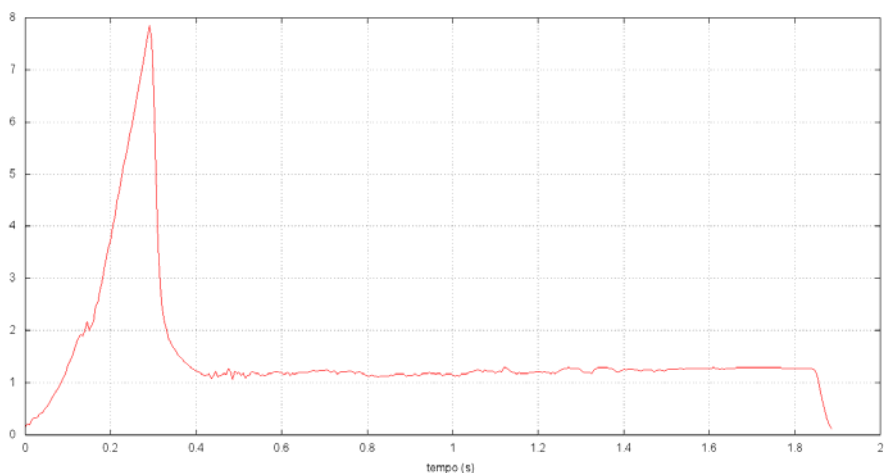


**Figura 8. Motor-foguete em funcionamento no banco estático usado**

As Figs. (9) e (10) mostram a curva de empuxo versus tempo obtida com dois tipos de geometrias de tuberias.



**Figura 9. Curva de empuxo de um motor com tubeira do tipo corneta (geometria VI)**



**Figura 10. Curva de empuxo de um motor com tubeira do tipo sino (geometria VII)**

A Tab. (3) apresenta os valores reais médios dos seguintes parâmetros dos motores-foguete testados: classe, impulso total ( $I_t$ ), empuxo médio ( $E_{med}$ ), tempo de queima do propelente ( $t_q$ ), impulso específico ( $I_s$ ), fluxo de massa do propelente ( $\dot{m}$ ) e velocidade média efetiva dos gases ( $c$ ). As definições destes parâmetros bem como a forma de calculá-los podem ser vistas em Marchi (2010). Na Tab. (3) também é apresentada a incerteza ( $U$ ) para confiabilidade de 95% de cada parâmetro.

A classe de um motor de espaçomodelo (NAR, 2004) representa um intervalo de  $I_t$ . As classes A, B e C referem-se aos intervalos respectivos de 0 a 2,50 Ns, 2,51 a 5,00 Ns, e 5,01 a 10,00 Ns. O número junto à classe refere-se ao empuxo médio arredondado para um número inteiro.

A Fig. (11) apresenta o valor do impulso total dos motores testados, bem como a incerteza. Pode-se ver que quase todos os motores resultaram em  $I_t$  dentro da faixa da classe B, com alguns motores classificados como classe C e outros na classe A. Segundo o fabricante, todos estes motores deveriam ser da classe C.

O método de Chauvenet (1960) foi utilizado para diminuir a incerteza dos resultados experimentais. Foram descartados quatro resultados de impulso total discrepantes de todos os 70 motores para compilar os resultados da Fig. (11) e Tab (3). Para a comparação de empuxo médio da Tab. (3), foram descartados 12 resultados dos 70 motores.

Tabela 3. Resultados dos testes estáticos dos motores

Tipo de Tubeira	I	II	III	IV	V	VI	VII
Classe	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B2
It (N.s)	4,518	4,435	4,323	4,601	4,322	4,648	2,762
U de It (N.s)	0,565	0,343	0,999	1,068	0,972	0,173	0,915
U de It (%)	12,504	7,743	23,119	23,205	22,483	3,722	33,125
Emed (N)	2,655	2,600	2,637	2,711	2,680	3,032	1,626
U de Emed (N)	0,265	0,206	1,159	0,569	0,943	1,192	0,434
U de Emed (%)	9,997	7,908	43,953	20,999	35,182	39,328	26,721
ta (s)	1,641	1,704	1,668	1,443	1,491	1,444	1,665
U de ta (s)	0,302	0,207	0,988	1,878	2,431	3,187	3,654
U de ta (%)	18,399	12,169	59,273	130,118	163,030	220,752	219,521
Is (s)	68,892	65,854	64,052	69,876	65,413	72,148	41,187
U de Is (s)	47,269	43,841	43,593	47,461	42,754	48,612	25,785
U de Is (%)	68,613	66,573	68,059	67,922	65,360	67,379	62,605
fm (g/s)	4,439	3,981	4,165	4,611	4,304	4,633	4,286
U de fm (g/s)	3,034	1,369	1,172	1,940	0,975	1,631	2,106
U de fm (%)	68,348	34,382	28,148	42,077	22,650	35,192	49,138
c (m/s)	675,601	645,803	628,140	685,252	641,478	707,526	403,909
U de c (m/s)	469,422	441,845	444,717	488,201	448,234	510,287	291,375
U de c (%)	69,482	68,418	70,799	71,244	69,875	72,123	72,139

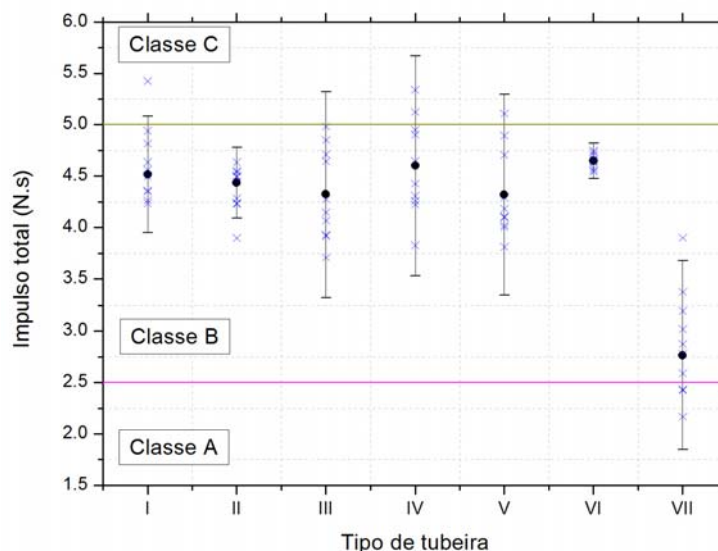


Figura 11. Impulso total dos motores testados

#### 4 Conclusão

Considerando-se o impulso total médio de cada tipo de tubeira, verificou-se que a tubeira do tipo corneta (VI) é a melhor, seguida de perto pela tubeira reta (I) e as quatro cônicas (II a V).

A tubeira do tipo sino (VII) tem desempenho claramente inferior aos outros seis tipos. Talvez isso se deva ao fato dela ter sido fabricada sem a seção constante de 4 mm de comprimento na garganta, como mostrado na Fig. (6). A ausência desta seção pode ser uma das causas para o reduzido impulso total e também empuxo médio dos motores com este tipo de tubeira, além da sua própria geometria.

A Bandeirante está utilizando a melhor tubeira em seus motores entre os sete tipos testados.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), AEB (Agência Espacial Brasileira) através do Programa Uniespaço, e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). O primeiro autor é bolsista da CAPES. O segundo autor é bolsista do CNPq.

## 6 Referências

- ABNT, Guia para expressão da incerteza de medição, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1997.
- Bandeirante, Disponível em: <<http://www.boavistamodelismo.com.br/>>. Acesso em 31 mar 2014.
- Chauvenet, W., A Manual of Spherical and Practical Astronomy V. II. 1863. Reprint of 1891. 5th ed. Dover, N.Y.: 1960. pp. 474 - 566.
- Estes, About Estes, Disponível em: <<http://www.estesrockets.com/about-estes>>. Acesso em 19 jul 2013.
- Marchi, C.H., Testes estáticos de 27 Jul e 13 Set 2010 de motores-foguete do tipo BT de espaçomodelos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- NAR, United States Model Rocketry Sporting Code, National Association of Rocketry, 2004. p.2.
- Sutton, G.P., Rocket Propulsion Elements, 6 ed., John Wiley & Sons. Inc., New York, 1992.