

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS

5.1 - DESEMPENHO DOS PROTÓTIPOS

Na Tab. 8 são apresentados os valores do empuxo máximo (E_{max}), impulso total (I_t), empuxo médio (E_{med}), tempo de queima (t_q) e velocidade de queima do grão-propelente (r), massa de propelente consumida por segundo (\dot{m}), velocidade de ejeção dos gases (v_e) e impulso específico (I_{sp}) para os testes estáticos cujas curvas de empuxo foram apresentadas.

Os valores de r , \dot{m} , v_e e I_{sp} são valores médios constantes durante o tempo de queima do grão-propelente de cada ensaio e calculados pelas seguintes expressões.

$$r = e / t_q \quad (1)$$

$$\dot{m} = m_p / t_q \quad (2)$$

$$v_e = E_{med} / \dot{m} \quad (3)$$

$$I_{sp} = I_t / (m_p * g) \quad (4)$$

onde $g = 9.80 \text{ m/s}^2$.

Para o cálculo de "r" foi admitido que a queima ocorre apenas na direção transversal do grão-propelente. A espessura "e" foi considerada igual a 6.6 mm.

5.2 - SIMULAÇÃO DE TRAJETÓRIA

O desempenho do MF Netuno-R, em vôo, foi simulado considerando-se as dez curvas de empuxo já apresentadas e utilizando a metodologia numérica descrita em [6].

Os dados usados nestas simulações são:

- tempo de queima: ver Tab. 8
- fluxo de massa = constante, ver Tab. 8
- comprimento da rampa de lançamento = 2 metros

- inclinação da rampa: vertical
- altitude do local de lançamento e de impacto: nível do mar
- massa específica do ar: variável com a altitude [6]
- aceleração gravitacional: variável com a altitude [6]
- empuxo: variável, ver curvas de empuxo das Fig. 4 a 13
- diâmetro externo do MF = 0.045 m
- passo de tempo durante a fase propulsada = 0.01 s
- passo de tempo durante a fase balística = 0.1 s
- coeficiente de arrasto: constante e igual a 0.3, 0.5 ou 0.7
- massa inicial (m_0) e final (m_f) dos protótipos: ver Tab. 9.

Os resultados para seis parâmetros da trajetória são relacionados nas Tab. 10 a 12.

5.3 - COMENTÁRIOS

A concentração da acetona (ou seu fabricante) que se usa para preparar o propelente tem influência sobre a resistência mecânica do grão após a sua secagem. Em todos os ensaios, empregou-se acetona da marca Lifar. Quanto mais tempo for mantido o tubo de PVC dentro do grão mais difícil será a sua retirada e possivelmente será atacado quimicamente pela acetona, deformando o grão durante a secagem ou na sua retirada. No preparo dos PT para os TE-22 e TE-23, onde os grãos tinham diâmetro interno de 14.9 mm, utilizou-se tubos de cobre em substituição aos tubos de PVC. Mesmo após um dia de secagem, os tubos de cobre foram retirados dos grãos com extrema facilidade.

Através das filmagens dos ensaios, verificou-se que há sempre um intervalo de tempo considerável entre a queima da carga de PN-G do ignitor e o início da ejeção de gases do motor provenientes da queima de seu propelente. Este intervalo de tempo oscilou entre 0.2 e 2.1 segundos.

Na Tab. 13 é apresentado a relação entre o tempo de queima efetivo, ou seja, o tempo durante o qual algum empuxo é medido, e o tempo de queima obtido das filmagens, isto é, o tempo durante o qual observou-se a ejeção de gases do motor. Como pode ser notado esta relação geralmente é inferior a 0.5.

Os resíduos da combustão do propelente ficam impregnados em toda a superfície da câmara de combustão e ao longo da tubeira. A massa dos resíduos, na 1ª campanha, oscilou entre 9 e 27% da massa de propelente. Estes resíduos são facilmente removidos com água. Verificou-se que os resíduos da combustão atacam quimicamente o motor, portanto, devem ser removidos logo após o ensaio.

O tubo-motor e a tubeira de alguns protótipos tiveram sua coloração natural

alterada durante os ensaios.

Alguns protótipos chegaram a ser usados quatro vezes, sem qualquer problema.

O grão-propelente do PT usado no TE-8 possuía ao longo de toda espessura do grão um defeito de aproximadamente 15x15 mm, e o PT do TE-11 tinha dois defeitos, um com cerca de 10x10 mm e o outro com 15x10 mm. Verificou-se que não houve explosão nestes dois ensaios.

Como já foi dito, no TE-26, apesar das duas tentativas, não houve a ignição do motor. Após a segunda tentativa, quando ainda saía fumaça da queima da carga de PN-G do ignitor, retirou-se a tubeira e a tampa superior do tubo-motor e constatou-se que toda a superfície livre do grão-propelente estava chamuscada. Este fato permite dizer que a carga de ignição, 2.5 gramas, é suficiente para atingir toda superfície livre do grão-propelente.

Visando verificar qual a magnitude da chama resultante da queima da carga de ignição para os diferentes tipos de tubeiras, foram efetuados duas séries de testes.

Na primeira série, três ignitores com 2.5 g de PN-G foram testados nas tubeiras curta, convencional e longa, todas sem tubo-motor. A distância entre a extremidade superior do ignitor e a seção de entrada das tubeiras era de 20, 28 e 73 mm, respectivamente. Verificou-se que as chamas que saíram das tubeiras curta e convencional tiveram praticamente o mesmo comprimento e cerca de 50% maior que aquela resultante da tubeira longa.

Na segunda série, queimou-se um ignitor com 3.5 g de PN-G dentro de uma tubeira longa. O comprimento da chama foi cerca de 30% maior que aquela com carga de 2.5 g no mesmo tipo de tubeira.

No TE-14 (tubeira longa) a carga de ignição empregada foi de 3.0 gramas de PN-G enquanto que nos outros TE, 2.5 g.

A massa específica média do propelente, ao longo dos 23 ensaios, foi de 1.30 g/cm³. As variações deste valor ficaram dentro da faixa de -3% a +5%.

5.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Melhor tubeira. A tubeira do tipo curta tem melhor desempenho (maior impulso específico) que o tipo convencional quando testadas em uma mesma campanha, conforme a Tab. 8.

Considerando-se o maior desempenho de cada tipo de tubeira, a melhor tubeira é o tipo curta, seguida pelos tipos convencional, convergente-longa e longa. O desempenho da tubeira curta é 12% superior ao tipo convencional.

Diferenças de desempenho entre ensaios com mesmo tipo de tubeira. Comparando-se o desempenho da tubeira curta do TE-12 com o TE-21, com o auxílio da Tab. 5, poderia-se pensar que a enorme diferença no desempenho deve-se às diferentes razões de compressão e de expansão das duas tubeiras. Mas, uma diferença de desempenho da mesma ordem foi verificado entre os TE-16 e TE-20 nos quais a mesma tubeira do tipo convencional foi empregada, conforme a Tab. 4.

Com a Tab. 6, verifica-se que a massa específica do propelente do TE-21 é 4.5% inferior àquela do TE-12. O mesmo acontece entre os TE-20 e TE-16, com a massa específica do primeiro sendo 3.8% inferior àquela do segundo. Para reforçar a idéia da influência da massa específica sobre o desempenho: na Tab. 8 pode ser visto que, praticamente, o mesmo desempenho foi obtido nos TE-19 e TE-20 cujos grãos-propelentes possuíam a mesma massa específica (Tab. 6).

Diferenças de desempenho entre as tubeiras longa e convergente-longa. A tubeira do tipo convergente-longa tem a mesma geometria da parte convergente da tubeira tipo longa. Registrou-se empuxo nos dois ensaios em que se usaram tubeira convergente-longa. Já nos três ensaios com a tubeira longa, nenhum empuxo foi registrado. Acredita-se que o escoamento não chega a ser sônico na garganta da tubeira do tipo longa. Desta forma, ao aumentar-se a área no divergente da tubeira, a velocidade do escoamento diminui e, por consequência, o empuxo do motor. Se assim for, a tubeira do tipo convergente-longa teria maior empuxo, o que verificou-se.

Efeito do volume inicial da câmara de combustão sem propelente. Nos ensaios TE-22 e TE-23 o diâmetro interno do grão-propelente era de 14.9 mm. Nestes dois ensaios, o volume da câmara de combustão sem propelente no início da queima era de 35% do volume correspondente ao diâmetro de 25 mm, usado nos outros ensaios.

No TE-23 verificou-se elevado valor de empuxo, chegando a danificar o banco estático, e o menor tempo de queima filmado. Isto se deve, possivelmente, à pressão na câmara de combustão ter sido maior para os TE-22 e TE-23 e que resultou do menor volume inicial da câmara de combustão sem propelente para a mesma carga de ignição usada nos outros ensaios.

Formulação do propelente. Na 4^o campanha foram realizados os TE-24 a TE-26 nos quais testou-se três formulações do propelente, conforme a Tab. 1.

O melhor desempenho foi verificado no TE-24 para o propelente composto por 60% de nitrato de potássio (K) e 40% de sacarose (C).

Com a formulação de 70%K + 30%C não registrou-se qualquer empuxo durante a queima e com a formulação 80%K + 20%C nem se conseguiu a ignição do propelente.

Granulometria do propelente. Três granulometrias foram testadas nos TE-28 a TE-30, Tab. 1. O melhor resultado ocorreu para o TE-29 cujo propelente foi preparado com peneira ABNT 40. Neste caso, o desempenho foi mais de 80% superior àqueles dos TE-28 e TE-30 que apresentaram, praticamente, o mesmo desempenho entre si e cujas peneiras usadas foram ABNT 30 e ABNT 60, respectivamente.

Influência da área de queima. Comparando-se o excelente desempenho do TE-20 com o péssimo resultado do TE-27, no qual nenhum empuxo foi registrado, percebe-se que algum parâmetro está tendo grande influência pois a massa específica, nestes dois ensaios foi a mesma, assim como a formulação e granulometria do propelente. A provável causa para a grande diferença no desempenho deve-se ao fato da área de queima inicial no TE-27 ser 26% inferior àquela do TE-20. Ou seja, a pressão de combustão no TE-27 deve ter sido muito inferior em relação ao TE-20. Esta hipótese é reforçada pelo seguinte fato: o tempo de queima filmado do TE-27 foi 10.6 s enquanto que no TE-20 foi 3.2 s.

Desempenho em vôo. Com relação aos testes de tubeira, considerando-se os melhores resultados, verifica-se que: o apogeu atingido por um MF Netuno-R com tubeira convergente-longa e curta é cerca de 70% inferior e 17% superior, respectivamente, àquele alcançado usando-se tubeira convencional, conforme a Tab. 11.

O melhor apogeu previsto para um MF Netuno-R é de 620 metros \pm 20%. Isto ocorreu para o TE-21 onde foi usado uma tubeira do tipo curta.

6 - CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho devem ser encarados como preliminares, pelo fato de ter sido utilizado um banco estático mecânico e pela pequena quantidade de ensaios realizados para cada tipo de tubeira, granulometria e formulação do propelente. Mesmo assim, os resultados podem servir como indicadores para outros trabalhos mais apurados.

As principais conclusões que podem ser tiradas deste trabalho são descritas a seguir.

Foram observados grandes diferenças de desempenho entre minifoguetes com o mesmo tipo de tubeira e formulação e granulometria do propelente, e considerados resultantes dos diferentes valores da massa específica do propelente.

Verificou-se que o comprimento de tubeiras com mesmas razões de compressão e expansão tem grande efeito sobre o desempenho de um minifoguete. Dependendo do comprimento da tubeira (ou dos ângulos do convergente e divergente), o empuxo pode ser insignificante.

Melhores desempenhos foram registrados com propelente rico em sacarose (combustível). Com formulações pobres em sacarose nem se consegue a ignição do propelente.

Dos três tamanhos de peneiras usados no preparo do propelente, o tamanho intermediário proporcionou o melhor resultado.

Verificou-se que a área de queima do propelente e o volume inicial da câmara de combustão sem propelente têm um efeito muito grande sobre o desempenho do minifoguete Netuno-R. Com a redução da área de queima a 3/4 daquela usada em determinado ensaio, no qual se obteve ótimo desempenho do motor, não registrou-se qualquer empuxo.

O apogeu previsto para o minifoguete Netuno-R, com a melhor curva de empuxo obtida nos ensaios estáticos, é de 620 metros \pm 20%.