**Usar o aplicativo Força\_Empuxo para prever a pressão de combustão do motor Netuno-R, dos testes mencionados na Tabela 8 do relatório de 1990.**

Os resultados da Tabela 8 bem como outros parâmetro necessários para utilizar no aplicativo Força\_empuxo estão mostrados na tabela abaixo:

Tabela Resultados da tabela 8 e outros parâmetros necessários para o uso do aplicativo Força\_empuxo

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **TE** | **Emax (N)** | **It (N.s)** | **Emed (N)** | **tq (s)** | **r (mm/s)** | **mdot (g/s)** | **Ve (m/s)** | **Prop** | **Tubeira** | **Dg (mm)** | **Ds (mm)** |
| 10 | 38.3 | 37.2 | 22.7 | 1.64 | 4 | 64 | 360 | **70/30** | conv-longa | 12.5 |  |
| 12 | 81.7 | 46.3 | 38.2 | 1.21 | 5.4 | 96 | 400 | **70/30** | curta | 12.0 | 33.2 |
| 16 | 96.8 | 35.6 | 58.4 | 0.61 | 11 | 190 | 310 | **70/30** | convencional | 11.7 | 30.6 |
| 19 | 108 | 79 | 80.6 | 0.98 | 6.7 | 121 | 670 | **70/30** | convencional | 11.9 | 31.3 |
| 20 | 107 | 76.8 | 68.6 | 1.12 | 5.9 | 101 | 680 | **70/30** | convencional | 11.7 | 30.6 |
| 21 | 121 | 89 | 81.7 | 1.09 | 6.1 | 108 | 760 | **70/30** | curta | 11.4 | 33.7 |
| 24 | 85.1 | 51.9 | 40.2 | 1.29 | 5.1 | 71 | 570 | **60/40** | convencional | 12.0 | 32.5 |
| 28 | 60.4 | 31.6 | 32.6 | 0.97 | 6.8 | 86 | 380 | **60/40** | convencional | 12.0 | 32.5 |
| 29 | 109 | 56.9 | 83.7 | 0.68 | 9.7 | 122 | 690 | **60/40** | convencional | 11.7 | 30.6 |
| 30 | 55.3 | 30.5 | 27 | 1.13 | 5.8 | 74 | 360 | **60/40** | convencional | 12.0 | 33.2 |

Onde:

TE: Número do teste estático

Emax: Força de empuxo máximo da curva de empuxo

Emed: Força de empuxo média da curva de empuxo

Tq: Tempo de queima da curva de empuxo

R: Taxa de queima

Mdot: Fluxo de massa médio

Ve: Velocidade de ejeção média

Prop: Proporção oxidante combustível do KNSu utilizado

Tubeira: Tipo de tubeira utilizada

Dg: Diâmetro da garganta médio de todos os valores daquele tipo de tubeira

Ds: Diâmetro de saída médio de todos os valores daquele tipo de tubeira

Com base nos valores médios de velocidade de ejeção, força de empuxo, diâmetro da garganta e tipo de propelente da Tabela 1, foi utilizado o aplicativo força\_empuxo tipo 2 e obtido os seguintes resultados:

Tabela Resultados obtidos com o cálculo tipo 2 do aplicativo forca\_empuxo

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **TE** | **P0 (bar)** | **T0 (K)** | **R (J/kg/K)** | **gamma** | **Ps (bar)** | **Ts (K)** | **Cf** | **M** | **Epsilon\_EF** | **Ds\_EF (mm)** | **u\* (m/s)** |
| 10 | 2.239 | 1633.751 | 195.436 | 1.075 | 1.825 | 1610.511 | 0.826 | 0.619 | 1.183 | 13.595 | 575.182 |
| 12 | 3.449 | 1671.095 | 193.115 | 1.071 | 2.686 | 1643.612 | 0.979 | 0.686 | 1.116 | 12.677 | 577.734 |
| 16 | 4.599 | 1696.351 | 191.534 | 1.068 | 3.965 | 1680.324 | 1.181 | 0.529 | 1.314 | 13.409 | 579.304 |
| 19 | 6.707 | 1729.705 | 189.433 | 1.065 | 3.332 | 1657.730 | 1.080 | 1.158 | 1.023 | 12.038 | 581.358 |
| 20 | 5.996 | 1719.768 | 190.060 | 1.066 | 2.909 | 1644.749 | 1.064 | 1.178 | 1.029 | 11.870 | 580.776 |
| 21 | 7.195 | 1735.933 | 189.038 | 1.064 | 2.913 | 1644.008 | 1.112 | 1.321 | 1.094 | 11.926 | 581.664 |
| 24 | 3.742 | 1435.721 | 226.071 | 1.050 | 2.255 | 1401.367 | 0.949 | 0.988 | 1.000 | 12.001 | 576.621 |
| 28 | 3.045 | 1429.823 | 226.459 | 1.051 | 2.433 | 1414.432 | 0.947 | 0.655 | 1.145 | 12.841 | 576.062 |
| 29 | 7.129 | 1450.838 | 225.079 | 1.049 | 3.396 | 1401.533 | 1.092 | 1.199 | 1.037 | 11.915 | 578.241 |
| 30 | 2.641 | 1425.459 | 226.746 | 1.051 | 2.159 | 1411.564 | 0.904 | 0.621 | 1.182 | 13.046 | 575.547 |

Onde:

P0: Pressão de estagnação

T0: Temperatura de estagnação

R: Constante do gás

gamma: Razão de calores específicos corrigida para escoamento bifásico

Ps: Pressão na saída da tubeira

Ts: Temperatura na saída da tubeira

Cf: Coeficiente de empuxo

M: Número de Mach na saída

Epsilon\_EF: Razão de expansão efetiva

Ds\_EF: Diâmetro de saída efetivo

u\*: Velocidade sônica do gás na garganta

Com base no valor médio do fluxo de massa, diâmetro da garganta e tipo de propelente e admitindo escoamento blocado, é possível utilizar o cálculo tipo 0 do aplicativo força empuxo, foi então obtido os seguintes resultados:

Tabela Resultados obtidos com o cálculo tipo 0 do aplicativo forca\_empuxo

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **TE** | **P0 (bar)** | **T0 (K)** | **R (J/kg/K)** | **gamma** | **u\* (m/s)** | **Cf (otm)** | **Fotm (N)** | **Votm (m/s)** | **ItOTM (N.s)** |
| 10 | 5.198 | 1707.142 | 190.855 | 1.067 | 579.991 | 1.095 | 64.402 | 1006.284 | 105.620 |
| 12 | 8.256 | 1748.143 | 188.265 | 1.063 | 582.347 | 1.232 | 109.404 | 1139.620 | 132.378 |
| 16 | 15.875 | 1805.868 | 184.572 | 1.057 | 585.281 | 1.400 | 248.065 | 1305.603 | 151.319 |
| 19 | 10.052 | 1765.601 | 187.155 | 1.061 | 583.283 | 1.286 | 144.225 | 1191.940 | 141.340 |
| 20 | 8.370 | 1749.359 | 188.188 | 1.063 | 582.413 | 1.236 | 115.477 | 1143.335 | 129.334 |
| 21 | 9.303 | 1758.736 | 187.591 | 1.062 | 582.918 | 1.265 | 126.535 | 1171.623 | 137.923 |
| 24 | 8.966 | 1455.033 | 224.805 | 1.049 | 578.662 | 1.257 | 125.796 | 1771.774 | 162.277 |
| 28 | 7.133 | 1450.849 | 225.078 | 1.049 | 578.228 | 1.193 | 94.924 | 1103.763 | 92.076 |
| 29 | 10.133 | 1457.033 | 224.675 | 1.048 | 578.868 | 1.290 | 145.903 | 1195.927 | 99.214 |
| 30 | 6.133 | 1447.756 | 225.282 | 1.049 | 577.909 | 1.147 | 78.535 | 1061.278 | 88.744 |

Onde:

Cf (otm): Coeficiente de empuxo ótimo, admitindo que a pressão na saída seja a pressão atmosférica

Fotm: Força de empuxo média usando o coeficiente de empuxo médio, pressão de estagnação e diâmetro da garganta médio

Votm: Velocidade de ejeção média utilizando a força de empuxo ótima e o fluxo de massa médio

ItOTM: Impulso total ótimo, usando a força de empuxo ótima e o tempo de queima do teste estático

**Discussão**

As diferenças entre os dois tipos de análises: tipo 2 com base na velocidade de ejeção e tipo 0 com base no fluxo de massa são grandes. Por exemplo no TE21 a análise tipo 2 apontou para um pressão de 6,9 bar e a análise tipo 0 apontou para uma pressão de 9.3 bar (menor das diferenças). Ou seja, a análise tipo 0 resultou em pressões de estagnação bem maiores que a análise tipo 2.

Nota-se que a velocidade de ejeção experimental mostrada na Tabela 1 deste relatório (extraída do relatório de 1990) é muito baixa, basta notar nas Tabelas 2 e 3 que a velocidade sônica na garganta é por vezes maior do que a experimental, ou ainda de magnitude semelhante.

A análise tipo 2 presente na Tabela 2 gerou resultados incomuns: a pressão de saída em nenhum dos casos chegou a pressão atmosférica, de fato ficaram sempre acima desta pressão (na ordem de 2 bar) e o número de Mach na saída ficou entre subsônico e levemente supersônico (entre 0,5 e 1,3) e a razão de expansão efetiva se tornou muito próximo de 1.

A diferença na formulação (70/30 para 60/40) resultou em uma combustão mais fria, a redução na temperatura foi da ordem de 300K, quase 18%. No entanto aparentemente não houve diferença na pressão de estagnação calculada.

Considerando que a análise tipo 0 é mais acurada, foi feito uma analise para descobrir a força de empuxo resultante (considerando uma expansão ótima), velocidade de ejeção e impulso total, as quais ficaram bem maiores do que as experimentais.

**Conclusão**

Pelo fato das duas análises resultarem em valores tão distintos é possível afirmar que existem erros ou fenômenos que estão mascarando parcialmente os resultados.

A medição da força dos testes estáticos pode ter incluído vários erros por tratar-se de um sistema de mola com papel deslizante e erros na medição desta força podem refletir-se no cálculo da velocidade de ejeção efetiva média (ve=It/mp) o que pode gerar resultados incomuns no cálculo tipo 2 do aplicativo forca\_empuxo.

A medição do fluxo de massa pode incluir uma quantidade menor de erros por tratar-se de medições de massa e tempo total da queima, embora não possa contemplar os efeitos de expansão dos gases que ocorrem após a garganta (o ponto de análise do cálculo tipo 0 do aplicativo força\_empuxo é apenas a seção convergente até a garganta).

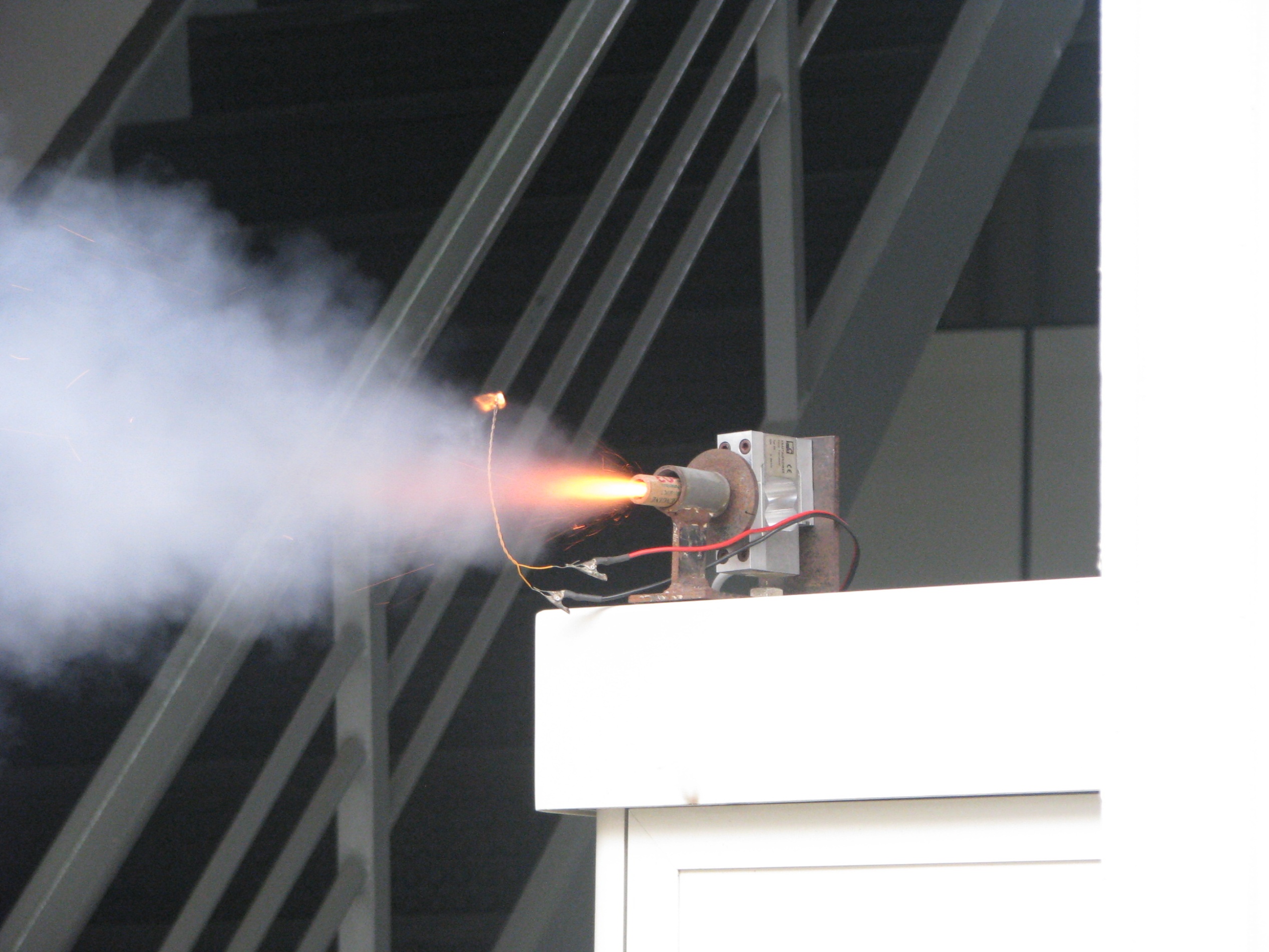
Se considerarmos uma expansão ótima na análise tipo 0, obteremos os seguintes resultados de número de Mach na saída da tubeira e razão de expansão:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **TE** | **Ms** | **Ee** |
| 10 | 1.79662 | 1.93293 |
| 12 | 2.05008 | 2.14554 |
| 16 | 2.36908 | 2.4991 |
| 19 | 2.15027 | 2.24562 |
| 20 | 2.05718 | 2.15232 |
| 21 | 2.11133 | 2.20559 |
| 24 | 2.09183 | 2.21801 |
| 28 | 1.97372 | 2.10492 |
| 29 | 2.1528 | 2.28119 |
| 30 | 1.89242 | 2.03403 |

Percebe-se que segundo esta análise e também a análise tipo 2 que todas as tubeiras estão superexpandidas (A razão de expansão média da tubeira curta é de 8,2 e a razão de expansão da tubeira convencional é de 7,2). Isto pode ter reduzido muito a velocidade dos gases na saída da tubeira gerando forças de empuxo baixas.

A diferença notada neste relatório entre as duas análises (tipo 2 e tipo 0) ocorreu com a tubeira tipo sino do fabricante brasileiro de minifoguetes (Bandeirante) analisada na dissertação do Diego Moro. Na conclusão sobre este tipo de tubeira propõe-se que a explicação está na superexpansão dos gases que ocorrem neste tipo de tubeira e não ocorrem nas tubeiras cônica e parabólica (também testadas).

A figura a seguir mostra o motor MNTVII-03, o qual possui a tubeira tipo sino, nota-se que o jato deixa o motor em um diâmetro da ordem do diâmetro interno do tubo e o comprimento do jato é reduzido.:



E o motor MNTVII-6 que possui uma tubeira tipo corneta, nota-se que o jato deixa o motor bem mais fino e mais comprido o que pode denotar uma velocidade mais alta na saída.

