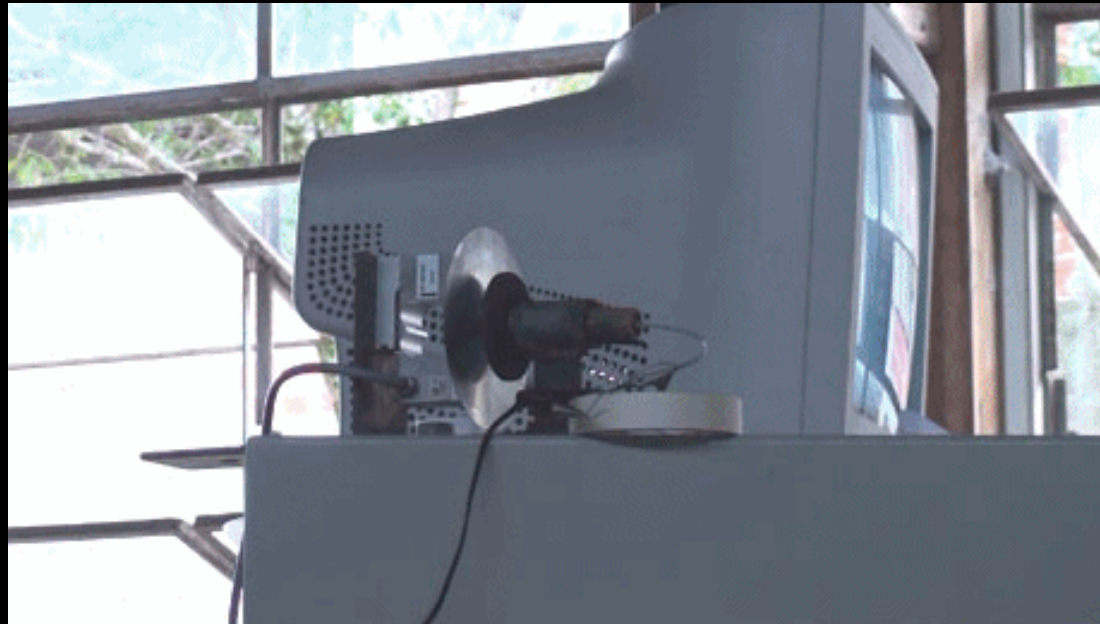


Determinação do desempenho de motores- foguete Bandeirante dos tipos B6-4, C20-0 e D20-0 para espaçomodelos



Aluno: Éderson L. dos S. Dias

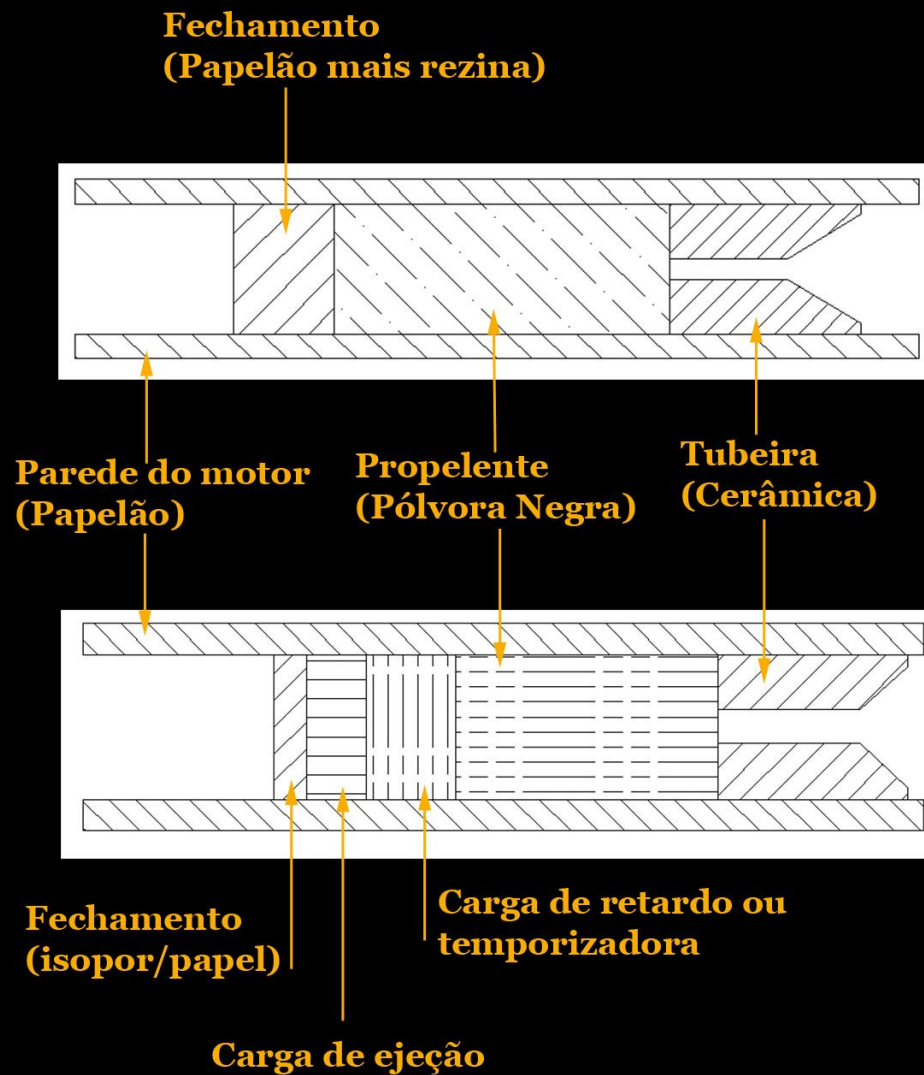
Orientador: Carlos H. Marchi

Colaboradores: Diego F. Moro e Luciano K. Araki

O objetivo deste trabalho foi testar e avaliar se o desempenho, a segurança e a funcionalidade dos motores-foguete das classes **B6-4**, **C20-0** e **D20-0** estão de acordo com as classes e as características especificadas pela fabricante **Bandeirante** (Bela Vista Modelismo Ltda.)



Componentes do motor-foguete



Descrição dos componentes do motor-foguete

Retirada da carga ejetora



Classificação dos motores

- **Motores B6-4:** Impulso total variando de 2,51 Ns a 5,00; Empuxo médio de 6 N; Carga de retardo deverá durar 4 s.
- **Motores C20-0:** Impulso total variando de 5,01 a 10,00 Ns; Empuxo médio de 20 N .
- **Motores D20-0:** seu impulso total deverá variar entre 10,01 Ns a 20,00 Ns ; Empuxo médio de 20 N;



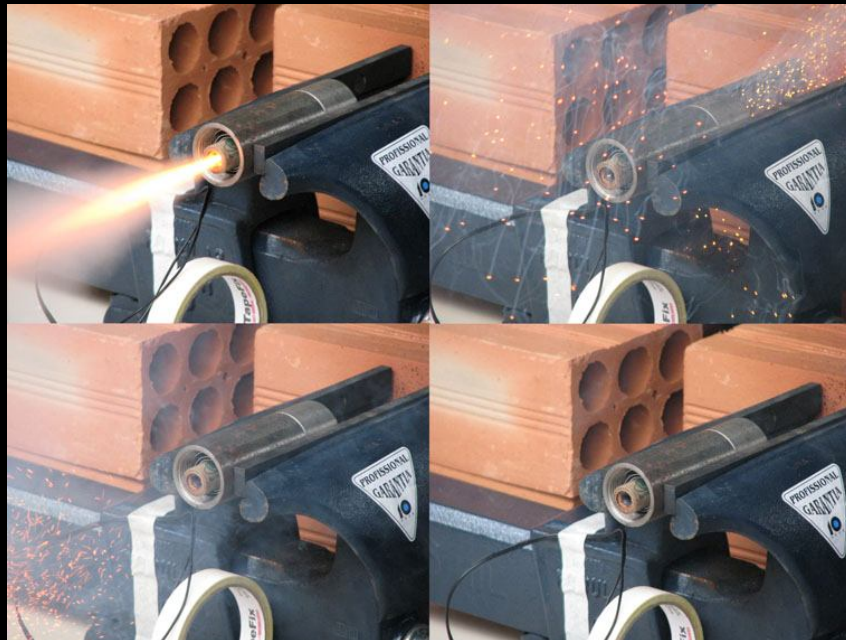
Definição dos códigos

Testes de resistência

Em 3 de março de 2012, foram executados 18 testes de Resistência (6 motores de cada classe). A integridade dos motores foi mantida em todos os testes.



Motores B6-4, C20-0 e D20-0



Teste de resistência



Tampa de isopor e tubeira dos motores B6-4

Testes de curva de empuxo

Posteriormente foram escolhidos aleatoriamente, de um determinado lote, mais 10 motores de cada classe, totalizando 30 motores. Eles foram testados em 14 Abr 2012. Foram executadas análises estatísticas para as dimensões, para as massas e para as análises das curva de empuxo.

$$Y_{med} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}$$

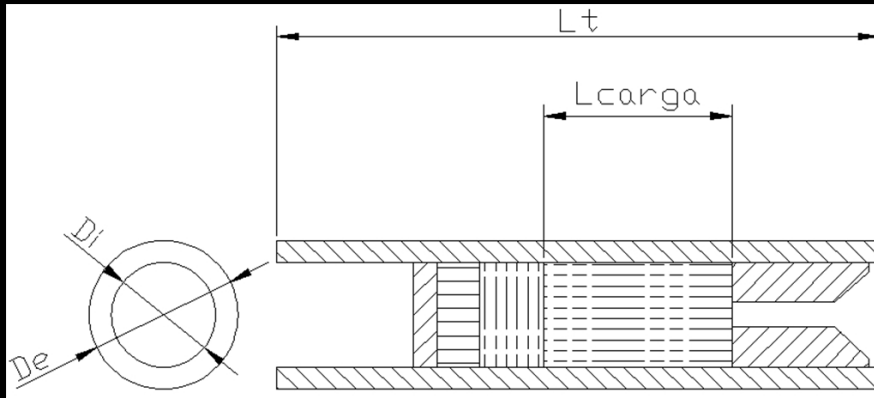
$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{med})^2}{N - 1}}$$

$$U(\%) = \frac{U}{Y_{med}}$$

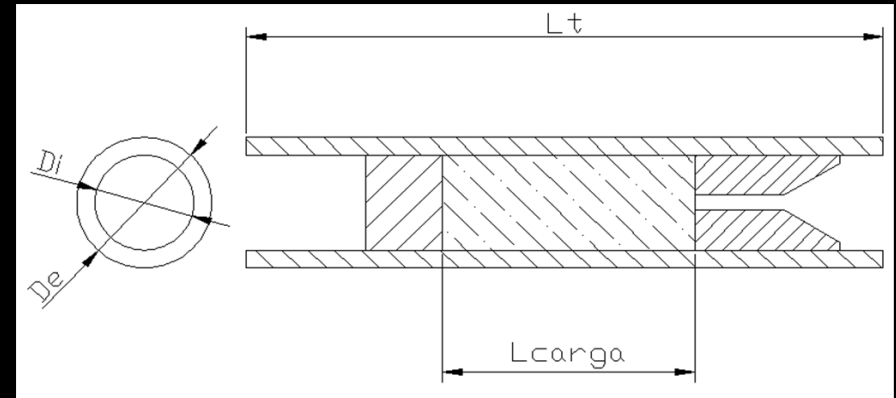
$$\nu = N - 1$$

Fórmulas estatísticas básicas usadas, onde, para cada ν , usamos um fator de abrangência (k) em um intervalo de confiança de 95%.

Dimensões



Dimensões dos motores B6-4



Dimensões dos motores C20-0 e D20-0

Motores	B6-4	C20-0	D20-0
L_t (mm)	70,10	70,09	100,00
U de L_t (mm)	0,21	0,12	0,85
U de L_t (mm) %	0,30	0,17	0,85
D_e (mm)	17,24	17,22	17,22
U de D_e (mm)	0,18	0,21	0,18
U de D_e (mm) %	1,0	1,2	1,0
D_i (mm)	11,98	12,00	12,33
U de D_i (mm)	0,42	0,31	0,31
U de D_i (mm) %	3,5	2,6	2,5
L_{carga} (mm)	29,7	28,6	36,9
U de L_{carga} (mm)	1,6	4,2	4,9
U de L_{carga} (mm) %	5,3	15	13,3
Vol (cm ³)	3,35	3,24	4,40
U de Vol (cm ³)	0,26	0,55	0,59
U Vol (cm ³) %	7,9	17	13

Tabela com os principais resultados

Massa

Mt: Massa total do motor, conforme recebido do fabricante.

M0: Massa do motor após a retirada de sua carga ejetora.

Me: Massa da carga ejetora.

Mi: Massa da tampa de isopor.

Mf: Massa do motor após a queima.

Mp: Massa do propelente, que é a diferença entre a massa total do motor-foguete antes e depois da queima.

Motores	B6-4	C20-0	D20-0
Mt (g)	15,88	18,35	22,7
U de Mt (g)	0,69	0,71	1,0
U de Mt (g) %	4,4	3,9	4,6
M0 (g)	15,67	--	--
U de M0 (g)	0,63	--	--
U de M0 (g) %	4,0	--	--
Me (g)	0,194	--	--
U de Me (g)	0,078	--	--
U de Me (g) %	40	--	--
Mi (g)	0,0136	--	--
U de Mi (g)	0,0092	--	--
U de Mi (g)%	68	--	--
Mf (g)	9,26	11,89	14,1
U de Mf (g)	0,65	0,97	2,2
U de Mf (g) %	7,0	8,1	16
Mp (g)	6,41	6,45	8,6
U de Mp (g)	0,65	0,55	2,1
U de Mp (g)%	10	8,7	24

Tabela com os principais resultados e suas respectivas incertezas

Curva de empuxo

tq: Tempo de queima do propelente;

$$\text{Empuxo médio: } E_{med} = \frac{I_t}{t_q}$$

$$\text{Impulso Total: } I_t = \int_0^{t_q} E \cdot dt$$

$$\text{Impulso específico: } I_s = \frac{I_t}{g \cdot M_p}$$

E_{max}: Empuxo máximo;

$$\text{fm: Fluxo de massa médio: } f_m = \frac{M_p}{t_q}$$

c: Velocidade de exaustão efetiva média:

$$c = \frac{I_t}{M_p}$$

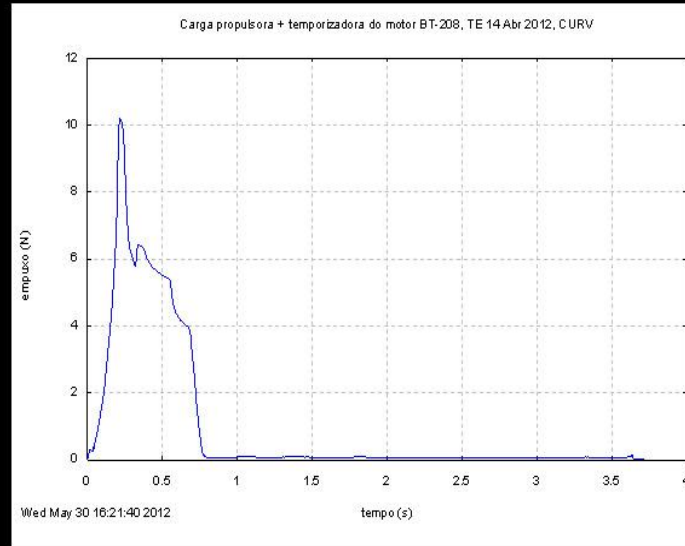
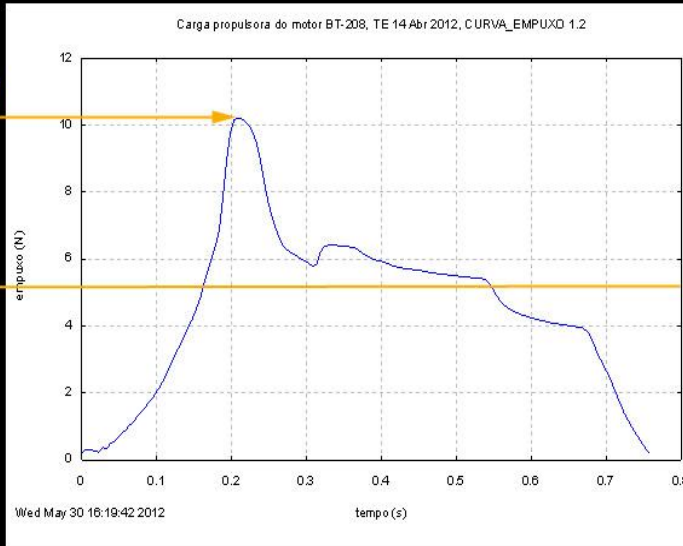
Motores	B6-4	C20-0	D20-0
Classe	B4-2	B5-0	C5-0
I _t (Ns)	3,23	4,77	6,19
U de I _t (Ns)	0,72	0,24	0,73
U de I _t (%)	22	5,1	12
E _{med} (N)	4,25	4,8	5,25
U de E _{med} (N)	0,89	2,1	0,91
U de E _{med} (%)	21	44	17
t _q (s)	0,76	1,03	1,18
U de t _q (s)	0,10	0,37	0,21
U de t _q (%)	13	35	17
I _s (s)	51,3	75,5	75,5
U de I _s (s)	6,8	7,3	6,3
U de I _s (%)	13	9,7	8,4
E _{max} (N)	9,6	10,8	9,7
U de E _{max} (N)	5,8	9,6	4,4
U de E _{max} (%)	60	89	45
f _m (g/s)	8,4	6,4	7,08
U de f _m (g/s)	1,3	2,1	0,77
U de f _m (%)	16	33	11
c (m/s)	504	740	740
U de c (m/s)	67	72	62
U de c (%)	13	9,7	8,4

Tabela com os resultados e suas respectivas incertezas das curvas de empuxo

Gráficos

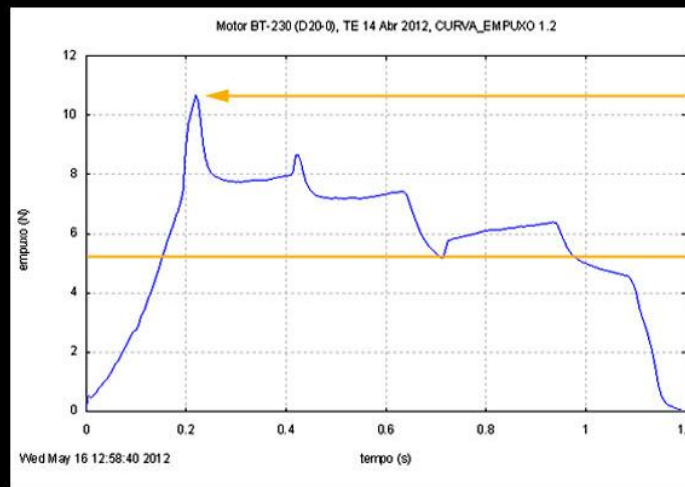
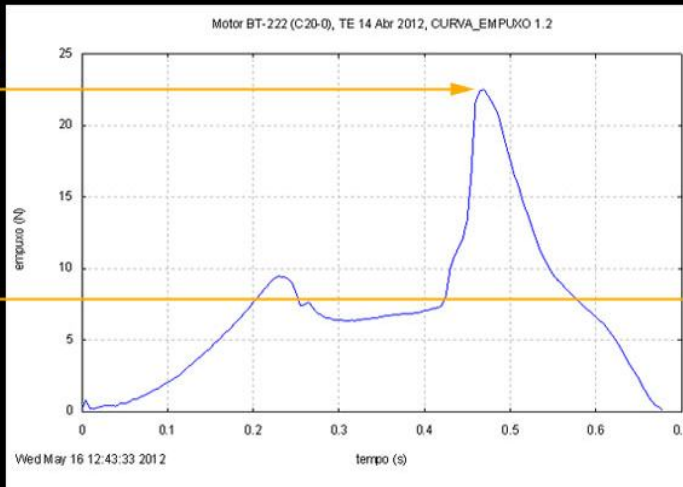
$E_{max} = 10,20 \text{ N}$

$E_{med} = 4,62$



$E_{max} = 22,52 \text{ N}$

$E_{med} = 7,06 \text{ N}$



$E_{max} = 10,69 \text{ N}$

$E_{med} = 5,73 \text{ N}$

Análise de tempo

tqpe (s): Tempo de queima da carga propulsora obtida pelo programa curva_empuxo1.2;

tqpf (s): Tempo de queima da carga propulsora obtida pelo número de quadros das filmagens;

teje (s): Tempo de queima da carga propulsora mais a carga temporizadora (programa curva_empuxo1.2);

tejf (s): Tempo de queima da carga propulsora mais a carga temporizadora (filmagens);

tqte (s): Tempo de queima da carga temporizadora (programa curva_empuxo1.2);

tqtf (s): Tempo de queima da carga temporizadora (filmagens);

Motores	B6-4	C20-0	D20-0
tqpe (s)	0,76	1,03	1,18
U de tqpe (s)	0,10	0,37	0,21
U de tqpe %	13,34	35	17
tqpf(s)	0,77	1,03	1,17
U de tqpf (s)	0,10	0,36	0,23
U de tqpf %	13	35	20
teje(s)	3,58	--	--
U de teje (s)	0,33	--	--
U de teje %	9,3	--	--
tejf (s)	3,2	--	--
U de tejf (s)	2,7	--	--
U de tejf %	85	--	--
tqte (s)	2,4	--	--
U de tqte (s)	2,6	--	--
U de tqte%	108	--	--
tqtf (s)	2,4	--	--
U de tqtf (s)	2,6	--	--
U de tqtf%	108	--	--

Comparação entre os tempos do programa curva_empuxo1.2 e a filmadora

Conclusões das análises de tempo

$$\text{Tempo de filmagem} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de Quadros}}{30}$$

Levando em consideração a limitação do número de quadros da **filmadora**, e os erros de arredondamentos e computacionais do programa **curva_empuxo1.2**, concluímos que os valores dos parâmetros obtidos pela **filmadora** correspondem aos valores do programa **curva_empuxo1.2**.

Classe	tqpe (s)	tqpf (s)	teje (s)	tejf (s)	tqte (s)	tqtf (s)
B6-4	0,76 ± 0,10	0,77 ± 0,10	3,58 ± 0,33	3,2 ± 2,7	2,4 ± 2,6	2,4 ± 2,6
C20-0	1,03 ± 0,37	1,03 ± 0,36				
D20-0	1,18 ± 0,21	1,17 ± 0,23				

Resultados finais das comparações dos tempos obtidos na filmadora e no programa Curva_empuxo 1.2

Conclusões para os motores B6-4

Os motores B6-4 apresentaram um desempenho equivalente a um B4-2. Mantiveram sua integridade em todos os testes. Porém os motores BT-207, BT-213 e BT-214 foram descartados das análises de curva de empuxo por terem apresentado comportamentos anômalos.



Motores B6-4 após os testes de curva de empuxo

Impulso total (**It**): $3,23 \pm 0,72$ Ns

Empuxo médio (**Emed**): $4,25 \pm 0,89$ N

Tempo de queima carga propulsora (**tqpe**): $0,76 \pm 0,10$ s

Tempo de queima carga temporizadora (**tete**): $2,4 \pm 2,6$ s

Massa total (**Mt**): $15,88 \pm 0,69$ g

Massa final (**Mf**): $9,26 \pm 0,65$ g

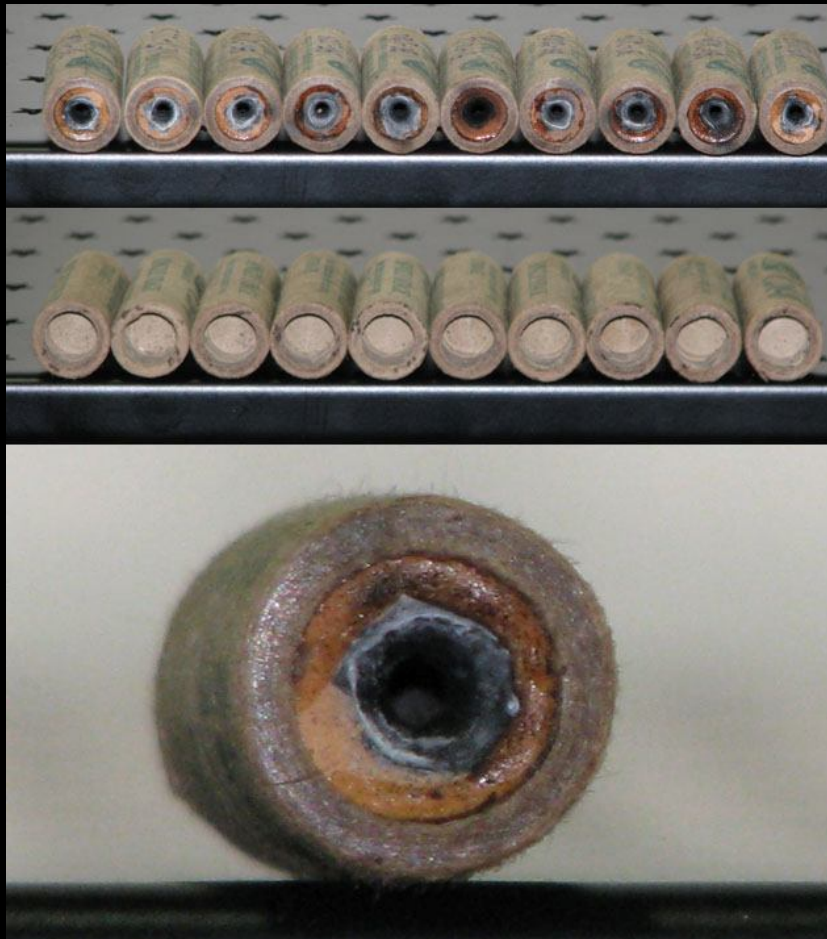
Massa de propelente (**Mp**): $6,41 \pm 0,65$ g

Comprimento Total (**Lt**): $70,10 \pm 0,21$ mm

Volume da carga (**Vol**): $3,35 \pm 0,26$ mm³

Conclusões para os motores C20-0

Os motores C20-0 apresentaram um desempenho equivalente de B5-0. Mantiveram sua integridade em todos os testes.



Impulso total (**It**): $4,77 \pm 0,24$ Ns

Empuxo médio (**Emed**): $4,8 \pm 2,1$ N

Tempo de queima carga propulsora (**tqpe**): $1,03 \pm 0,37$ s

Massa total (**Mt**): $18,35 \pm 0,71$ g

Massa final (**Mf**): $11,89 \pm 0,97$ g

Massa de propelente (**Mp**): $6,45 \pm 0,55$ g

Comprimento Total (**Lt**): $70,09 \pm 0,12$ mm

Volume da carga (**Vol**): $3,24 \pm 0,55$ mm³

Motores C20-0 após os testes de curva de empuxo

Conclusões para os motores D20-0

Os motores D20-0 apresentaram um desempenho equivalente de C5-0. Mantiveram sua integridade em todos os testes, exceto para o motor BT-231, que teve sua tampa e tubeira parcialmente estouradas.



Motores D20-0 após os testes de curva de empuxo

Impulso total (**It**): $6,19 \pm 0,73$ Ns

Empuxo médio (**Emed**): $5,25 \pm 0,91$ N

Tempo de queima carga propulsora (**tqpe**): $1,18 \pm 0,21$ s

Massa total (**Mt**): $22,7 \pm 1,0$ g

Massa final (**Mf**): $14,1 \pm 2,2$ g

Massa de propelente (**Mp**): $8,6 \pm 2,1$ g

Comprimento Total (**Lt**): $100,00 \pm 0,85$ mm

Volume da carga (**Vol**): $4,40 \pm 0,59$ mm