

Web site de foguetaria experimental de Richard Nakka

Teoria de motor-foguete sólido

3 Grão-Propelente

O propelente utilizado em motores-foguete experimentais amadores pode ser simples em composição, sendo composto por dois constituintes principais – combustível e oxidante. Este é o caso com propelentes baseados em “açúcar”. Os propelentes *compostos* (*composite*) experimentais, por outro lado, podem ter uma composição que é muito complexa, e pode conter oxidante de várias granulometrias, polímero aglomerante, e até metais como alumínio e magnésio. Agentes de cura, estabilizadores de fase, e solventes podem ser outros aditivos incluídos em percentagens pequenas.

Para qualquer propelente, os aditivos podem controlar a taxa de queima, para acelerar ou reduzir a taxa. Um opacificador pode ser adicionado para absorver calor que pode de outra forma ser transmitido através de um grão translúcido, resultando em uma queima não predizível.

Independentemente da composição, contudo, todos os propelentes são processados em uma **forma geométrica** básica similar, referida como um *grão*-propelente. Geralmente os grãos-propelente são em forma cilíndrica para ajuste perfeito no motor-foguete visando maximizar a *eficiência volumétrica*. O grão pode consistir de um único *segmento* cilíndrico (Figura 1), ou pode conter muitos segmentos. Usualmente, é introduzido uma *alma* central que se estende em todo o comprimento do grão, para aumentar a área superficial do propelente inicialmente exposta à combustão.

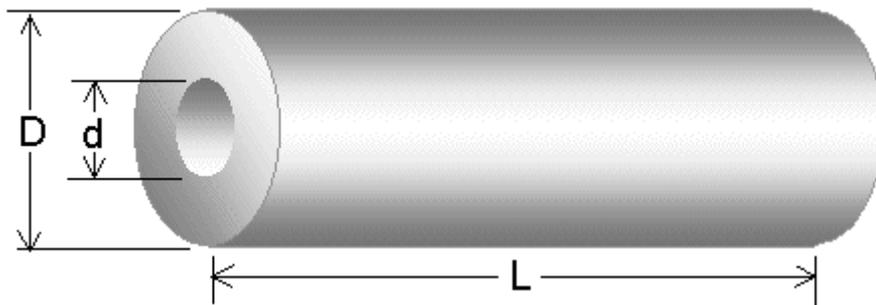
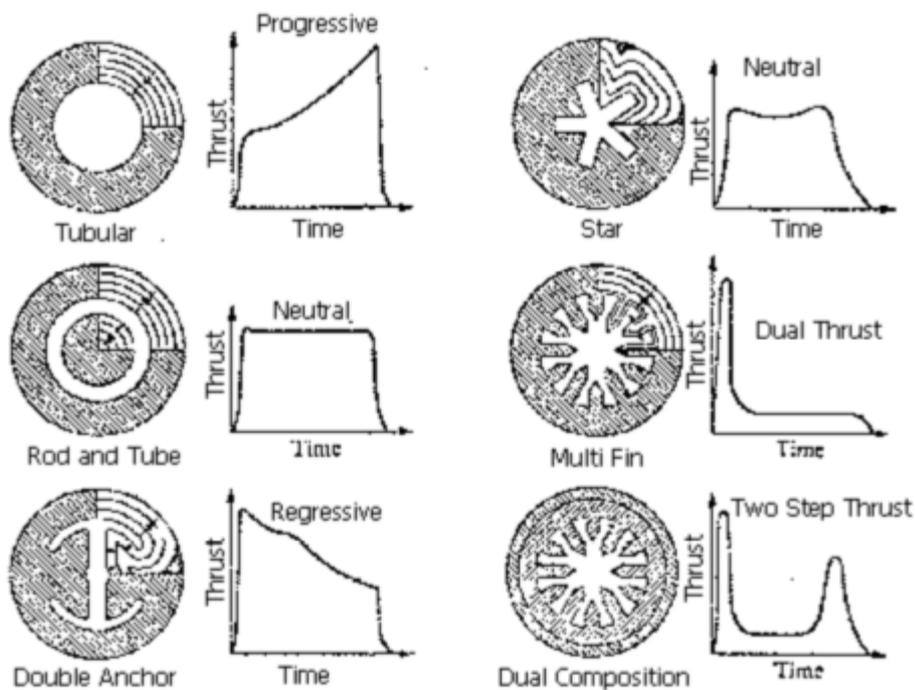


Figura 1. Grão cilíndrico oco.

A alma pode ter uma grande variedade de seções transversais como circular, estrela, cruz, osso-de-cachorro, roda-de-vagão, etc, contudo, para motores amadores, a forma mais comum é a circular. A forma da alma tem uma influência profunda sobre a forma do perfil do empuxo-tempo, como mostrado na Figura 2.

Como a forma da alma influencia a curva empuxo-tempo? O empuxo (e a pressão na câmara) que um motor-foguete gera é proporcional à área de queima em qualquer instante particular de tempo. Isto é denominado como a *área de queima instantânea*. A superfície de queima em qualquer ponto recua na direção normal (perpendicular) à superfície naquele ponto, o resultado sendo uma relação entre superfície de queima e a distância da camada queimada que depende quase inteiramente da *forma inicial do grão* e contornos restritos (inibidos). Este conceito importante é ilustrado na Figura 3, onde as linhas de contorno representam a forma da alma em momentos sucessivos no tempo durante a queima. Observar que a forma da curva empuxo-tempo muda, com as linhas verticais correspondendo aos mesmos momentos sucessivos durante a queima. Como pode ser visto, o grão estrela produz uma queima aproximadamente *neutra*, quando a área superficial permanece quase

constante durante toda a duração da queima. A queima neutra é geralmente desejável porque ela proporciona maior eficiência no impulso total resultante, quando a tubeira opera mais eficientemente em uma pressão de câmara constante.



Tradução:

Tubular: tubular

Rod and Tube: barra e tubo

Double Anchor: âncora dupla

Progressive: progressivo

Thrust: empuxo

Time: tempo

Neutral: neutro

Regressive: regressivo

Star: estrela

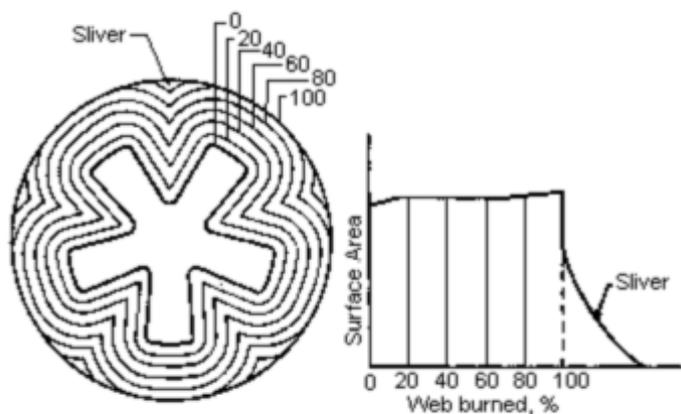
Multi Fin: multiempenas

Dual Composition: composição dual

Dual Thrust: empuxo dual

Two Step Thrust: empuxo de duas etapas

Figura 2. Formas do núcleo e influência sobre a curva de empuxo. [Clique para mais ...](#)



Tradução:

Sliver: camada residual

Surface Area: área superficial

Web burned: camada queimada

Figura 3. Regressão do grão.

É importante reconhecer que a **área de queima do grão-propelente é um parâmetro chave na determinação do desempenho do motor-foguete**. A função principal de um grão-propelente é produzir produtos de combustão em uma taxa de escoamento prescrita (\dot{m}_g), definida por

$$\dot{m}_g = A_b \rho_p r \quad (3.1)$$

onde ρ_p é a massa específica do propelente, A_b é a área de queima, e r é a taxa de queima do propelente. Uma discussão completa sobre taxa de queima é fornecida na *web page* **Taxa de Queima de Propelente**. A área de queima total consiste de todas as superfícies do propelente que estão expostas à combustão (e portanto não inibidas da queima por algum meio). A área de queima do grão depende do seguinte:

- Geometria do grão, como descrito acima
- Uso de inibidores

Inibidor é um material ou revestimento que é suficientemente resistente ao calor tal que qualquer superfície do propelente, protegida pelo inibidor, não queime durante a operação completa do motor. Inibidores para motores experimentais amadores são tipicamente papel ou papelão, ou um revestimento como resina poliéster ou époxi.

Para o *projeto* de um motor, nós estamos mais interessados na área *máxima* de queima, já que é esta área que determina a *pressão máxima de câmara* que o motor sentirá. A pressão máxima de câmara é usada para dimensionar a estrutura do motor.

Para um grão de queima completamente não restrita (por exemplo motores A-100, B-200 e C-400), todas as superfícies estão expostas aos gases quentes e assim a queima segue a partir de toda superfície inicial no começo da queima. Um grão “BATES” (Figura 4), que é um grão cilíndrico oco de múltiplos segmentos, tem a superfície externa inibida; a superfície de queima inicial é a área da alma e as extremidades dos segmentos. O motor-foguete **Kappa** utiliza esta configuração de grão, com quatro segmentos.

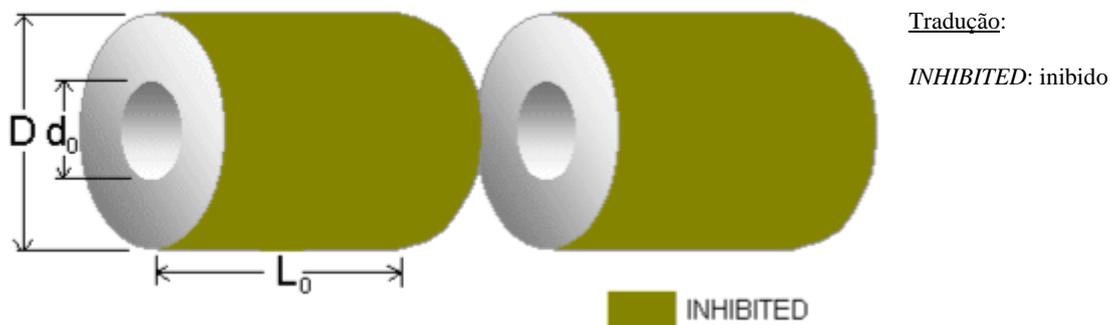


Figura 4. Grão BATES.

Configurações de grão BATES são empregadas frequentemente em motores amadores, já que este grão pode ter queima aproximadamente neutra, pela escolha apropriada das razões L_0/D e D/d_0 . Uma discussão mais completa sobre área de queima e sua relação com a geometria do grão, e sua influência sobre a pressão de câmara é dada na *web page* **Gráficos para Projeto de Motor-Foguete – Pressão de Câmara**.

As áreas superficiais de grãos cilíndricos *com tronco* (como A-100, B-200 e C-400) são dadas na *web page* **Área do Grão**.

Uma *propriedade física* importante do grão-propelente é a **Massa Específica**, que é usada em cálculos de desempenho. Se um propelente é composto de dois constituintes (oxidante e combustível), a *massa específica ideal* (ρ_p) é dada por

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_f}{\rho_f}} \quad (3.2)$$

onde o símbolo ρ (ro) designa massa específica, f é a fração mássica, e os subscritos o e f se referem ao oxidante e combustível, respectivamente. Se um propelente é composto por mais de dois

constituintes, então a massa específica ideal é dada por (onde a, b, c, \dots denotam os constituintes individuais)

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{f_a}{\rho_a} + \frac{f_b}{\rho_b} + \frac{f_c}{\rho_c} + \dots} \quad (3.3)$$

Na **Tabela 1**, é dada a massa específica de alguns oxidantes e combustíveis, bem como um exemplo. A *massa específica real* pode ser obtida pesando acuradamente um grão para determinar a sua massa (m_g), e medindo o seu volume (V_g), com a massa específica (ρ_p) expressa por

$$\rho_p = \frac{m_g}{V_g} \quad (3.4)$$

onde

$$V_g = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) L \quad (3.5)$$

Para um grão cilíndrico oco, D é o diâmetro externo, d é o diâmetro interno (alma) e L é o comprimento do grão.

A massa específica real geralmente é alguma percentagem menor do que a massa específica ideal (tipicamente 94% - 97%), devido a pequenos vazios no grão, e é dependente da técnica de preparo. O volume é melhor obtido pelo princípio de Arquimedes, que envolve a imersão do grão em um líquido apropriado, e a medição do volume deslocado.

A **Fração de Carregamento Volumétrica** (V_l) é definida como a fração do *volume do grão* (V_g) para o *volume disponível na câmara* (V_a), e refere-se à eficiência volumétrica do motor, assim como uma medida da eficiência de desempenho:

$$V_l = \frac{V_g}{V_a} = \frac{I_t}{I_{sp} \rho_p g V_a} \quad (3.6)$$

onde I_t é o impulso total (disponível), I_{sp} é o impulso específico do propelente, e g é a aceleração gravitacional ao nível do mar (9,80665 m/s²).

A **Fração de Camada** (w_f) é a razão da *espessura da camada* de propelente para o *raio externo* do grão, e é dada por

$$w_f = \frac{D - d}{D} = \frac{2 r t_b}{D} \quad (3.7)$$

onde t_b é o tempo de queima do motor. Claramente, para maximizar a duração da queima, é necessário maximizar a fração de camada (isto é, a espessura). O “preço” para maximizar a espessura de camada é a redução do diâmetro da alma do grão. Isto deve ser considerado cuidadosamente, como explicado abaixo.

A razão de área **Porta-para-Garganta** é dada pela área da seção transversal do *canal de escoamento* para a área da seção transversal da *garganta da tubeira*:

$$\frac{A_p}{A_t} = \frac{\pi D^2 (1 - V_t)}{4 A_t} \quad (3.8)$$

onde A_p é a área (canal) do escoamento do grão e A_t é a área da seção transversal da garganta. A velocidade do gás ao longo do comprimento do canal de escoamento é influenciada significativamente pela magnitude da razão de área porta-para-garganta. O *escoamento bloqueado* ocorre quando a razão é 1,0, com a velocidade do escoamento através da porta sendo igual à velocidade do escoamento (sônico) através da garganta. Queima erosiva severa (desgastando a alma) pode ocorrer sob tal condição, e é geralmente evitada no projeto. A criticalidade da razão porta-para-garganta, contudo, depende do fluxo de massa em um dado local. De fato, a razão 1,0 (ou menor) pode ser usada na extremidade superior do grão onde o fluxo de massa é mínimo. A razão de área porta-para-garganta é frequentemente usada como um índice do qual tendências de queima erosiva são estabelecidas. Para aqueles propelentes onde isto não tem sido estabelecido, uma razão de 2,0 a 3,0 (dependendo da razão L/D do grão) é sugerida.

A razão **Comprimento-para-Diâmetro** é o *comprimento total do grão* em relação ao *diâmetro externo* do grão. Este parâmetro é muito importante no projeto do motor; quanto maior o valor L/D , tende a resultar em maior efeito de queima erosiva (incluindo queima erosiva negativa). Alto valor L/D tende a gerar altos fluxos de massa diferentes ao longo do comprimento do grão; isso pode ser melhor atendido com uma alma *cônica* ou diâmetros de alma em *degraus* (mais largo mais próximo da tubeira).