

Metodologia de Projeto Estrutural de Motor Foguete Experimental

Objetivo:

Apresentar uma metodologia de projeto de motores foguete alternativa àquela reportada em Nakka (2018). Os tópicos abordados são:

- 1) Cálculo da pressão tangencial ou circunferencial máxima do envelope;
- 2) Verificação do critério de esmagamento dos filetes de rosca;
- 3) Cálculo da resistência da base da rosca das extremidades do envelope à tensão na direção longitudinal.

O equacionamento será apresentado já na forma de exemplo. Com isso se espera que os leitores tenham percepção de dimensões típicas e magnitude das pressões de operação e máximas. Assim será especificado o seguinte motor:

- 1) Material do tubo envelope: Tubo redondo sem costura com 50,8 mm (2") de diâmetro externo e 44,45 mm de diâmetro interno (esp. de parede 3,175 mm ou 1/8") em liga de alumínio 6063-T5. Tal liga já é utilizada pelo GFCS, porém as ligas de alumínio 2024-T3 e 6061-T6 também podem ser utilizadas;
- 2) Atualmente o GFCS padronizou com passo 20 fios por polegada, mas o uso da rosca métrica também é recomendado. Pode-se empregar passo 1,5 mm.

AVISO IMPORTANTE:

O projeto, construção e operação de motores foguete experimentais é uma atividade perigosa e que necessita diversas precauções de segurança! Quando explodem, os motores foguete construídos em ligas metálicas projetam fragmentos que podem atingir pessoas, animais e benfeitorias. O autor deste minicurso não se responsabiliza por acidentes causados por práticas inseguras, mesmo que em acordo com esta metodologia. Falhas ocultas podem ocorrer, como defeitos do material, do processo de fabricação ou do reuso de envelopes. Entende-se que os envolvidos com atividades estão conscientes do perigo e tomarão precauções cabíveis para proteger a si, às demais pessoas envolvidas e não envolvidas no teste / voo. Deve-se ter em mente se há presença de animais, áreas de flora secas e com risco de incêndio e benfeitorias ou infraestruturas nas adjacências.

Cálculo da pressão máxima de operação considerando a máxima tensão tangencial admissível no tubo envelope

Segundo Huzel e Huang (1992, pág. 289), tópico 8.2 "Safety Factors", para a tensão permissível de tanques pressurizados recomenda-se a aplicação da "Military Standard MIL-STD-1522A" (USAF), "Standard General Requirements for Safe Design and Operation of Pressurized Missile and Space Systems". Caso não seja especificada esta norma, recomenda-se o seguinte procedimento para calcular a tensão máxima admissível, sw :

- 1) Sem risco a pessoal ou equipamento vital:

$$sw = \min\left(\frac{Fy}{1,1}, \frac{Fu}{1,25}\right) \quad (1)$$

onde Fy é a tensão de escoamento e Fu é o limite de resistência à tração.

- 2) Item da recomendação não é aplicável à projetos do Grupo de Foguetes Carl Sagan, GFCS;
- 3) Risco a pessoal ou a equipamento vital:

$$sw = \min\left(\frac{Fy}{1,25}, \frac{Fu}{1,5}\right) \quad (2)$$

No GFCS recomenda-se o caso 3, pois poderá haver risco pessoal durante os testes estáticos ou durante alguma demonstração pública (e.g. Festival de Minifoguetes de Curitiba).

Assumindo que foi utilizada para a confecção dos tubos envelopes a liga de alumínio 6063-T5, cujas propriedades são:

Tensão de escoamento, Fy , 105 MPa e o limite de resistência, Fu , 145 MPa, logo:

$$sw = \frac{Fy}{1,25} = \frac{105}{1,25} = 84 \text{ MPa} \text{ e } sw = \frac{Fu}{1,5} = \frac{145}{1,5} = 96,67 \text{ MPa} \quad (3)$$

Utiliza-se como tensão de referência o menor valor, logo:

$$sw = 84 \text{ MPa} \quad (4)$$

O tópico 8.3 em Huzel e Huang (1992, pág. 293) trata do projeto estrutural considerando o envelope como sendo cilíndrico. A espessura do vaso em função da tensão máxima é dada pela equação abaixo:

$$tc = \frac{pt \ a}{sw \ ew} \quad (5)$$

onde tc é a espessura do envelope, a é o raio interno do envelope, pt a pressão máxima de operação, ew é a eficiência da solda (como o envelope é um tubo sem costura utilizar 1, ou seja, 100% de eficiência).

Manipulando a equação (5), é possível calcular a pressão máxima de operação em função da geometria e material dos envelopes desejados:

$$pt = \frac{tc \ sw \ ew}{a} \quad (6)$$

Fazendo os cálculos obtém-se:

$$pt = \frac{(50,8 \times 10^{-3} - 44,45 \times 10^{-3})}{\frac{2}{1}} \times 84 \times 10^6 \times 1$$

$$\boxed{pt = 12 \times 10^6 \text{ Pa} = 12 \text{ MPa} = 120 \text{ bar}} \quad (7)$$

Cálculo da pressão máxima de operação considerando o esmagamento dos filetes de rosca do tubo envelope

O Prof. Marchi especificou que o passo da rosca da tubeira deverá ter 20 fios por polegada (20 fpp), porém não informou o diâmetro nominal (*major diameter*). Verificou-se na “*American National Standard Unified Inch Threads*”, chamada “*Unified Thread Standard, UTS*” que a rosca que atende tal requisito e é compatível com os diâmetros interno e externo do tubo é a 1.13/16”-UNC (20 fpp). Os dados geométricos principais (*Major diameter, D_{maj}*) e diâmetro menor (*D_{min}*) são dados na tabela abaixo. A tabela de roscas da UTS é mostrada no Anexo 1.

Tabela 1: Geometria da rosca 1.13/16”-20 (UNC).

	Rosca Externa			Rosca Interna		
	D _{maj} , limites		D _{min}	D _{min} , limites		D _{maj}
	Max	min	min	min	max	Min
in	1,811	1,8029	1,7515	1,758	1,770	1,8125
mm	45,999	45,794	44,488	44,653	44,958	46,038

Para o cálculo da máxima pressão de operação do motor em função da resistência ao esmagamento nos filetes de rosca utilizar-se-á a informação dada em Budynas e Nisbett (2011, pág. 431), de que em experimentos envolvendo roscas engajadas, a primeira rosca conduz 38% da carga, a segunda 25%, a terceira 18% e a sétima está livre da carga. Tal informação pareceu ser verificada nas simulações anteriormente conduzidas pelo Jeovan, sendo assim, este procedimento será utilizado. A força usada no cálculo será 0,38 vezes a força devido à pressurização do motor e utilizar apenas um único filete de rosca, o que resultará no nível mais alto de tensões na combinação rosca-porca.

1.1) Cálculo do parâmetro H :

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{25,4}{20} = 1,0998 \text{ mm} \quad (8)$$

Onde P é o passo da rosca, dado em milímetros.

1.2) Diâmetro médio ou primitivo D_p :

$$D_p = D_{maj} - 2 \frac{3}{8} H = 46,038 - 2 * \left(\frac{3}{8}\right) * 1,0998$$
$$D_p = 45,213 \text{ mm} \quad (9)$$

1.3) Cálculo da tensão axial para o primeiro filete de rosca engajado (σ) e sabendo que 5/8 de H é a altura do filete:

$$\sigma = \frac{0,38 F}{\pi \frac{5}{8} H D_p} \quad (10)$$

Escrevendo a carga F como função da pressão máxima de operação do motor pt e do raio interno do envelope a (na prática considerou-se metade do diâmetro nominal da rosca) e isolando a pressão tem-se:

$$p_t = \frac{\pi \frac{5}{8} H D_p \sigma_e}{0,38 \frac{\pi D_{maj}^2}{4}} \quad (11)$$

onde a tensão de escoamento foi igualada à tensão normal.

$$p_t = \frac{\pi \frac{5}{8} 1,0998 \times 10^{-3} \times 45,213 \times 10^{-3} \times 105 \times 10^6}{0,38 \frac{\pi (46,038 \times 10^{-3})^2}{4}} \quad (12)$$

$$\boxed{p_t = 16,21 \times 10^6 \text{ Pa} = 16,21 \text{ MPa} = 162,1 \text{ bar}} \quad (13)$$

Cálculo da pressão máxima de operação considerando a resistência na embocadura da rosca das extremidades do envelope à tensão na direção longitudinal

Em geral o componente que rompe é o envelope e a falha ocorre devido à excessiva tensão tangencial. Em caso de falha catastrófica, pode ocorrer projeção de estilhaços na direção radial, ou seja, na direção de um possível público que está presente e observando o lançamento do foguete. Para forçar que a falha ocorra de modo a projetar estilhaços na direção longitudinal, pode-se prever uma embocadura na base do filete de rosca mais interno ao envelope. Para calcular o diâmetro da embocadura começaremos com a definição de coeficiente de segurança CS :

$$CS = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{aplicada}} \quad (14)$$

onde σ_{ref} é a tensão de referência, neste caso o limite de resistência Fu e $\sigma_{aplicada}$ é a tensão aplicada devido à pressurização do motor. Fazendo $CS = 1$, ou seja, para que o motor rompa na base do primeiro filete teremos:

$$\sigma_{ref} = \sigma_{aplicada} = \frac{F_{tração}}{A_{coroa}} \quad (15)$$

onde $F_{tração} = p_t \frac{\pi}{4} (D_{maj})^2$ e $A_{coroa} = \frac{\pi}{4} [D_e^2 - D_{emb}^2]$ é a área de coroa circular formada pela embocadura, cujo diâmetro é D_{emb} e o diâmetro externo do envelope D_e . Substituindo a equação 15 na equação 14, inserindo o limite de resistência Fu como tensão de referência e isolando o diâmetro de embocadura D_{emb} temos a equação abaixo, onde se insere a pressão de ruptura desejada para o envelope. Considerando a pressão de ruptura 120 bar temos:

$$D_{emb} = \frac{D_e}{\sqrt{1 + \frac{p_t}{Fu}}} \quad (16)$$

$$D_{emb} = \frac{50,8 \times 10^{-3}}{\sqrt{1 + \frac{12 \times 10^6}{145 \times 10^6}}} \quad (17)$$

$$\boxed{D_{emb} = 48,820 \text{ mm} \quad p/p_t = 120 \text{ bar}} \quad (18)$$

Conclusão

Observando as equações (7), (13) e (18), vemos que:

- 1) A **pressão máxima de operação** prevista é **120 bar**, considerando um **fator de segurança 1,25** para falha do tubo envelope e com um **fator de segurança 1,00** para rompimento da embocadura.
- 2) A **pressão de ruptura** prevista é **120 bar**, mas para isso é necessário que se faça uma embocadura de diâmetro **48,820 mm** entre a rosca interna do envelope e o corpo do envelope. É neste local que a falha deve ocorrer e poderá ocorrer ou na conexão do envelope com a tubeira ou na conexão do envelope com a tampa.
- 3) Mesmo a falha ocorrendo no envelope, a direção da projeção de possíveis estilhaços é na direção do eixo longitudinal do foguete, portanto com o menor risco possível aos observadores do voo;
- 4) Os resultados obtidos nesta análise analítica desconsideram o estado generalizado de tensões e também desconsideram que a geometria do filete de rosca é um concentrador de tensões. **A simulação deste problema por método numérico é muito importante**, pois pode mostrar mais claramente onde deverá ocorrer a falha.

Referências

American Society of Mechanical Engineers. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Rules for construction of Pressure Vessels**. Edition 2004. Section III, Division 1. Subpart 1, Section II, Part D UG-22 e UG-23

American Society of Mechanical Engineers. **Unified Inch Screw Threads (UN and UNR Thread Form) – ASME B1.1 - 2003**. Norma Técnica.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica**, 8° ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

HUZEL, D. K.; HUANG, D. H. **Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines**, v. 147, Washington: AIAA, 1992.

JONES, F.D.; RYFFEL, H.H.; OBERG, E.; McCAULEY, C.J.; HEALD, R.M. **Machinery's Handbook**, 27° ed. New York: Industrial Press, 2004.

NAKKA, **Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site**, Disponível em < <http://www.nakka-rocketry.net/>>, Acesso em 09/04/2018, às 18:07.