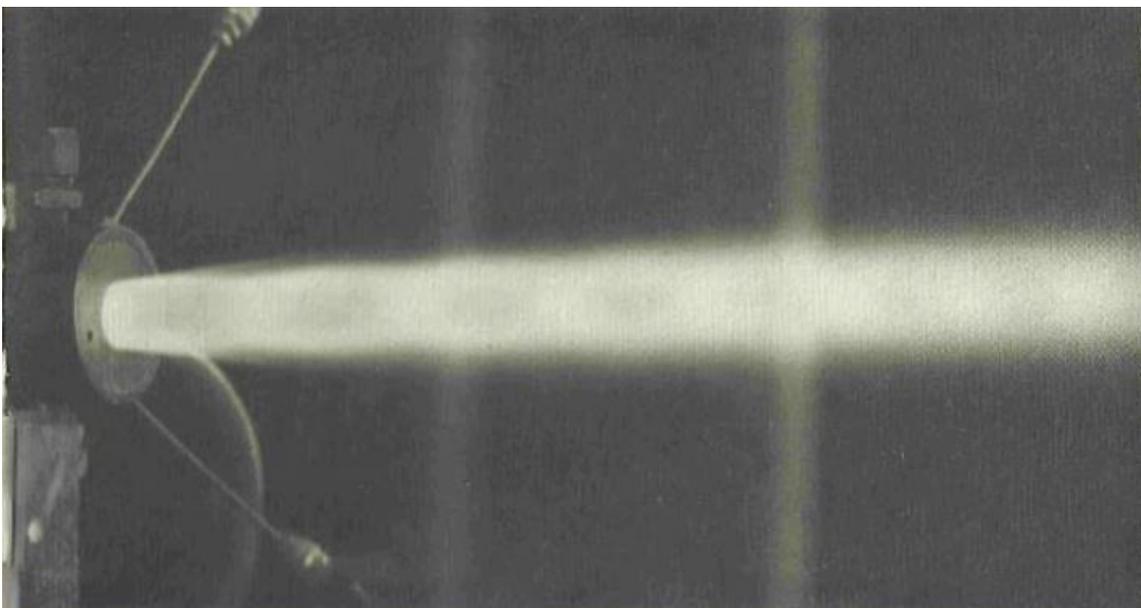


# Como Projetar, Construir e Testar Motores de Foguete Líquidos Pequenos



**ROCKETLAB** / CHINA LAKE, CALIF.

---

## AVISO

A ROCKETLAB não pode assumir responsabilidade, de qualquer maneira, pelo uso das informações apresentadas aqui ou pelos dispositivos resultantes delas.

## CORRESPONDÊNCIA

Comentários a respeito deste livro podem ser enviados para:

ROCKETLAB  
Post Office Box 1139  
Florence, Oregon 97439

## IMAGEM DA CAPA

Pluma de exaustão de um motor foguete líquido pequeno de 75lb de empuxo resfriado com água. Os propelentes são oxigênio líquido e álcool metílico. Foto oficial da marinha dos Estados Unidos.

Copyright © 1967 por Leroy J Krzycki  
Imprimido nos Estados Unidos América  
Primeira impressão: Março de 1967  
Segunda impressão: Março de 1971  
ISBN 9600-1980-4

Traduzido por: Maurício Sá Gontijo

# Como Projetar, Construir e Testar Motores de Foguete Líquidos Pequenos

## Sumário

1	INTRODUÇÃO
2	ESCOLHA DE PROPELENTE
6	PROPRIEDADES DOS PROPELENTE
7	EQUAÇÕES DE PROJETO
10	TUBEIRA
11	CÂMARA DE COMBUSTÃO
11	ESPESSURA DA PAREDE DA CÂMARA
12	RESFRIAMENTO DO MOTOR
13	TRANSFERÊNCIA DE CALOR
14	MATERIAIS
15	INJETORES
22	EXEMPLO DE PROJETO
22	PROJETO
26	FABRICAÇÃO
26	EQUIPAMENTO DE TESTE
26	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO
26	COMPONENTES DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO
33	BANCADA DE TESTES
35	SEGURANÇA
36	VERIFICAÇÃO DO MOTOR E CALIBRAÇÃO
38	IGNIÇÃO E OPERAÇÃO
41	A LEI
42	BIBLIOGRAFIA
43	LISTA DE FORNECEDORES
47	FATORES DE CONVERSÃO

# Prefácio

O motor de foguete é, relativamente, um dispositivo simples onde propelentes são queimados e os gases de alta pressão resultantes são expandidos por meio de uma tubeira especialmente projetada para produzir empuxo. Tanques de propelente pressurizados a gás e simples controles de vazão de propelente tornam a operação de um motor de foguete líquido tão simples quanto a de um motor automotivo. Porque, então, muitos motores de foguete amadores falham ou causam acidentes? A razão, geralmente e simplesmente, é que os amadores não estão acostumados com dispositivos de alta pressão operando perto das temperaturas limites do material. O dia a dia dele, ao contrário, é cheio de dispositivos e instrumentos operando a baixa pressão e baixos níveis de energia térmica. Com um projeto adequado, fabricação cuidadosa e bons equipamentos de teste operados de forma segura, o amador pode construir um pequeno motor de foguete líquido que terá horas de operação segura.

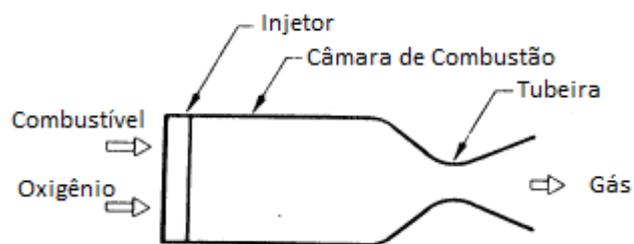
O propósito dessa publicação é prover ao amador sério informações de projeto, procedimentos de fabricação, requisitos de equipamentos de teste e procedimentos seguros de operação para pequenos motores de foguete líquidos.

# Como Projetar, Construir e Testar Motores de Foguete Líquidos Pequenos

## INTRODUÇÃO

O motor de foguete líquido utiliza propelente líquido que são levados sob pressão de tanques até a câmara de combustão. Os propelentes geralmente consistem em oxidante líquido e combustível líquido. Os propelentes reagem quimicamente (queimam) na câmara de combustão para formar gases quentes que são acelerados e ejetados em altas velocidades por meio de uma tubeira, dando assim momento ao motor. Momento é o produto da massa e da velocidade. A força de empuxo de um motor de foguete é a reação experimentada pela estrutura do motor devido a ejeção dos gases de alta velocidade de matéria. Esse é o mesmo fenômeno que empurra uma mangueira de jardim para trás enquanto água esguicha pelo bocal ou faz o recuo da arma quando disparada.

Um motor de foguete típico consiste na câmara de combustão, na tubeira e no injetor, como mostrado na Figura 1.

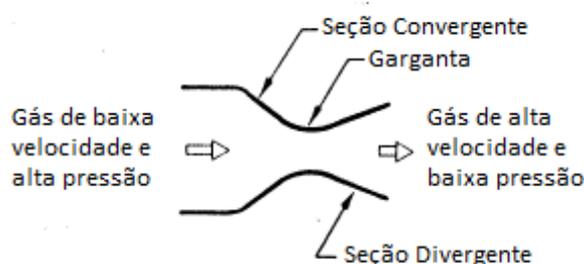


**Figura 1** Motor de Foguete Típico

A câmara de combustão é onde a queima do propelente ocorre à alta pressão. A câmara tem que ser forte o suficiente para conter a alta pressão gerada pelo, e a alta temperatura resultante do, processo de combustão. Por causa das altas temperaturas e da transferência de calor a câmara e a tubeira geralmente são resfriadas. A câmara também precisa ter comprimento

suficiente para garantir a combustão completa antes que os gases entrem na tubeira.

A função da tubeira é converter a energia termoquímica gerada na câmara de combustão em energia cinética. A tubeira converte o gás lento, sob alta pressão e sob alta temperatura na câmara de combustão em um gás em alta velocidade com pressão e temperaturas mais baixas. Já que o empuxo é o produto da massa (quantidade de gás fluindo pela tubeira) e velocidade, uma velocidade alta dos gases é desejada. Velocidades dos gases de 1 a 2 milhas por segundo (5000 até 1200 pés por segundo) podem ser obtidas em tubeiras de foguetes. Tubeiras que executam esse tipo de efeito são chamados de tubeiras DeLaval (Por causa de seu inventor) e consistem de uma seção convergente e uma divergente, como é mostrado na Figura 2. A área mínima de vazão entre as seções convergente e divergente é chamada de garganta da tubeira.



**Figura 2** Tubeira DeLaval

A área no fim da seção divergente é chamada de área de saída da tubeira. Geralmente a tubeira é feita com um comprimento suficiente (ou a área de saída é grande o suficiente) para que a pressão da câmara de combustão seja reduzida na saída da tubeira até a pressão fora da tubeira. Se o motor está operando no nível do mar essa pressão é aproximadamente 14,7 pascal. Se o motor é projetado para operar em alta altitude a pressão de saída é menor que 14,7 psi. A queda de temperatura dos gases provenientes da combustão fluindo pela tubeira é alta e pode ser até 2000 - 3000 °F. Mesmo os gases na câmara de combustão estando em 5000 - 6000 °F, a temperatura dos gases na saída da tubeira ainda é por volta de 3000 °F.

## ESCOLHA DE PROPELENTE

Motores de foguete líquidos podem funcionar com uma variedade de combinações de oxidante e combustível, algumas estão tabeladas na Tabela I. A maioria das combinações de propelentes listadas são perigosas, tóxicas e caras. O projetista amador de motores de foguete, por outro lado, precisa de propelentes que são acessíveis, razoavelmente seguros, fácil de manusear e que não sejam caros. Baseado na experiência, a ROCKETLAB recomenda o

uso de oxigênio gasoso como oxidante e hidrocarboneto líquido como combustível. Eles têm bom desempenho, a chama da combustão é bem visível, e sua alta temperatura de combustão apresenta um bom desafio para o projetista amador. Esses propelentes são utilizados no míssil Atlas e no Saturn space booster. Entretanto, nesses sistemas é utilizado oxigênio líquido é usado, ao invés de gasoso, como oxidante.

Oxigênio gasoso pode ser obtido facilmente em cilindros pressurizados em quase qualquer comunidade por causa de seu uso em soldagem oxiacetilênica, e não é caro. Com razoáveis precauções, que serão detalhadas mais tarde, o gás (e o cilindro) é seguro para manusear em bancada de testes. A pressão dos gases é facilmente regulada com reguladores comerciais e a vazão mássica é facilmente controlada com válvulas comerciais.

Tabela I Desempenho Teórico de Alguns Propelentes Líquidos

Combinação de Propelente Oxidante/Combustível	Pressão de Combustão, psi	Razão de Mistura	Temperatura da chama, °F	Isp, s
Oxigênio líquido & gasolina	300	2,5	5470	242
Oxigênio gasoso & gasolina	300	2,5	5742	261
Oxigênio gasoso & gasolina	500	2,5	5862	279
Oxigênio líquido & JP-4 (combustível aeronáutico)	500	2,2	5880	255
Oxigênio líquido & álcool metílico	300	1,25	5180	238
Oxigênio gasoso & álcool metílico	300	1,2	5220	248
Oxigênio líquido & hidrogênio	500	3,5	4500	363
Ácido nítrico fumegante vermelho & JP-4	500	4,1	5150	238

Nota: expansão para 14,7 psi

Combustíveis de hidrocarbonetos, como a gasolina e o álcool, são de fácil acesso em qualquer comunidade. Precauções de segurança já são

conhecidas pela maioria dos indivíduos responsáveis devido ao amplo uso desses combustíveis em motores de combustão interna para automóveis e outros equipamentos.

Todas as seções subsequentes dessa publicação irão se referir, e assumir, que os propelentes usados em motores de foguete líquidos amadores são oxigênio gasoso e um combustível de hidrocarboneto.

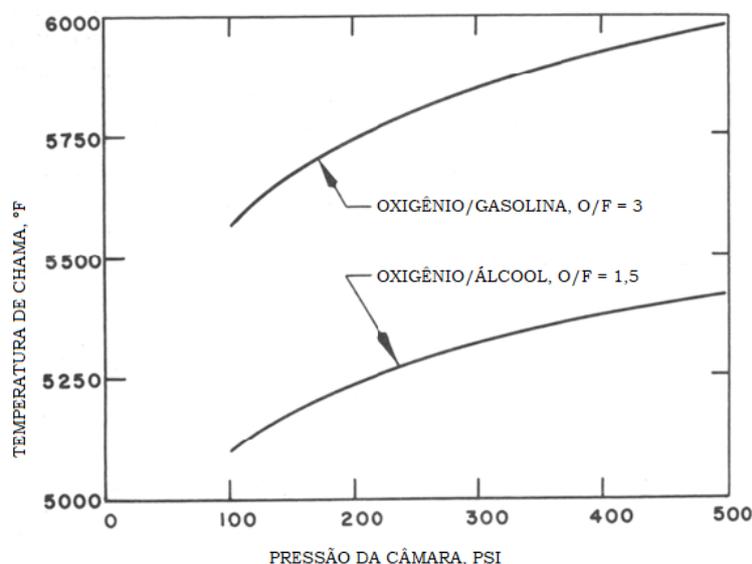
As temperaturas da chama de combustíveis de hidrocarboneto queimados em oxigênio gasoso em várias pressões de câmara são mostradas na Figura 3 para razão de mistura estequiométrica. Razão de mistura é definida como a vazão mássica de oxidante dividida pela vazão mássica de combustível, ou

$$O/F = w_o/w_f \quad (1)$$

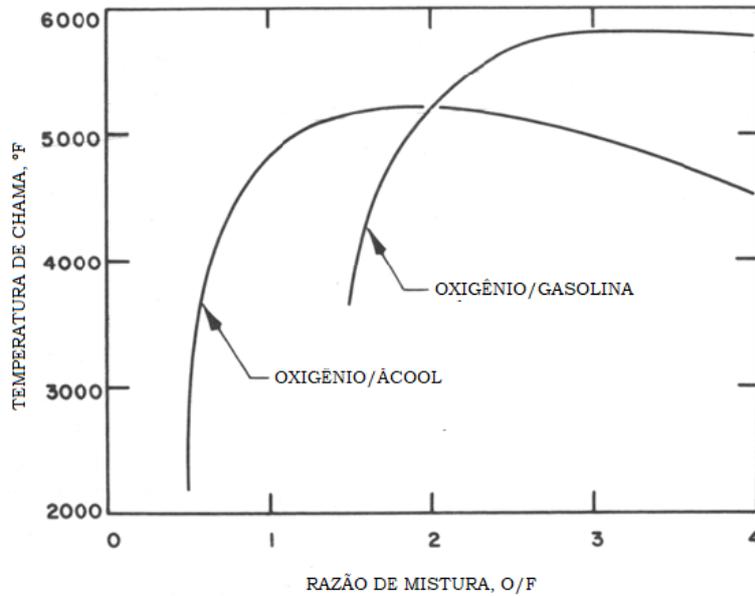
onde  $w_o$  = lb de oxigênio/s  
 $w_f$  = lb de combustível/s

Quando a razão estequiométrica é alcançada a quantidade de oxigênio é suficiente para reagir quimicamente com todo o combustível; para estas condições, a temperatura de chama mais alta é atingida. Se uma temperatura de chama mais baixa é desejada, geralmente é melhor ter mais combustível que oxidante; isso é conhecido como queima “fora da razão” ou “rica em combustível”. Essa condição é menos severa no motor de foguete do que as condições de queima estequiométrica ou rico em oxigênio.

A Figura 4 indica como a temperatura da chama varia quando a pressão na câmara de combustão é mantida em um valor constante e a razão de mistura é permitida variar.



**Figura 3** Temperatura da chama versus pressão da câmara em razão de mistura estequiométrica



**Figura 4** Temperatura da chama versus razão de mistura em pressão na câmara constante (300 psi)

O empuxo desenvolvido por libra de propelente queimado por segundo é conhecido como impulso específico e é definido como

$$I_{sp} = \text{empuxo} / \text{vazão mássica total de propelente} \quad (2)$$

A Figura 5 indica o máximo desempenho possível para combustíveis de hidrocarboneto queimados com oxigênio gasoso em várias pressões de câmara com o gás expandindo para a pressão atmosférica. Esse gráfico pode ser usado para determinar a vazão mássica de propelente necessária para produzir certo empuxo. Suponha que você deseja projetar um motor de foguete, usando oxigênio gasoso/gasolina para serem queimados a pressão na câmara de 200 psi com empuxo de 100 lbs. Nessas condições o desempenho do propelente, da Figura 5, é 245 lbs de empuxo por 1 lb de propelente queimado por segundo, logo

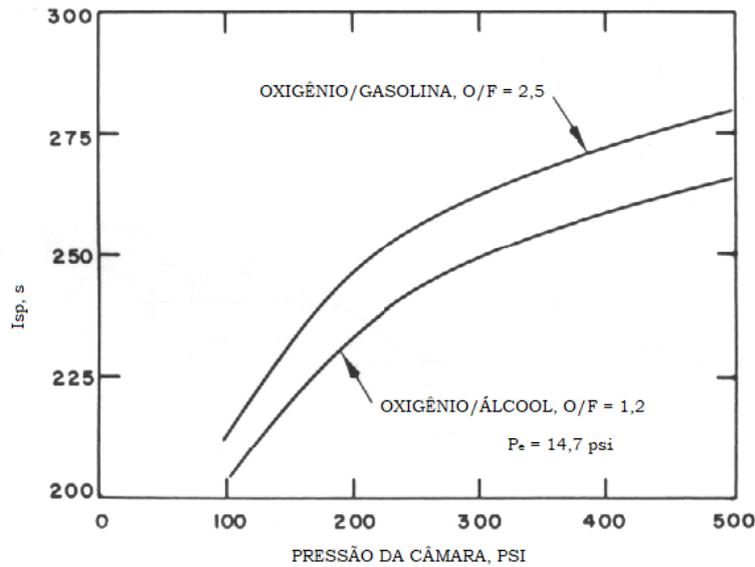
$$w_t = F / I_{sp} = 100 / 244 = 0,41 \text{ lb/s} \quad (3)$$

Já que a razão de mistura para o maior Isp para oxigênio e gasolina é 2,5, nós temos

$$w_o = w_t \cdot r / (r + 1) = 0,293 \text{ lb/s} \quad (4)$$

$$w_f = w_t / (r + 1) = 0,117 \text{ lb/s} \quad (5)$$

$$w_o = w_o + w_f \quad (6)$$



**Figura 5** Isp de combustíveis de hidrocarbonetos com oxigênio gasoso

## PROPRIEDADES DOS PROPELENTES

As propriedades químicas e físicas do oxigênio gasoso, do álcool metílico e da gasolina estão na Tabela II.

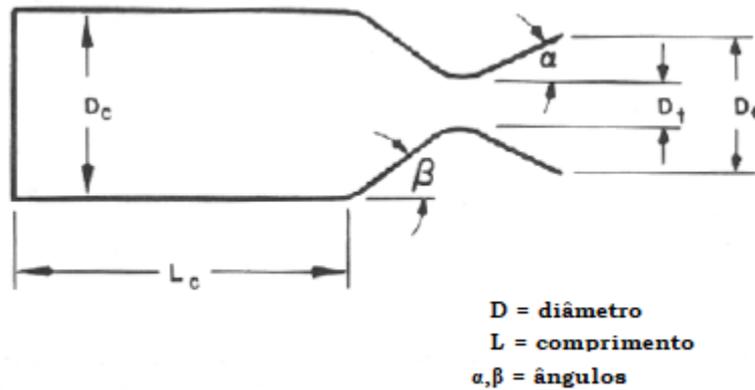
Tabela II Propriedades físicas dos propelentes selecionados

Propelente	Oxigênio Gasoso	Álcool Metílico	Gasolina
Fórmula química	$O_2$	$CH_3OH$	$C_8H_{18}$
Massa molecular	32	34,04	114
Cor	Sem cor	Sem cor	Sem cor
Efeito em metais	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Risco de incêndio	Alto	Alto	Alto
Toxicidade	Sem	Tóxico	Moderado
Densidade	0,083 lb/ft <sup>3</sup>	48 lb/ft <sup>3</sup>	44,5 lb/ft <sup>3</sup>

Nota: A densidade do Oxigênio Gasoso diferente das condições padrões pode ser determinada de  $\rho_2 = \rho_1(P_2/P_1)(P_1/P_2)$ , onde  $P_1 = 14,7$  psi,  $T_1 = 68$  °F,  $\rho_1 = 0,083$

# EQUAÇÕES DE PROJETO

A seção a seguir vai detalhar equações simplificadas para o projeto de motores de foguete líquidos pequenos. A nomenclatura para o projeto de motor é mostrada na Figura 6.



**Figura 6** Configuração de Projeto de Motor

## Tubeira

A área da seção transversal da garganta da tubeira pode ser calculada se a vazão total de propelente é conhecida e as condições de operação e os propelentes forem conhecidos. Assumindo a lei dos gases perfeitos:

$$A_t = w_t / P_t \sqrt{R T_t / \gamma g_c} \quad (7)$$

Onde  $R$  = constante dos gases, dada por  $R = \bar{R} / M$ .  $\bar{R}$  é a constante universal dos gases igual a 1545,32 ft-lb/lb $^\circ$ R e  $M$  é a massa molecular do gás. A massa molecular dos gases quentes provenientes da combustão de oxigênio gasoso/combustível de hidrocarboneto é por volta de 24, então  $R$  é por volta de 65 ft-lb/lb $^\circ$ R.

Gama,  $\gamma$ , é a razão dos calores específicos do gás e é uma variável termodinâmica que o leitor é encorajado a ler em outro lugar (veja em Bibliografia). Gama é por volta de 1,2 para os produtos da combustão de oxigênio gasoso/combustível de hidrocarboneto.

$g_c$  é a constante relacionada a gravidade da Terra e é igual a 32,2 ft/s $^2$ .

Para cálculos adicionais, o leitor pode considerar as seguintes constantes sempre que propelentes de oxigênio gasoso/combustíveis de hidrocarboneto são utilizados:

$$R = 65 \text{ ft-lb/lb}^\circ\text{R}$$

$$\gamma = 1,2$$

$$g_c = 32,2 \text{ ft/s}^2$$

$T_t$  é a temperatura dos gases na garganta. A temperatura dos gases na garganta é menor do que na câmara de combustão devido a perdas de energia térmica acelerando os gases a velocidade do som (número de Mach = 1) na garganta. Então

$$T_t = T_c \left[ \frac{1}{1 + \frac{\gamma - 1}{2}} \right] \quad (8)$$

Para  $\gamma = 1,2$

$$T_t = (0,909)(T_c) \quad (9)$$

$T_c$  é a temperatura da chama na câmara de combustão em graus Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ ), dado por

$$T (^{\circ}\text{R}) = T (^{\circ}\text{F}) + 460 \quad (10)$$

$P_t$  é a pressão do gás na garganta. A pressão na garganta da tubeira é menor que na câmara de combustão devido a aceleração dos gases até a velocidade do som (número de Mach = 1) na garganta. Então

$$P_t = P_c \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (11)$$

Para  $\gamma = 1,2$

$$P_t = (0,564)(P_c) \quad (12)$$

Agora os gases quentes precisam ser expandidos na seção divergente da tubeira para obter o empuxo máximo. A pressão desses gases vai diminuir enquanto a energia é usada para acelerar o gás e agora precisamos achar essa área da tubeira onde a pressão do gás é igual a pressão atmosférica. Essa área será a área de saída da tubeira.

O número de Mach é a razão da velocidade do gás pela velocidade do som local. O número de Mach na saída da tubeira é dada pela expressão de expansão do gás perfeito

$$M_e^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_c}{P_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (13)$$

$P_c$  é a pressão na câmara de combustão e  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica, ou 14,7 psi. A área de saída da tubeira correspondente ao número de Mach da saída resultante da pressão na câmara escolhida é dada por

$$A_e = \frac{A_t}{M_e} \left[ \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2}{(\gamma+1)/2} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (14)$$

Sendo que gama é 1,2 para oxigênio gasoso/combustíveis de hidrocarboneto, nós podemos calcular os parâmetros para uso futuro no projeto; os resultados estão na Tabela III.

Tabela III Parâmetros da Tubeira para Pressões na Câmara Variáveis,  $\gamma=1,2$ ,  $P_{atm} = 14,7\text{psi}$

$P_c$	$M_e$	$A_e/A_t$	$T_e/T_c$
100	1,95	1,79	0,725
200	2,33	2,74	0,65
300	2,55	3,65	0,606
400	2,73	4,6	0,574
500	2,83	5,28	0,55

Então,

$$A_e = A_t(A_e/A_t) \quad (15)$$

A razão de temperatura entre os gases na câmara e na saída da tubeira é dada por

$$T_e = T_c(T_e/T_c) \quad (16)$$

O diâmetro da garganta da tubeira é dado por

$$D_t = \sqrt{4A_e/\pi} \quad , \quad \pi = 3,1415 \quad (17)$$

E o diâmetro da saída da tubeira é dado por

$$D_t = \sqrt{4A_e/\pi} \quad (18)$$

Um bom valor para o meio ângulo de convergência  $\beta$  (veja Figura 6) é  $60^\circ$ . O meio ângulo de divergência,  $\alpha$ , não deve ser maior que  $15^\circ$  para prevenir perdas internas de escoamento.

## Câmara de Combustão

O parâmetro que descreve o volume da câmara necessário para que haja combustão completa é o comprimento característico da câmara,  $L^*$ , que é dado por

$$L^* = V_c/A_t \quad (19)$$

onde  $V_c$  é o volume da câmara (incluindo a seção convergente da tubeira), em polegadas cúbicas, e  $A_t$  é a área da garganta ( $\text{in}^2$ ). Para oxigênio gasoso/combustíveis de hidrocarboneto, um  $L^*$  de 50 a 100 polegadas é apropriado.  $L^*$  é um substituto para determinar o tempo de residência dos propelentes reagindo na câmara de combustão.

Para reduzir perdas devido a velocidade de escoamento dos gases na câmara, a área da seção transversal da câmara de combustão deve ser pelo menos três vezes a área da garganta da tubeira.

A área da seção transversal da câmara de combustão é dada por

$$A_c = \pi D_c^2/4 \quad (20)$$

O volume da câmara é dado por

$$V_c = A_c L_c + \text{volume convergente}$$

Para câmaras de combustão pequenas o volume convergente é por volta de 1/10 o volume da porção cilíndrica da câmara, então

$$V_c = 1,1(A_c L_c) \quad (21)$$

O diâmetro da câmara para câmaras de combustão pequenas (empuxo menor que 75 lbs) deve ser de três a cinco vezes o diâmetro da garganta da tubeira, para que o injetor tenha boa área de utilização.

## Espessura da Parede da Câmara

A câmara de combustão deve ser capaz de aguentar a pressão interna da combustão dos gases quentes. A câmara de combustão também deve estar fisicamente anexada a bolsa de resfriamento e a espessura da parede da câmara tem que ser suficiente para soldagem ou brasagem. Desde que a câmara seja cilíndrica, a tensão atuante na parede é dada por

$$S = PD/2t_w \quad (22)$$

Onde P é a pressão na câmara de combustão (negligenciando os efeitos da pressão do sistema de refrigeração fora da parede), D é o diâmetro do cilindro, e  $t_w$  é a espessura da parede do cilindro. Um material típico para pequenas câmaras de combustão resfriadas com água é o cobre, devido a sua tensão admissível que é por volta de 8000 psi. Então a espessura da parede da câmara de combustão é dada por

$$t_w = PD/16000 \quad (23)$$

Esse é a espessura mínima; na verdade, a espessura deve ser maior para permitir soldagem e evitar flambagem e concentradores de tensão. A Equação (22) também pode ser usada para calcular a espessura da bolsa de resfriamento. Novamente,  $t_w$  será a espessura mínima, já que soldagem e considerações de projeto (como extrusão para O'rings, etc.) geralmente precisam de paredes mais grossas do que a indicada pela equação da tensão. Um novo valor de tensão admissível deve ser usado na Equação (22), dependendo do material escolhido.

## Resfriamento do Motor

O amador não deve considerar construir motores não resfriados, já que eles podem operar por um curto tempo e o seu projeto demanda um conhecimento completo de engenharia de transferência de massa e calor. Motores de foguetes resfriados necessitam de que algumas ou todas as partes que entram em contato com os gases quentes da combustão, sejam resfriados. Geralmente o injetor é auto resfriado pela vazão de propelente. A câmara de combustão e a tubeira definitivamente precisam de refrigeração.

A bolsa de refrigeração permite a circulação de um refrigerante, que geralmente no caso de motores para voo é um dos propelentes. Entretanto,

para testes estáticos para operação amadora, água é o único refrigerante recomendado. A bolsa de refrigeração consiste em uma parede interna e uma externa. A câmara de combustão é a parede interna e outro concêntrico, mas maior, cilindro é a parede externa. O espaço entre as paredes serve de passagem para o refrigerante. A região da garganta da tubeira tem a maior intensidade de transferência de calor e, logo, é a mais difícil de resfriar.

A liberação de energia por unidade de volume da câmara de um motor de foguete é muito grande, e pode ser 250 vezes de uma caldeira de vapor ou cinco vezes de uma câmara de combustão de uma turbina. A taxa de transferência de calor de um motor de foguete é geralmente 20 a 200 vezes de uma caldeira. Logo, aparentemente, o resfriamento de um motor de foguete líquido é uma difícil e exigente tarefa. O projeto completo de transferência de calor de um motor de foguete é extremamente complexo e, geralmente, está além da capacidade da maioria dos amadores. Algumas orientações empíricas importantes de projeto estão disponíveis e estão listadas a seguir:

1. Use água como refrigerante;
2. Use cobre para a câmara de combustão e paredes da tubeira;
3. A velocidade de fluxo da água na bolsa de resfriamento deve ser 20-50 ft/s;
4. A vazão de água deve ser alta o suficiente para que não haja evaporação;
5. Estenda a bolsa de resfriamento a água além da face do injetor;
6. Uma vazão estável de água é essencial;

## Transferência de Calor

A maior parte do calor transferido dos gases quentes na câmara para as paredes da câmara é por convecção. A quantidade de calor transferida por condução é pequena a quantidade transferida por radiação geralmente é menor que 25% do total. As paredes da câmara devem ser mantidas a uma certa temperatura que a resistência do material é adequada para prevenir falhas. Falhas no material são causadas geralmente por aumento da temperatura do lado dos gases até enfraquece-lo, derrete-lo, ou danos na parede da câmara ou por aumento na temperatura da parede do lado do líquido refrigerante, levando ao líquido vaporizar. A falha é causada por um aumento brusco de temperatura na parede devido a uma excessiva transferência de calor para o líquido refrigerante.

Em câmaras resfriadas por água o calor transferido é absorvido pela água. A água deve ter capacidade calorífica para prevenir que a água seja fervida em qualquer ponto dentro da bolsa de resfriamento. O calor total transferido da câmara para a água é dado por

$$Q = q A = w_w c_p (T - T_i) \quad (24)$$

Onde

$Q$  = calor total transferido, Btu/s

$q$  = taxa média de transferência de calor da câmara, Btu/in<sup>2</sup>s

$A$  = área de transferência, in<sup>2</sup>

$w_w$  = vazão de refrigerante, lb/s

$c_p$  = calor específico do refrigerante, Btu/lb°F

$T$  = temperatura do refrigerante saindo da bolsa, °F

$T_i$  = temperatura do refrigerante entrando na bolsa, °F

O uso dessa equação será mostrado na seção Exemplo de Projeto.

## Materiais

As paredes da câmara de combustão e da tubeira tem que aguentar relativas altas temperaturas, altas velocidades de gases, erosão química e altas tensões. O material das paredes tem que ser capaz de permitir alta taxa de transferência de calor (o que significa boa condutividade térmica) e, ao mesmo tempo, ter resistência adequada para aguentar a pressão de combustão na câmara. Os requisitos dos materiais são críticos apenas nessas partes que entram em contato direto com os gases dos propelentes. Os outros componentes do motor podem ser feitos de materiais convencionais.

Uma vez que o material da parede de um motor em operação começa a falhar, a queima final e a destruição do motor são extremamente rápidas. Mesmo um minúsculo buraco na parede da câmara vai quase imediatamente (dentro de um segundo) aumentar em um grande buraco por causa dos gases quentes (4000-6000°F) que oxidam ou derretem o metal que depois é expelido, expondo mais metal aos gases quentes.

Metais exóticos e difíceis técnicas de fabricação são usados em mísseis e motores de foguetes espaciais atualmente, provendo uma estrutura leve requerida em lançamentos e veículos de voo. Esses metais avançados e técnicas de fabricação estão muito longe do alcance dos amadores. Entretanto, o uso de metais e técnicas de fabricação mais comuns (e muito mais baratos!) é bem possível, exceto para motores de voo que precisam ser leves. Já que quase todos as operações de foguetes amadores devem ser conduzidas em uma bancada de testes estática, isso não é uma restrição severa a construtores amadores. Experiência com uma boa variedade de projetos de motores de foguete levam as seguintes recomendações para motores de foguete amadores:

1. A câmara de combustão e a tubeira devem ser usinados em uma única peça, de cobre;
2. As partes do injetor que entram em contato com os gases quentes da câmara também devem ser usinados em cobre;

3. A bolsa de resfriamento e as partes do injetor que não entram em contato com os gases quentes dos propelentes devem ser feitos de latão ou aço inox;
4. Usinagem e soldagem de alta qualidade são essenciais para produzir um seguro e utilizável motor de foguete. Serviços de má qualidade ou sem cuidado, ou soldagem mal feita, podem facilmente causar falha no motor;

## Injetores

A função do injetor é introduzir os propelentes dentro da câmara de combustão de certa forma que garanta uma combustão eficiente. Existem dois tipos de injetor que o amador pode considerar para motores pequenos. Um desses é o “jato colidente triplo”, onde o oxidante e o combustível são injetados por meio de um certo número de furos separados para que os jatos se intercedam entre si. O jato de combustível vai colidir com o jato de oxidante e ambos irão quebrar em pequenas gotas. Quando oxigênio gasoso é usado como oxidante, e hidrocarboneto líquido como combustível, a colisão do jato líquido com jato de gás em alta velocidade resulta em difusão e evaporação, causando boa mistura e uma combustão eficiente. A desvantagem desse tipo de injetor é que furos extremamente pequenos são necessários para pequenas vazões e as características e equações hidráulicas usadas normalmente para projetar os parâmetros do injetor, não dão bons resultados para pequenos orifícios. Furos pequenos também são difíceis de serem furados, especialmente em cobre.

Entretanto, para prover uma relação completa de equações usadas no projeto de motor de foguete, nós apresentamos abaixo a equação de vazão de um líquido em um orifício simples (um furo circular, por exemplo)

$$w = C_d A \sqrt{2g\rho\Delta P} \quad (25)$$

Onde

$w$  = vazão mássica de propelente, lb/s

$A$  = área do orifício, ft<sup>2</sup>

$\Delta P$  = queda de pressão através do orifício, lb/ft<sup>2</sup>

$\rho$  = densidade do propelente, lb/ft<sup>3</sup>

$g$  = constante gravitacional, 32.2 ft/s<sup>2</sup>

$C_d$  = coeficiente de descarga do orifício

O coeficiente de descarga para um orifício simples bem feito geralmente terá valores entre 0.5 e 0.7.

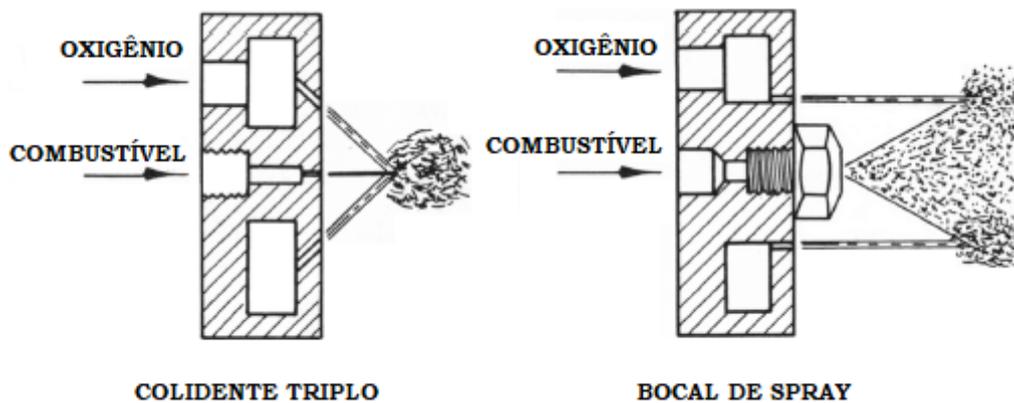
A velocidade de injeção, ou velocidade do jato que sai do orifício, é dada por

$$v = C_d \sqrt{2g(\Delta P/\rho)} \quad (26)$$

Quedas de pressão de injeção de 70 a 150 psi, ou velocidades de injeção de 50 a 100 ft/s, geralmente são usados em motores de foguete líquido pequenos. A queda de pressão de injeção tem que ser alta o suficiente para eliminar instabilidade na combustão dentro da câmara de combustão, mas não pode ser tão grande que os sistemas de pressurização e armazenamento usados para fornecer combustível para o motor sejam penalizados.

Um segundo tipo de injeção é o bocal de spray em que spray cônico, spray de cone sólido, spray de cone oco, ou outro tipo de spray pode ser obtido. Quando um combustível de hidrocarboneto é forçado por um bocal de spray (similares a aqueles usados em queimadores de óleos domésticos) as gotas resultantes de combustível são facilmente misturadas com oxigênio gasoso e a mistura resultante é rapidamente vaporizada e queimada. Bocais de spray são especialmente atrativos para os amadores, já que empresas produzem eles comercialmente para queimadores de óleo e outras aplicações. O amador só precisa determinar o tamanho e as características do spray necessárias para o projeto do motor e depois o bocal correto pode ser comprado a baixo custo. A Figura 7 ilustra os dois tipos de injetores.

O uso de bocais de spray comerciais para motores de foguete amadores é altamente recomendado.



**Figura 7** Injetores para Motores de Foguete Amadores

## EXEMPLO DE PROJETO

O exemplo a seguir ilustra o uso de equações, tabelas e conceitos apresentados nas seções anteriores.

Um motor de foguete líquido pequeno refrigerado por água será projetado com pressão na câmara de 300psi e empuxo de 20lbs. O motor é para ser operado no nível do mar usando oxigênio gasoso e gasolina como propelentes.

### Passo 1

Da Tabela 1 e Figuras 3, 4 e 5 nós determinamos que a razão O/F ótima é de 2,5 e o impulso específico ideal é de 260s. A vazão mássica total de propelente é dada pela Equação (3)

$$w = F/I_{sp} = 20/260 = 0,077 \text{ lb/s}$$

Já que a razão de mistura,  $r$ , é de 2,5, nós achamos da Equação (5)

$$w_f = w/(r + 1) = 0,077/3,5 = 0,022 \text{ lb/s}$$

Da Equação (6) a vazão mássica de oxigênio é

$$w_o = 0,077 - 0,022 = 0,055 \text{ lb/s}$$

Para checar, nós dividimos a vazão mássica de oxigênio pela vazão mássica de combustível e o resultado é 2,5, como deveria ser.

### Passo 2

Da Tabela 1 nós notamos que a temperatura do gás na câmara é de 5742 °F ou por volta de 6202°R. Da Equação (9) a temperatura do gás a garganta da tubeira é

$$T_t = 0,909 (T_c) = 0,909(6202) = 5650 \text{ }^\circ\text{R}$$

### Passo 3

Da Equação (12) a pressão na garganta da tubeira é

$$P_t = 0,564(P_c) = 0,564(300) = 169 \text{ psi}$$

### Passo 4

A área da garganta da tubeira é dada pela Equação (7)

$$A_t = (w/P_t)(RT_t/\gamma g_c)^{1/2}$$

$$A_t = (0,077/169)(9500)^{\frac{1}{2}} = 0,0444 \text{ in}^2$$

#### Passo 5

O diâmetro da garganta da tubeira é dado pela Equação (17)

$$D_t = (4A_t/\pi)^{1/2} = (0,0566)^{1/2} = 0,238 \text{ in}$$

#### Passo 6

Da Tabela III nós achamos que para pressão na câmara de 300 psi e pressão de saída da tubeira de 14,7 psi (nível do mar)

$$A_e/A_t = 3,65$$

Então a área de saída da tubeira é, da Eq. (15)

$$A_e = 3,65A_t = (3,65)(0,0444) = 0,162 \text{ in}^2$$

#### Passo 7

O diâmetro da saída da tubeira é, da Eq. (17)

$$D_e = (4A_e/\pi)^{1/2} = (0,2065)^{1/2} = 0,4555 \text{ in}$$

#### Passo 8

Para essa combinação de propelentes nós vamos assumir  $L^*$  da câmara de combustão de 60 polegadas. O volume da câmara de combustão é dado pela Eq. (19)

$$V_c = L^* A_t = (60)(0,0444) = 2,67 \text{ in}^3$$

#### Passo 9

O comprimento da câmara é encontrado na Eq. (21)

$$V_c = (1,1)(A_c L_c)$$

Entretanto, nós temos que primeiro determinar a área da câmara ou  $A_c$ . Nós fazemos isso assumindo que o diâmetro da câmara é cinco vezes o diâmetro da garganta da tubeira ou  $D_c = 5D_t$ , então

$$D_c = 1,2 \text{ in} \quad \text{e} \quad A_c = 1,13 \text{ in}^2$$

Então,

$$L_c = V_c / (1,1)(1,13) = 2,67 / 1,245 = 2,15 \text{ in}$$

### Passo 10

Cobre será usado na câmara de combustão e na tubeira. A espessura da parede é dada pela Eq. (23)

$$t_w = PD / 16000 = (300)(1,2) / 1600$$
$$t_w = 0,0255 \text{ in}$$

Para permitir tensão adicional fatores de soldagem nós temos que definir a espessura da parede como 3/32 ou 0,09375 in e vamos assumir que a espessura da garganta da tubeira também tem essa espessura.

### Passo 11

Experiências anteriores com motores de foguete líquidos pequenos resfriados com água mostrou que podemos esperar que a câmara de combustão e a tubeira de cobre experienciam uma taxa de transferência de calor média por volta de 3 Btu/in<sup>2</sup>-s. A área de transferência de calor da câmara de combustão é a área da superfície externa da câmara e da tubeira. Essa área superficial é dada por

$$A = \pi(D_c + 2t_w)(L_c) + \text{área do cone da tubeira}$$
$$A = 9,4 \text{ in}^2 + \text{área do cone da tubeira}$$

A área do cone da tubeira até a garganta pode ser assumida como 10% da área da superfície da câmara, então

$$A = (1,1)(9,4) = 10,35 \text{ in}^2$$

O calor total transferido para o refrigerante é dado pela Eq. (24)

$$Q = qA = 3(10,35) = 31 \text{ But/s}$$

### Passo 12

A vazão de água pode ser calculada assumindo um aumento desejado de temperatura da água. Se isso é 40°F, então, da Eq. (24)

$$w_w = Q/\Delta T, \text{ onde o } c_p \text{ da água} = 1$$
$$w = 31/40 = 0,775 \text{ lb de água por segundo}$$

### Passo 13

A passagem de fluxo anular entre a parede da câmara e a bolsa tem que ser dimensionada para que a velocidade de fluxo seja de pelo menos 30 ft/s. Essa velocidade é obtida quando a passagem tem dimensões como as determinadas a seguir

$$v_w = w_w/\rho A$$

Onde  $v_w = 30 \text{ ft/s}$ ,  $w_w = 0,775 \text{ lb/s}$ ,  $\rho = 62,4 \text{ lb/ft}^3$  e  $A$  é a área da passagem de fluxo anular, que é dada por

$$A = (\pi/4)(D_2^2 - D_1^2)$$

Onde  $D_2$  é o diâmetro interno da bolsa e  $D_1$  é o diâmetro externo da câmara de combustão, que é dado por

$$D_1 = D_C + 2t_w$$

Substituindo nas equações acima

$$D_2 = \sqrt{\frac{4w_w}{v_w\rho\pi} + D_1^2}$$

$$D_2 = (0,0151)^{1/2} = 0,123 \text{ ft} = 1,475 \text{ in}$$

$$D_2 - D_1 = 0,085 \text{ in}$$

O espaço para a água passar é de 0,0425 in.

#### Passo 14

O injetor de combustível para esse pequeno motor de foguete será um bocal comercial de spray com um ângulo de spray de 75°. A capacidade necessária do bocal é determinada pela vazão mássica de combustível

$$w_f = 0,022 \text{ lb/s} = 1,32 \text{ lb/min}$$

Já que existe seis libras de gasolina por galão, a vazão necessária é de 0,22 galões por minuto (gpm). Agora o bocal de spray pode ser comprado em qualquer fornecedor (veja a lista de fornecedores); o material do bocal deve ser de latão para garantir adequada transferência de calor para o combustível.

Se um bocal colidente foi escolhido, a determinação da quantidade de furos no injetor e seus tamanhos seriam da seguinte forma:

A área de vazão para o combustível é dada pela Equação (25)

$$A = w_f / (C_d) (\sqrt{2g\rho\Delta P})$$

Nós vamos assumir que o  $C_d = 0,7$  com uma queda de pressão de injeção de 100 psi. A densidade da gasolina é por volta de 44,5 lb/ft<sup>3</sup>, então

$$A = 0,022 / (0,7)(6430) = 0,0000049 \text{ ft}^2$$

$$A = 0,000706 \text{ in}^2$$

Se apenas um furo for utilizado (uma prática ruim que pode levar a instabilidade na combustão) seu diâmetro seria

$$D = (4A/\pi)^{1/2} = 0,030 \text{ in}$$

Uma broca 69 pode ser utilizada para esse furo.

Se dois furos forem utilizados, seus diâmetros seriam

$$D = (4A/\pi)^{1/2} = 0,021 \text{ in}$$

Uma broca 75 pode ser utilizada para esses furos.

### Passo 15

Os furos de injeção para oxigênio gasoso serão orifícios simples. O tamanho desses furos devem ser tal que a velocidade de jato de cerca de 200 ft/s seja obtida com a vazão mássica desejada. Os furos não podem ser muito pequenos a ponto de alcançar a velocidade do som, já que isso resultaria em uma alta pressão para alcançar a vazão de oxigênio necessária pelos orifícios.

Se um injetor de bocal de spray de combustível for utilizado, nós vamos assumir o uso de quatro igualmente espaçadas portas de injeção de oxigênio paralelas à linha de centro da câmara de combustão ao redor desse bocal. Se assumirmos uma queda pressão de injeção de 100 psi, então a pressão de gás do oxigênio na entrada das portas de injeção serão de 400 psi (pressão da câmara mais queda de pressão). A densidade do oxigênio gasoso a 400 psi e a temperatura de 68 F é dada pela lei dos gases perfeitos (Veja a Tabela II)

$$\rho_2 = \rho_1(P_2/P_1) = 2,26 \text{ lb/ft}^3$$

Assumindo incompressibilidade, a área de injeção é dada por

$$A = w_0/\rho v_0$$

Já que sabemos a vazão de oxigênio e a velocidade de injeção desejada, nós podemos facilmente determinar a área total de injeção

$$A = 0,055/(2,26)(200) = 0,0001217 \text{ ft}^2$$

$$A = 0,0175 \text{ in}^2$$

Já que serão quatro furos, cada furo tem uma área de 0,004375 in<sup>2</sup> e o diâmetro desses furos é

$$D = (0,00558)^{1/2} = 0,0747 \text{ in}$$

Uma broca 48 pode ser utilizada para esses furos.

Esses jatos de oxigênio de mesmo tamanho também poderiam ser utilizados com dois jatos colidentes de combustível. Os furos, de oxigênio e de

combustíveis, devem ser feitos em um ângulo de 45 graus em relação à superfície do injetor com o ponto de interseção dos jatos a aproximadamente 1/4 de polegada dentro da câmara de combustão.

## Projeto

Os cálculos de projeto acima fornecem as dimensões, espessura e tamanho dos orifícios para a maioria dos componentes do nosso motor de foguete. O projeto atual do motor de foguete, entretanto, precisa de um julgamento de engenharia e conhecimento em usinagem, soldagem e fatores operacionais, já que tudo isso determina a configuração final do motor e seus componentes. Talvez a melhor forma de chegar a um projeto final é sentar com materiais de esboço e começar a esboçar uma seção transversal do motor. Uma escala de 2/1 (ou duas vezes maior do tamanho real) é aceitável para esses motores pequenos e possibilitará o projetista a visualizar melhor a montagem completa.

Usando as dimensões obtidas nos cálculos do exemplo e a técnica de projeto descrita acima, a montagem do motor de foguete mostrada na Figura 8 é obtida. O projeto do motor apresenta fácil fabricação e montagem.

## FABRICAÇÃO

A fabricação e a montagem de motores de foguete líquido pequenos não é mais difícil que a maioria dos projetos sérios de amadores, como os modelos de motores a vapor, motores a gasolina e turbinas. Como o motor de foguete não tem partes rotativas, balanceamento dinâmico não é necessário. Entretanto, o uso de materiais de qualidade e homogêneos e técnicas de fabricação cuidadosas são definitivamente necessários para produzir um motor de foguete seguro e funcional.

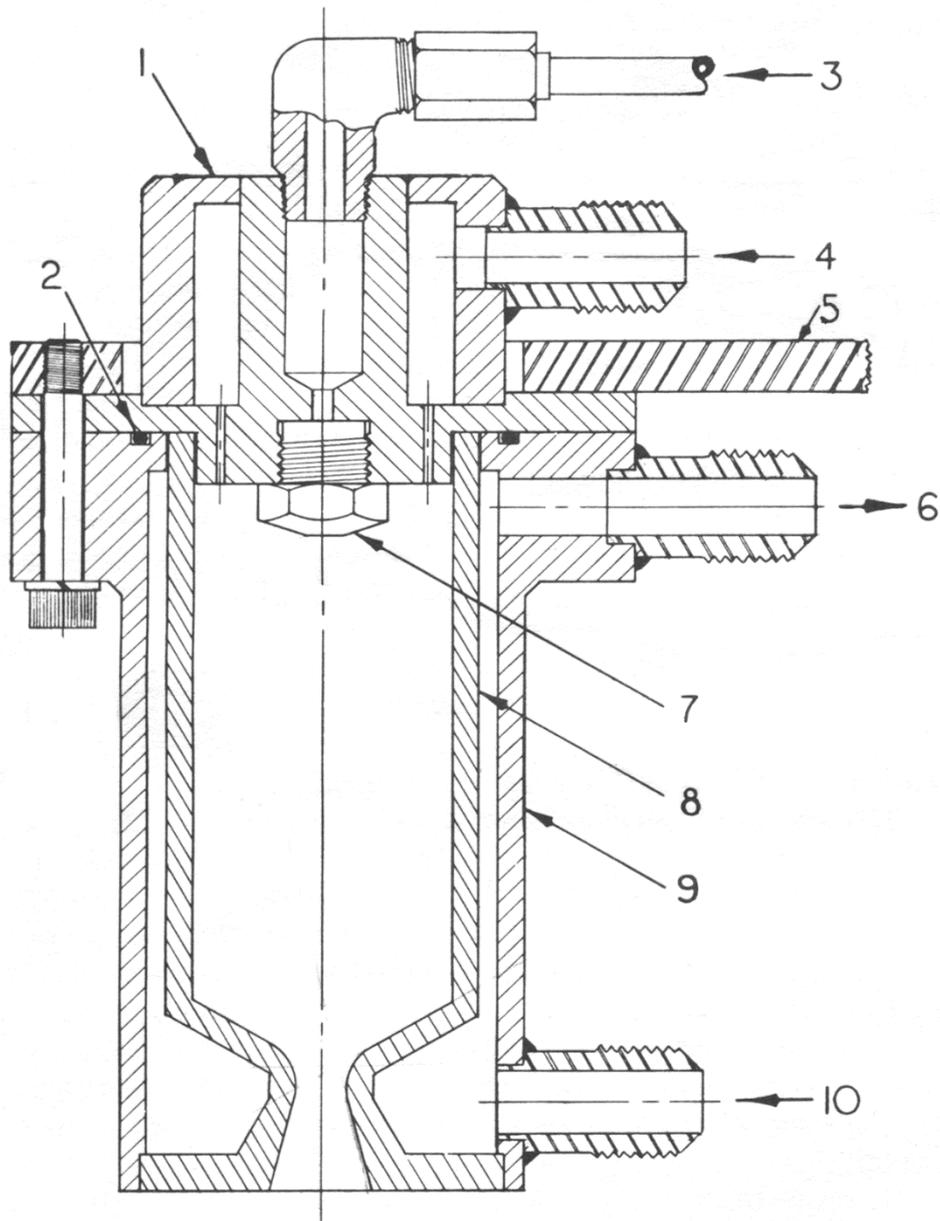
Um motor de foguete líquido pequeno bem projetado precisa dos seguintes equipamentos e ferramentas:

1. Um torno de 6" ou 10" com acessórios;
2. Furadeira de bancada;
3. Limas, paquímetros, micrômetros e etc.;
4. Tocha de oxiacetileno ou um pequeno arco de solda;

Já que um motor bem projetado terá partes simétricas, uma fresadora ou plainas não serão necessárias. O torno deve ter uma precisão de 0,001 in. A furadeira de bancada será utilizada para fazer os furos de diâmetro pequeno e deve ser de alta rotação.

Equipamentos de medição como paquímetros, micrômetros, etc.... devem ser capazes de medir diâmetros internos e externos, comprimento, localizar furos e outras utilidades necessárias para a usinagem.

A junção de dos vários componentes do motor é especialmente crítico, já que o motor vai operar em alta pressão e alta temperatura.



**Figura 8** Desenho do motor de foguete líquido pequeno montado

- |                         |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|
| (1) Montagem do injetor | (6) Refrigerante                  |
| (2) O'ring              | (7) Bocal de spray de combustível |
| (3) Combustível líquido | (8) Câmara de combustão           |
| (4) Oxigênio gasoso     | (9) Camada externa                |
| (5) Suporte do motor    | (10) Refrigerante                 |

As habilidades do soldador e as técnicas de soldagem empregadas devem ser tão boas quanto as utilizadas em aeronaves. As juntas metálicas devem estar limpas e bem encaixadas para garantir força e integridade da solda. Sempre que possível, os componentes montados devem ser testados com água pressurizada (ou nitrogênio, mas isso é perigoso) antes de testar com propelentes. Reparos de soldas fracas ou de vazamentos devem ser feitos com cuidado com subseqüentes testes com água pressurizada (chamado de hidro teste ou teste hidrostático).

Como discutido previamente, a câmara de combustão e a tubeira devem ser fabricados como uma só peça. Essa configuração, embora seja mais complicada de um ponto de vista de fabricação, elimina a necessidade de alguma forma de juntas entre as duas partes. Esta junta seria exposta a gases quentes de combustão (5700 F) de um lado e poderia, com altas probabilidades, falhar. Construindo a câmara de combustão e a tubeira em uma só peça eliminaria esse potencial ponto de falha. Deve-se ter cuidado durante a usinagem da câmara-tubeira de cobre, para garantir espessura da parede constante e o formato correto da tubeira. Seções com parede fina são potenciais pontos de falha e podem resultar em uma quase imediata falha catastrófica durante a operação.

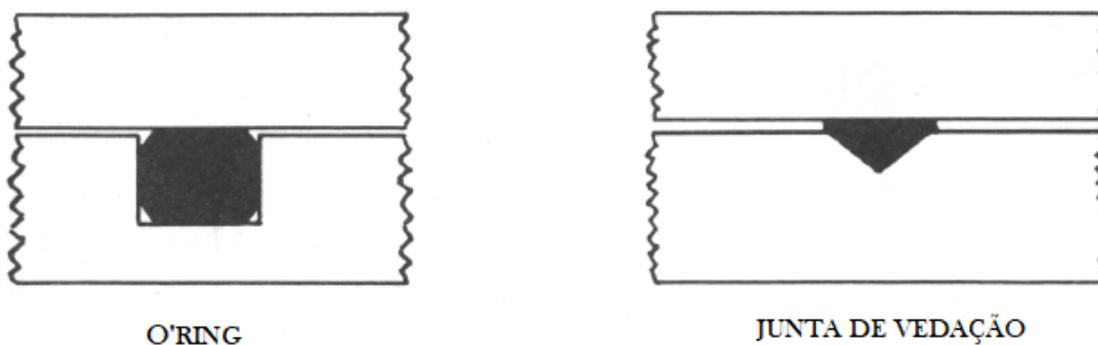
A usinagem da bolsa de resfriamento ou da camada externa é menos crítica do que da câmara de combustão-tubeira. Materiais típicos para essas partes são o aço inox e o bronze. O diâmetro interno da bolsa deve ter uma parede com um acabamento liso para reduzir a queda de pressão no resfriamento e o acabamento do diâmetro externo, o que ficará visível para o exterior, deve refletir o cuidado e a preocupação do torneiro. A bolsa também conterà as portas de entrada e saída do refrigerante. Já que o refrigerante (geralmente água) provavelmente terá uma pressão de entrada de 60 a 100 psi, essas portas e conexões devem ser fabricadas com um certo cuidado. O uso de conexões do tipo *flare* com assento cônico de metal (como os produzidos pela Parker ou Weatherhead) é altamente recomendado. A bolsa também servirá para fixar o injetor e montar o motor em uma bancada de testes. Como mostrado na Figura 8, esses dois requisitos de montagem podem ser facilmente combinados para simplificar o projeto. As forças a serem consideradas no projeto da bolsa não são as de empuxo (que é pequeno, tipicamente na ordem de 20 a 30 libras), mas sim as advindas da pressão que tentam separar o injetor da bolsa. A pressão atuando no injetor, do ponto central até o ponto de vedação entre o injetor e a bolsa, é a pressão da câmara de combustão, que é tipicamente 100 a 300 psi. A força que tenta separar o injetor da bolsa é pouco maior que 600 libras, para o projeto mostrado na Figura 8 com a pressão de combustão de 300 psi. Os parafusos que fixam os dois componentes entre si (e nesse caso também fixa os dois componentes na bancada de testes) devem suportar essa força com um fator de segurança adequado (tipicamente um fator de 2). O número e o tamanho dos parafusos necessários podem ser obtidos da Tabela IV, que fornece a carga média suportada por parafusos de aço de alta resistência de vários tamanhos. Entretanto, a resistência desses parafusos depende, de certa forma, da adequação das roscas, do material e do procedimento de aperto dos parafusos usado na montagem.

Tabela IV Carga Média Suportada por Parafusos de Aço de Alta Resistência, SF = 2

Tamanho do Parafuso	Carga Suportada, lb
10 - 32	1500
1/4 - 20	2400
1/4 - 28	2750
3/8 - 16	5800

A bolsa também deve ter um dispositivo de vedação para prevenir que o gás de alta pressão da câmara de combustão flua de volta para o injetor. O uso de um anel O'ring elastomérico é altamente desejável para um projeto de sistema de resfriamento à água. Um O'ring padrão de neoprene (fabricado por várias empresas, veja Lista de Fornecedores) fornecerá um serviço confiável se o metal ao redor não exceder temperaturas de 200-300 F. Dimensões e parâmetros de projeto para os O'rings e os sulcos dos O'rings são fornecidos nos catálogos dos fornecedores.

Outro método de vedação é o uso de juntas de vedação de amianto-cobre (muito similar aos usados em velas de ignição automotivas, só que maiores; Veja Lista de Fornecedores). A junta de vedação de cobre é posicionada em um sulco em V feito na superfície da bolsa no ponto de selamento. A superfície de contato do injetor deve ser lisa e reta, sem marcas de usinagem.



**Figura 9** Detalhe dos métodos de vedação O'ring e junta de vedação. Dimensões do sulco do O'ring são críticas e devem ser obtidos dos manuais dos fornecedores. Dimensões do sulco da junta de vedação não são críticas; a profundidade do sulco deve ser de aproximadamente 1/3 da espessura da junta de vedação antes do esmagamento.

O injetor deve ser usinado de cobre para fornecer a maior transferência de calor da face do injetor para os propelentes que entram na câmara de combustão. A estrutura externa do injetor pode ser feita de cobre, aço inox ou latão. No entanto, como as conexões de entrada de propelente (mais uma vez, devem ser de assento cônico, do tipo metal-metal), deve ser de aço inox para melhores resultados. Geralmente é uma boa ideia fazer a estrutura externa do injetor de aço inox para que as conexões de entrada possam ser fixadas no injetor por brasagem de prata sem enfraquecer as soldas.

Os furos de injeção para o oxigênio gasoso (e para o combustível, se jatos colidentes forem usados) geralmente serão feitos com brocas de diâmetros pequenos. Os furos devem ser feitos com cuidado extremo, especialmente em cobre macio. Os furos devem ter entradas e saídas livres de rebarbas e cavacos. É de vital importância que os componentes do injetor sejam completamente limpos e as rebarbas retiradas antes da montagem. Após a soldagem do injetor, deve-se usar água quente para limpar completamente o conjunto do injetor da brasagem e de resíduos, e o injetor deve receber um enxágue final com acetona ou álcool.

## EQUIPAMENTO DE TESTES

Nesta seção nós iremos discutir os equipamentos auxiliares necessários para operar o motor de foguete, a instalação desses equipamentos e seus usos seguros durante operação do motor.

### Sistema de Alimentação

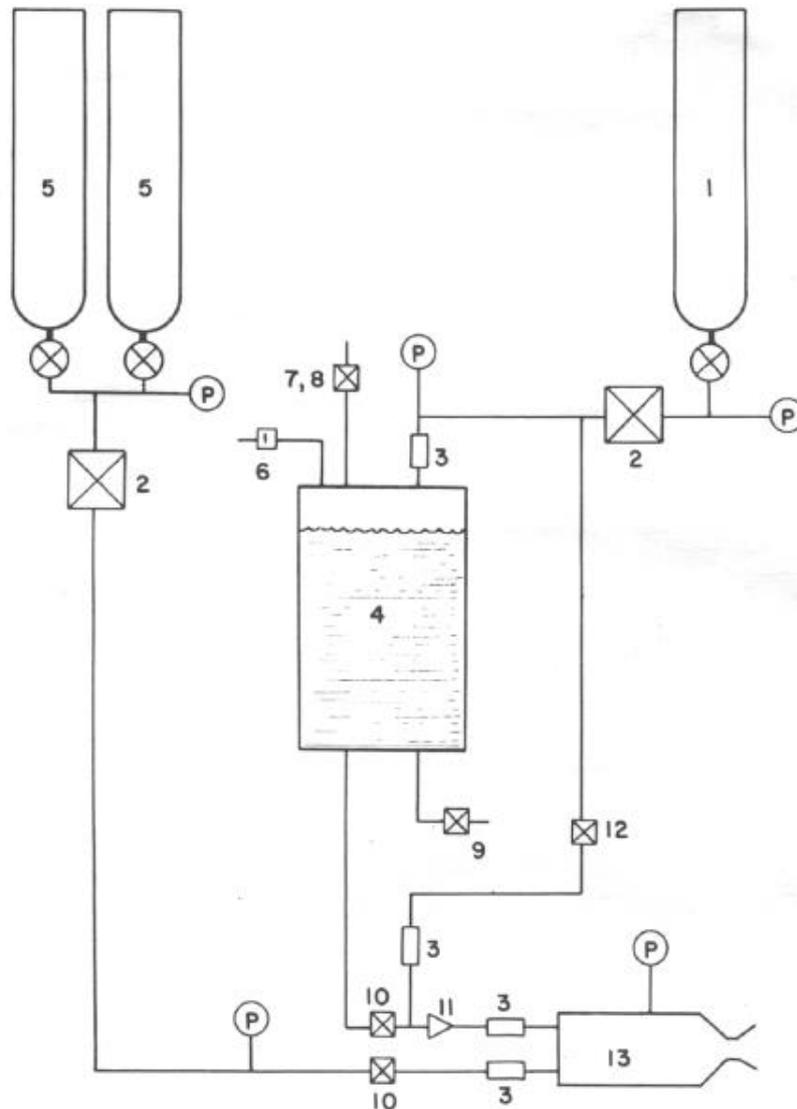
O sistema de alimentação para testes de motores de foguete amadores consiste de um tanque para armazenar o combustível líquido, um suprimento regulável de alta pressão de nitrogênio para forçar o combustível para fora do tanque até o motor, um suprimento regulável de alta pressão de oxigênio gasoso e um dispositivo de controle para regular as vazões de propelentes. Um típico sistema de alimentação pressurizado é mostrado esquematicamente na Figura 10.

### Componentes do Sistema de Alimentação

Os componentes do sistema de alimentação de um motor de foguete são especialmente projetados para operarem com gás e/ou líquidos em alta pressão. Mesmo muitos dos componentes usados em sistemas de alimentação de foguetes amadores são disponíveis em fornecedores de equipamentos de solda ou automotivos, eles são relativamente caros. O amador deve esperar que a montagem do sistema de alimentação seja bem caro que, entretanto, precisa ser feito apenas uma vez. O uso de produtos de qualidade, feitos para essa aplicação ou modificado e testado com cuidado, é obrigatório para a operação segura de motores de foguete amadores.

## Cilindros de Gás de Alta Pressão

Gases armazenados em cilindros à alta pressão (geralmente por volta de 1800 psi) são obtidos facilmente de qualquer fornecedor de cilindros de gás ou de muitos fornecedores de equipamentos de soldagem. Conexões especiais com roscas longe do padrão são usadas para prevenir o uso incorreto de equipamentos com os cilindros. Embora os cilindros podem ser comprados, geralmente eles são alugados e depois voltam ao fornecedor para reencher a um preço tabelado. Nunca se deve deixar cair ou manusear de forma incorreta cilindros de gás de alta pressão. Os cilindros devem ser armazenados de forma a não cair ou rolar; a melhor maneira de garantir isso é acorrentar ou amarrar os cilindros em uma bancada apropriada ou em uma mesa de trabalho. Quando os cilindros não estão em uso, a proteção de válvula deve ser colocada para protegê-la. Muitos fornecedores de gases publicam livros de instruções para o cuidado e uso de cilindros de alta pressão (veja em Bibliografia); o amador é encorajado a ler e seguir essas instruções profissionais.



**Figura 10** Diagrama esquemático de sistema de alimentação pressurizado. Os propelentes são um combustível líquido e oxigênio gasoso. (1) suprimento de nitrogênio gasoso em alta pressão, (2) regulador de pressão, (3) válvula de retenção, (4) tanque de combustível, (5) cilindros de oxigênio gasoso, (6) válvula de alívio, (7) válvula de ventilação, (8) porta de abastecimento, (9) válvula de drenagem, (10) válvula de controle de propelente operada remotamente, (11) filtro de combustível, (12) válvula de purga, (13) motor de foguete. P é o transdutor de pressão.

### Nitrogênio Gasoso

Nitrogênio é um gás inerte normalmente compatível com todos os materiais disponíveis. O amador terá pouca dificuldade com materiais para nitrogênio, mas deve ter cuidado para que todos os componentes são feitos para alta pressão. A limpeza dos componentes é importante para ter uma operação adequada e confiável.

### Oxigênio Gasoso

Oxigênio não irá queimar sozinho, mas suporta vigorosamente uma rápida combustão de quase todos os outros materiais. O amador deve se preocupar não apenas se os componentes suportam alta pressão, mas também deve usar somente componentes feitos de materiais compatíveis com o oxigênio e que são certificadas para oxigênio. Todos os itens, incluindo mangueiras, conexões, válvulas, reguladores e etc., DEVEM ser absolutamente livres de óleo, graxa e contaminantes similares. Limpeza completa de todos os itens em solvente, seguida de um enxágue completo em acetona é uma necessidade absoluta. Pedidos de itens comerciais devem ser marcados para indicar a intenção do uso de oxigênio gasoso de alta pressão. O amador deve sempre que possível utilizar desses serviços, mesmo que eles adicionem ao custo inicial do produto.

Ao limpar os componentes com solvente ou acetona, o amador deve observar todas as regras de segurança aplicadas a esses químicos. Eles são tóxicos e altamente inflamáveis. A limpeza deve ser feita ao ar livre e longe de prédios, chamas, ou outra possível fonte de ignição. Esses fluidos não devem ser armazenados em locais fechados, mas em locais ventilados longe de prédios principais.

### Tanque de Combustível

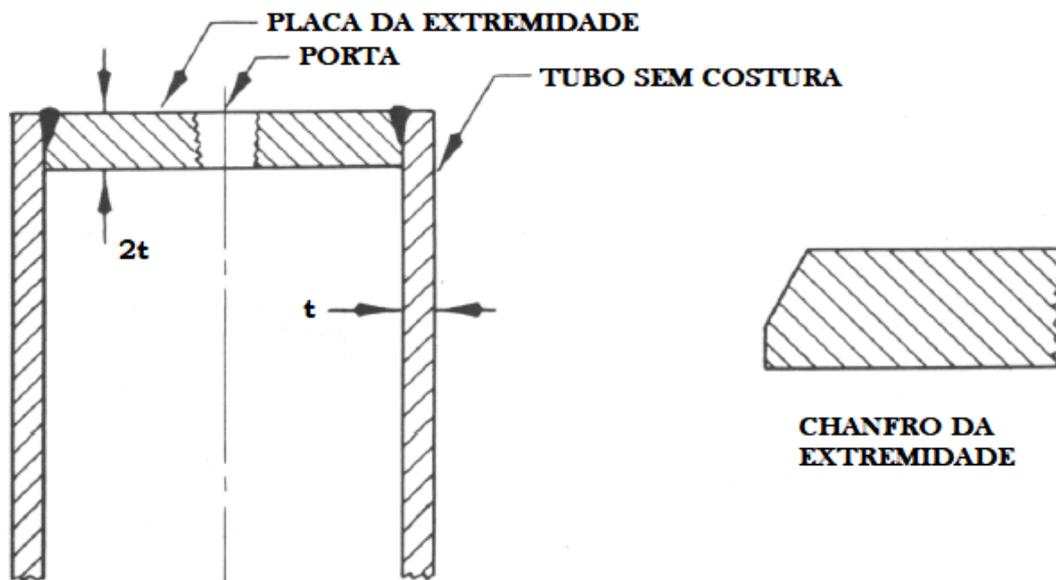
O tanque de combustível é um vaso de pressão fechado que contém o combustível líquido a pressão moderada (300-500 psi). Tanques de variados tamanhos e formatos feitos de aço carbono ou inox, são oferecidos ao público em pontos de venda de excedentes de guerra. O amador deve ter muito cuidado ao decidir usar esses tanques. Eles não devem ser modificados, já que na maioria dos casos são vasos de pressão de parede fina feitos para aeronaves, e saídas adicionais ou soldas podem enfraquecer seriamente o

tanque. Em todos os casos o tanque deve ser testado hidrosticamente a pelo menos 1,5 vezes a pressão de operação antes de ser usado em um sistema de alimentação de motor de foguete. O amador pode construir (ou ter construído) um tanque especialmente para seus requisitos. Aparentemente tubos ou tubos sem costura (aço macio ou inox) com placas planas soldadas nas extremidades formam um excelente tanque. Portas de saída são feitas facilmente nas placas. A espessura da parede do tanque é dada pela Equação (22).

$$t_w = PD/2S \quad (276)$$

Onde P é a pressão no tanque (1,5 vezes a pressão de operação desejada), D é o diâmetro externo do tanque,  $t_w$  é a espessura da parede e S é a tensão admissível. O tamanho do tanque é determinado pelo tamanho do motor de foguete e o tempo de operação desejado. O motor discutido em Exemplo de Projeto tinha uma vazão mássica de combustível de 0,022 lb/s. Um tanque com 4 polegadas de diâmetro interno e 12 polegadas de comprimento armazenaria gasolina suficiente para funcionar este motor por 175 segundos. Se o diâmetro externo do tanque é 4,5 polegadas, a tensão admissível é de 20000 psi e a pressão de operação é 500 psi, de modo que a operação de projeto é de 750 psi, a espessura mínima da parede de 0,085 polegadas foi calculada. Uma espessura de 0,250 polegadas é escolhida para permitir soldagem, resistir concentrações de pressão e é o tamanho de tubos sem costura disponíveis. O diâmetro inicial do tanque é 4 polegadas. As placas das extremidades do tanque devem ter pelo menos duas vezes a espessura da parede do tanque (i.e. para esse caso, pelo menos 1/2 polegada de espessura). A perfuração e a rosca devem ser feitas antes da soldagem, para prevenir que óleo e cavacos de metal caiam dentro do tanque. A soldagem deve ser feita por um profissional com vários passos para cada placa (ver Figura 11). O tanque deve ser completamente limpo e hidrosticamente testado antes de usar no sistema de alimentação do motor de foguete.

O tanque de combustível deve conter portas suficientes, ou a tubulação deve ser arranjado, para uma válvula de alívio (com mola ou disco), porta de entrada de gás, porta de ventilação e saída de combustível e drenagem sejam disponíveis. Muitas dessas funções podem ser incorporadas como parte da tubulação de entrada e saída de combustível para que apenas duas portas, uma em cada extremidade do tanque, são necessárias.



**Figura 11** Detalhe da extremidade do tanque. Vários passos de solda devem ser usados para fixar as placas ao tubo sem costura.

Tanques feitos de tubos sem costura não deve ser maior que seis polegadas de diâmetro; a tensão na parede é função do diâmetro e sob altas tensões teoria especializada, geralmente não é disponível ao amador, é necessária. Também, a força nas placas das extremidades aumenta rapidamente com o diâmetro do tanque.

#### Regulador de Nitrogênio Gasoso

O propósito do regulador é manter a pressão constante no lado da jusante do regulador à medida que a pressão no cilindro no lado do montante diminui. Um regulador de boa qualidade vai manter a pressão da jusante com precisão com alta precisão no alcance de vazão de gás, desde que a pressão de montante do cilindro não diminua, de modo a ficar muito próxima da pressão da jusante. Desta forma, todo o gás não é utilizável, já que algum excesso de pressão (portanto, gás) é necessário para conduzir o gás e manter controle do regulador. A vazão de nitrogênio necessária para o combustível sair do tanque é relativamente pequena e pode ser controlado por um regulador comum de oxigênio gasoso para solda equipado com conexões de cilindro de nitrogênio. No entanto, a maioria dos reguladores de soldagem não permitem o ajuste à alta pressão na jusante necessária para a operação do motor de foguete. Um número de empresas (veja a lista de fornecedores) comercializam reguladores para aplicações além da de soldagem que são admiravelmente compatíveis para a pressurização de tanques de combustível. O regulador Mity-Mite da Grove com regulação interna é especialmente atrativo. Conexões especiais baratas são necessárias para conectar esses reguladores ao cilindro.

#### Regulador de Oxigênio Gasoso

A discussão dos reguladores para nitrogênio gasoso vale aqui, exceto que deve ser limpo para o uso de oxigênio e, se possível, assento de metal-metal devem ser usados com o regulador. Fabricantes de reguladores devem ser consultados para saber materiais de assentos que podem ser utilizados com regulador de oxigênio. Conexões especiais para conectar o regulador no cilindro são disponíveis nos fornecedores de conexões de cilindros de nitrogênio. Esses fornecedores também podem fornecer kits de coletores para que dois ou mais cilindros de oxigênio podem ser usados simultaneamente para atingir durações longas de operação de motor.

### Válvulas de Controle de Propelente

As válvulas de controle de propelente permitem o operador iniciar e depois controlar remotamente a vazão de cada propelente para o motor. Essas válvulas devem ser de aço inox com selantes de teflon. Muitos fornecedores fazem esse tipo de válvula (veja a lista de fornecedores). A válvula para oxigênio gasoso deve ser maior que a de combustível. Motores do tamanho do discutido em Exemplo de Projeto devem usar uma válvula de 1/4 de polegada para o combustível (que é o tamanho 1/4 da National Pipe Thread) e 1/2 de polegada para o oxigênio. As tubulações que entram e saem das válvulas não precisam ser desse tamanho, mas as válvulas devem ser para permitir um alcance de controle de vazão com o mínimo de queda de pressão na válvula. Já que essas válvulas controlam a vazão de propelente, elas devem ser conectadas perto dos tanques e perto do motor na bancada de testes e operada remotamente por meio de extensões de manivelas de válvulas (veja a discussão em Bancada de Testes).

### Outras Válvulas

Outras válvulas necessárias no sistema de alimentação incluem as de ventilação e abastecimento do tanque de combustível, a de drenagem e a de purga de nitrogênio. Válvulas esfera baratas e de alta qualidade são altamente recomendadas para essas funções, já que elas oferecem um bom fechamento, fácil operação com indicação de aberto e fechado e abertura completa da tubulação. Válvulas de latão ou aço inox com selamento de teflon são aceitáveis e as válvulas devem ser montadas em linha ou em painel (veja lista de fornecedores).

### Válvulas de Retenção

Válvulas de retenção permitem fluxo de fluido em uma única direção. Elas são usadas largamente na indústria aeronáutica e na indústria hidráulica e são produzidas por muitas empresas. Tubulação de 1/4 de polegada é recomendada para todas as funções mostradas na Figura 10, com exceção da tubulação da válvula de retenção do oxigênio gasoso que deve ser feita de assentos de metal-metal e ter pelo menos 3/8 de polegada. Válvulas de retenção devem ser completamente limpas antes de usar e testadas para garantir que a retenção está funcionando corretamente.

### Válvulas de Alívio

O tanque de combustível necessita de um dispositivo de alívio de algum tipo para prevenir falha do tanque em caso de sobre pressurização. Mesmo sendo improvável, pode acontecer se o regulador de nitrogênio gasoso falhar ao funcionar ou ao fechar corretamente. Uma válvula de alívio ajustável de mola tensionada é recomendada, pois pode ser regulada para diferentes pressões enquanto o uso do sistema de alimentação muda e não precisa ser substituída se utilizada. Um dispositivo alternativo é o disco de ruptura que rompe a uma pressão pré-definida e alivia a sobre pressão no tanque. Discos de ruptura tem de ser substituído depois do uso e não são ajustáveis. Um disco diferente deve ser usado para cada alcance de pressão diferente.

### Filtros de Combustível

Furos de injeção de combustível em motores de foguete líquido pequenos são facilmente obstruídos com contaminantes do tanque de combustível e do sistema de controle. Um filtro de combustível que pode filtrar as partículas para dez microns é altamente recomendável e vai tirar muita aflição do amador durante o teste. Pequenos filtros são adequados para sistemas de alimentação de motores de foguete.

### Medidores de Pressão

Pressões do combustível, do oxigênio, da água e da câmara de combustão são medições essenciais para operação de motor de foguete. O manômetro de Bourdon oferece precisão, robustez, baixo custo e disponibilidade. Muitos fabricantes produzem esses medidores em uma confusa variedade de estilos, tamanhos e preços. Bourdon de bronze é recomendado já que é completamente compatível (quando limpo) com oxigênio gasoso ou combustível de hidrocarboneto e é amplamente usado que significantes economias são possíveis.

Pequenos (2 1/2 ou 3 polegadas de diâmetro) medidores de alta pressão similares aos usados em reguladores de oxigênio para soldagem devem ser usados pelo amador para medir a pressão nos cilindros ou coletores de alta pressão. Esses medidores podem ser obtidos em lojas de soldagem.

Medidores para pressões do combustível, do oxigênio, da água e da câmara de combustão devem ser de pelo menos 3 1/2 polegadas de diâmetro para fácil leitura a distância. Esses medidores de 3 1/2 Acaloy e Helicoid (veja a lista de fornecedores) são recomendados por causa de sua confiabilidade e baixo custo. Esses medidores são facilmente montados em painel e são bem instalados na bancada de testes.

### Tubulação

Tubulação se refere aos tubos e conexões usados para conectar os componentes discutidos anteriormente. Tubulação de 1/4 de polegada de diâmetro de aço inox para os sistemas de combustível e nitrogênio e 3/8 de polegada de diâmetro de aço inox para o oxigênio são recomendadas. Conexões do tipo *flare* com assentos de metal-metal também são recomendadas para conectar a tubulação em outros componentes. Tubulações

de 1/4 e 3/8 polegadas de diâmetro de cobre também podem ser usadas para os sistemas de suprimento de combustível, oxigênio e nitrogênio, porém não é tão desejável quanto aço inox e é mais facilmente dobrada. O amador deve usar apenas bons curvadores de tubo para curvar ou conformar tubos. Onde conexões são rosqueadas no tanque de combustível, em válvulas ou em outros componentes tendo rosca, o uso de fita de teflon nas roscas é recomendado. Nenhum outro composto de rosca de tubo deve ser usado, principalmente nos componentes de oxigênio gasoso.

## BANCADA DE TESTES

A bancada de testes de motor de foguete amadora é a estrutura que incorpora o método de montar de forma firme o motor de foguete (de preferência com baixa atitude da tubeira), as válvulas de controle de propelente, o tanque de combustível e tubulação associada e os cilindros de oxigênio e nitrogênio com reguladores e tubulações associadas. A estação do operador, que realmente é parte da bancada de testes, deve ser fisicamente separada da bancada de testes por pelo menos 20 pés, com uma barricada para estilhaços entre os dois. A estação do operador deve conter as extensões das válvulas de controle, a bateria do sistema de ignição e chaves associadas e um sistema de espelhos para que o operador não olhe diretamente a operação do motor de foguete.

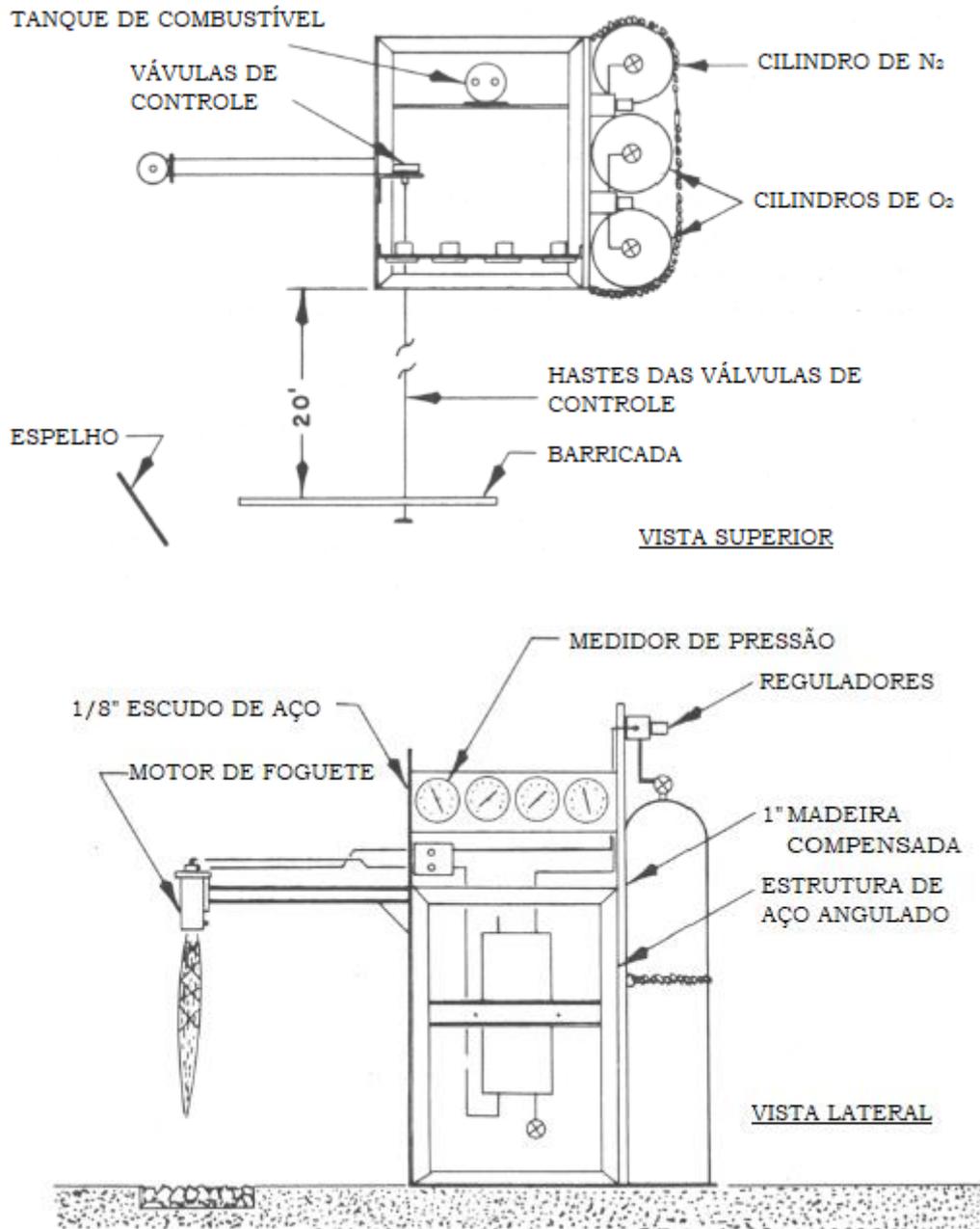
O maior risco em testes de motores de foguete pequenos são os estilhaços em caso de explosão ou desintegração do motor. Entretanto, uma bancada de testes apropriada deve ter uma barricada capaz de reduzir o efeito dos estilhaços em todas as direções.

A Figura 12 mostra esquematicamente a disposição adequada dos componentes para uma bancada de testes segura. O motor de foguete é separado das válvulas de controle de vazão de propelente por uma barricada 1/8 de polegada de espessura de aço. O motor é firmemente fixado a uma seção de aço posicionado abaixo da tubeira. O motor é montado alto o suficiente do chão para que nenhum tipo de defletor de chama seja necessário. Os cilindros de gás comprimido (um de nitrogênio e dois de oxigênio) são posicionados atrás da bancada de testes e são separadas do compartimento das válvulas de controle por outra barricada de uma polegada de espessura feita de madeira compensada. Os reguladores de nitrogênio e oxigênio são montados nessa barricada de madeira compensada sobre os cilindros. Dessa maneira, cilindros gastos podem ser substituídos por cilindros cheios sem mexer nos reguladores ou na tubulação. Uma peça de aço inox entre o coletor de oxigênio e o regulador de oxigênio e uma peça similar entre o cilindro de nitrogênio e seu regulador são removidas durante a troca de cilindros e depois reconectadas. As linhas devem sempre ser tampadas quando não estão em uso para prevenir a entrada de sujeira ou outros objetos.

O tanque de combustível é posicionado entre a barricada de aço e a de madeira compensada em uma peça de metal fixadas nas duas barricadas. O tanque é posicionado na vertical com a saída de líquido na base.

As válvulas de controle de propelente são montadas uma sobre a outra em um suporte de metal que é fixada na barricada de aço. Válvulas montadas em painel são recomendadas já que facilitam a montagem da forma descrita e

não exercem tensão na tubulação. Extensões de manivelas de válvulas, feitas de tubos de 1/4 de polegada, permitem a operação das válvulas de controle da estação de controle remoto do operador, que é localizada a pelo menos vinte pés da bancada de testes. Medidores de pressão para o tanque de combustível, a linha de combustível, a saída da água refrigerante e a câmara de combustão são montados em um painel que é fixado a barricada de frontal e traseira e são virados para a estação remota do operador.



**Figura 12** Bancada de testes para um motor de foguete líquido pequeno.

A água é trazida até um acoplador de mangueira fixada na bancada de testes, com tubulações semipermanentes entre o acoplador e o motor de foguete. Água fluindo da bolsa de resfriamento deve ser direcionada para longe

do motor ou pode ser direcionada para uma funda camada de 3 polegadas de brita posicionada abaixo da área de exaustão do motor de foguete. A brita vai prevenir que a exaustão do motor atinja terra e poeira; a água vai resfriar a brita e estender seu tempo de uso. O jato de água pode ser observado pelo operador como uma indicação que a água está realmente fluindo pelo motor.

A bancada de testes deve ter uma estrutura feita de aço soldado ou parafusado. As barricadas de aço e madeira compensada são parafusadas nessa estrutura, fornecendo rigidez e resistência. A banca de testes deve ser fixada à superfície da área de testes, seja parafusando à uma plataforma de concreto ou colocando peso com sacos de areia ou lastros de concreto.

## SEGURANÇA

Devido aos riscos físicos envolvidos em lidar com propelentes e controlar processos de combustão em alta pressão, certas precauções de segurança devem ser observadas ao testar motores de foguete estaticamente. Durante o projeto, e depois, da operação de motores de foguete líquidos amadores, as seguintes precauções de segurança gerais devem ser observadas:

1. O operador deve ser protegido por uma barricada adequada localizada a uma certa distância (pelo menos 20 pés) da unidade de teste;
2. Durante a ignição e operação do motor as válvulas de controle devem ser controladas de forma remota, que para amadores é atingida por extensores de manivela das válvulas;
3. Um extintor grande (ou, pelo menos, um suprimento adequado de água) deve sempre estar em mãos;
4. O operador não deve olhar para a unidade de testes diretamente, mas deve usar um arranjo de espelhos (como um periscópio) ou usar um vidro de segurança reforçado grosso fixado à barricada do operador. LEMBRE-SE, o perigo primário é dos estilhaços em caso de uma explosão;
5. Separando os estoques de combustível e oxidante reduzem os riscos de incêndio e explosão e limita a quantidade de propelente armazenada em uma única área;
6. A unidade da bancada de testes deve ter barricadas em vários lados para reduzir o efeito dos estilhaços em caso de explosão;
7. Válvulas, sensores de pressão e outros componentes que medem diretamente as propriedades dos fluidos não devem estar localizados na estação de operação, mas devem estar na bancada de testes e suas leituras devem ser feitas remotamente. Essa regra não se aplica aos equipamentos elétricos onde os transdutores ficam na bancada de testes e os equipamentos elétricos de leitura estão localizados na estação de operação (esse tipo de instrumentação é muito cara e está além do alcance da maioria dos amadores);

8. Sinais de alerta devem ser dados antes dos testes (ou toda vez em que válvulas dos cilindros são abertas) para notificar as pessoas que a área é perigosa. O teste NUNCA deve ser conduzido até que o operador se assegurou que todo o pessoal está atrás das barricadas de segurança ou protegidos de alguma forma;
9. O pessoal deve ser autorizado a trabalhar na área de testes apenas se o combustível e o oxidante estão separados e não pressurizados;
10. O pessoal que lida com os propelentes deve vestir equipamentos de segurança como luvas, viseiras ou aventais de borracha. Lembre-se que muitos combustíveis são tóxicos, não respire vapores de combustível, nem mesmo por um curto tempo;
11. Fumar nunca é permitido em qualquer lugar perto da área de testes quando também há a presença de propelentes, lembre-se que vapores de combustíveis de hidrocarboneto (como gasolina) pode viajar longas distâncias da área de testes e pode sofrer ignição em um ponto remoto, viajando de volta para a bancada de testes;
12. Uma lista de afazeres ajuda durante um teste de motor de foguete e deve ser feito tanto para as atividades técnicas, quanto para as de segurança para ser completado antes de testar;

## VERIFICAÇÃO DO MOTOR E CALIBRAÇÃO

Depois que o motor de foguete foi fabricado, vários testes de verificação e calibrações de vazão devem ser feitos antes de testar com propelentes.

### Testes de Vazamento

Conecte a bolsa de resfriamento do motor em uma fonte disponível de água pressurizada (como as de irrigação ou de uma casa; a pressão deve ser de 50 – 100 psi sem vazão). Conecte o sensor de pressão na porta de saída da bolsa e abra a válvula da água, permitindo que a água encha a bolsa. Observe a bolsa e o motor e procure por vazamentos. Não deve haver vazamentos.

Uma verificação similar de pressão deve ser feita no coletor do injetor de combustível. Já que a face do injetor não é facilmente entupida, faça este teste fluindo água pelo injetor. Use um filtro na linha da água para prevenir que os pequenos furos do injetor de combustível sejam obstruídos. Use um sensor de pressão conectado na linha de água o mais próximo da entrada de combustível do injetor. Não deve haver vazamentos.

### Calibração da Vazão

A taxa de vazão de água pela bolsa de abastecimento do motor deve ser determinada para várias pressões de entrada. Use uma balança de banheiro ou qualquer outra disponível para pesar, em um recipiente, a água fluindo pelo motor por um período de tempo. A pressão da água pode ser medida tanto na entrada quanto na saída da bolsa de abastecimento. Conecte uma mangueira flexível (uma variação da de jardim vai servir) à saída da bolsa resfriamento e comece a permitir a vazão de água pela bolsa até a pressão desejada. Quando regime permanente é atingido, rapidamente mova a saída da mangueira para dentro do recipiente por um período de 30 segundos, então rapidamente remova a mangueira do recipiente. Use um cronômetro ou um segundo relógio para medir o tempo e seja preciso! Obtenha a o peso líquido de água coletada subtraindo do peso do recipiente cheio o peso dele vazio. Divida o peso líquido pelo tempo em que a água foi coletada e o resultado vai ser a vazão mássica de água em lb/s. Essa operação deve ser repetida várias vezes em diferentes pressões para obter as características de vazão do refrigerante da bolsa. Se a pressão de projeto é disponível, mas insuficiente para atingir a taxa de vazão de água do projeto, cheque o tamanho da tubulação ou mangueira usada entre a fonte de água e o motor, ela pode estar restringindo a taxa de vazão. Cheque também o tamanho do duto flexível usado. Se esses testes mostrarem que alta pressão é necessária para atingir a taxa de vazão desejada, uma fonte diferente de água refrigerante pode ser necessária. Sob condições extremas, um tanque de água pressurizado com ar ou uma bomba pode ser requerida. Outra solução é desmontar o motor e furar novamente a bolsa para abrir a passagem de água. Material NÃO deve ser removido da câmara de combustão/tubeira.

Testes de vazão do injetor, usando água, pode ser feito de uma maneira similar à calibração do sistema de resfriamento, embora é questionável se vale a pena. As características de vazão da água e de combustíveis de hidrocarboneto são diferentes, tanto que a calibração da água não é diretamente comparável ao que vai acontecer quando combustível for usado. Entretanto, a queda de pressão necessária para fluir uma certa quantidade de água vai prover alguma indicação do quão perto os objetivos de projeto foram atingidos. Esse teste deve ser conduzido da mesma maneira da calibração da água refrigerante, exceto que o tempo de vazão deve ser longo o suficiente para acumular pelo menos dez libras de água.

### Verificação da Bancada de Testes

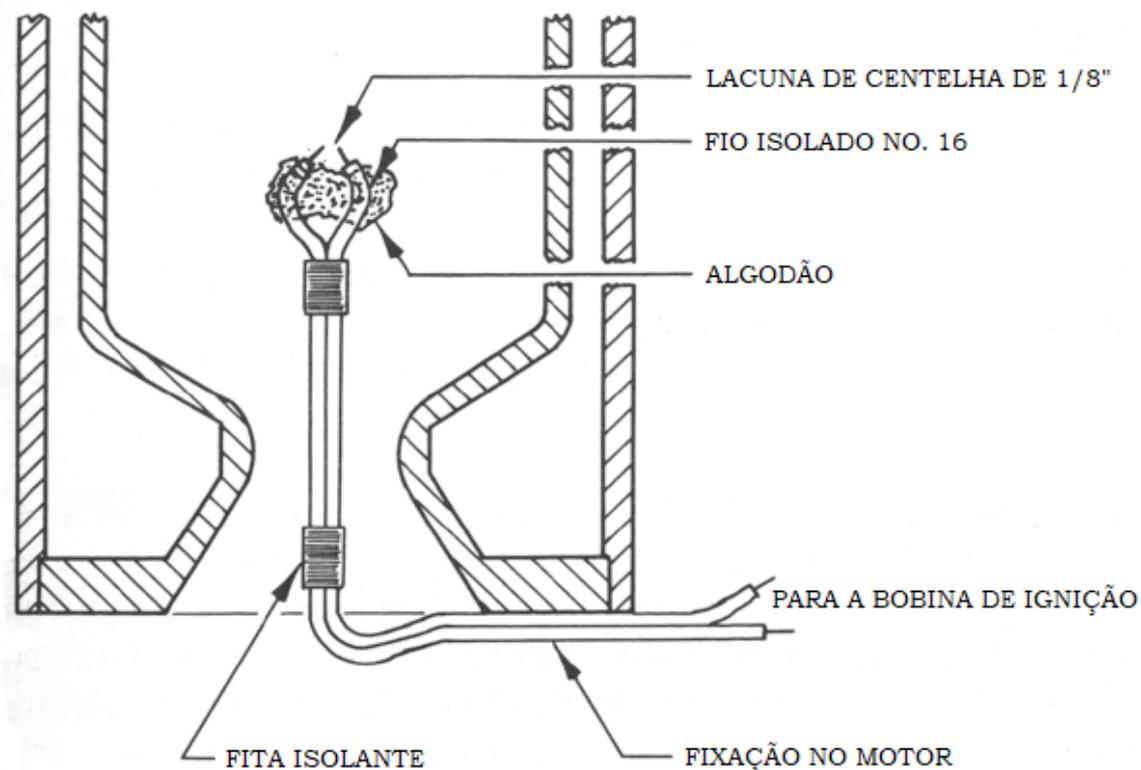
Depois que a bancada de testes e a área de operação estão completas e os componentes instalados, testes devem ser conduzidos para determinar que não haverá vazamentos de gás ou líquidos quando os propelentes forem utilizados. Encha o tanque com água limpa. Feche as linhas de combustível e oxidante onde eles normalmente são conectados no motor. Pressurize o sistema em 100 psi e procure por vazamentos. Uma solução de sabão pode ser usada para checar em volta de todas as conexões e selamentos. Bolhas de sabão indicam a presença de vazamento de gás. Se não há vazamentos, aumente a pressão para 200 psi e repita o procedimento de detecção.

Continue esse procedimento até que a pressão de operação da bancada de testes é atingida e vazamentos não são presentes. Despressurize o sistema e reabasteça o tanque de combustível com água. Fixe o motor de foguete na bancada de testes e conecte todas as tubulações. Pressurize a bancada e pratique a ignição e a sequência de operação usando água como combustível (oxigênio gasoso pode ser usado nesses testes de forma segura, se desejar). Se não há vazamentos, esvazie o tanque de combustível e seque jogando nitrogênio gasoso por alguns segundos. O motor e a bancada de testes estão prontos para o primeiro teste a quente.

## IGNIÇÃO E OPERAÇÃO

A discussão de ignição de propelente foi reservada até esse ponto, já que é uma função da bancada de testes e é necessária para a operação do motor. Os propelentes usados em motores de foguete amadores precisam de uma fonte separada para ignição. Por que o motor é pequeno, o uso de vela de ignição geralmente não é factível. Mesmo se fosse, a ignição dos propelentes na câmara de combustão por uma vela de ignição pequena é perigosa e não confiável. O tempo certo para os propelentes é extremamente importante em motores de foguete líquido bi propelente. Um excesso de um dos propelentes (se os dois são líquidos) na câmara de combustão pode levar a uma sobre pressão na ignição (conhecida como começo “severo”) e uma possível fratura na câmara de combustão. O motor amador usando oxigênio gasoso não é tão sensível a começos severos como oxidantes líquidos.

Centenas de testes com motores de foguete líquido pequenos empregando oxigênio gasoso como oxidante indicaram que uma fonte quente de ignição providencia excelente características de ignição de propelente e reduz drasticamente os começos severos. Ignição de fontes quentes funcionam da seguinte forma: dois comprimentos de fio sólido isolados #16 ou #18 são conectados e suas extremidades expostas são dobradas para formar uma lacuna de centelha de aproximadamente 3/32 polegadas. Uma quantidade pequena de algodão é enrolada em volta dos, ou fixado nos, fios muito perto da lacuna da centelha, mas sem obstruí-la. Essa montagem de ignição é colocada dentro da câmara de combustão pela tubeira, para que a lacuna de centelha fique no final inferior da câmara de combustão, mas sem bloquear a garganta da tubeira. Os fios fora do motor são entortados ou fixados para segurar a montagem de ignição em posição durante a fase de ignição. As extremidades livres dos dois fios são conectados à fonte de centelha (uma bobina de ignição Ford Modelo-T é ideal para esse propósito). A Figura 13 detalha essa fonte quente de ignição. O procedimento de ignição, depois que a bancada de testes está preparada para o teste é:



**Figura 13** Ignitor de fonte quente para motores de foguete líquido pequenos usando oxigênio gasoso como oxidante. O ignitor é consumido durante cada uso e deve ser substituído.

1. O operador se certifica que a área está limpa e pronta para o teste;
2. O operador checa a operação da bobina de ignição e depois desconecta a bobina da bateria por segurança. A bateria deve estar na estação de operação remota;
3. O algodão é ensopado em gasolina ou querosene;
4. O ignitor é colocado pela tubeira para dentro da câmara de combustão e firmada;
5. As válvulas dos cilindros são abertas, o tanque de combustível é pressurizado e todas as pressões dos gases ajustados para a pressão de operação;
6. A água refrigerante é permitida fluir pelo motor a taxa apropriada;
7. O sino ou sirene de teste é tocado. A bobina de ignição é reconectada à bateria;
8. A válvula de oxigênio é aberta bem levemente para permitir uma vazão de oxigênio gasoso muito pequena para passar no ignitor e para fora da câmara de combustão;
9. A bobina de ignição é energizada. Dentro da câmara de combustão, o algodão deve pegar fogo imediatamente na atmosfera de oxigênio. O operador deve ter dificuldade

averiguando se o algodão está realmente queimando, embora pedaços pequenos de material em chamas podem ser ejetados pela tubeira;

10. A válvula de controle de combustível é aberta levemente para permitir que o combustível flua para dentro da câmara de combustão. Uma chama deve aparecer imediatamente na saída da tubeira e um assobio baixo deve ser ouvido;
11. As taxas de vazão de oxigênio e de combustível devem ser rapidamente e simultaneamente aumentadas abrindo as válvulas de controle até o sensor de pressão da câmara de combustão indicar que as condições desejadas existem dentro da câmara;
12. O operador vai precisar julgar se mais ou menos oxigênio é necessário para a razão O/F de operação desejada. Mais oxigênio é necessário se a pluma é um amarelo brilhante ou com fumaça (essa é uma indicação de carbono não queimado na pluma). Se a pluma é transparente ou azulada a vazão de oxigênio deve ser diminuída levemente. A razão de mistura correta é atingida quando os gases de exaustão são transparentes (ou próximo), mas as ondas de choque (diamantes de Mach) na pluma são vistas claramente. Lembre que quando você varia a vazão de combustível e oxidante, você está mudando não só a quantidade de material passando pelo motor, mas também afeta a temperatura dos gases em combustão. Ambos os efeitos vão afetar a pressão da câmara de combustão.
13. O ruído do motor será bem alto, mas é um bom indicador da operação do motor. Pode ser necessário usar protetores auriculares por causa desse alto nível de ruído;
14. O operador deve ter um cronômetro ou ter alguém para medir o tempo de operação do motor. É bem seguro simplesmente deixar o motor ficar sem combustível líquido. O nitrogênio gasoso purga o sistema de suprimento de combustível automaticamente. O motor vai parar a operação abruptamente e então o operador pode fechar a válvula de oxigênio gasoso. Se o motor deve parar antes de acabar o combustível, a válvula de controle de combustível deve ser fechada rapidamente, seguida da abertura da válvula de purga de nitrogênio. Depois que parou a operação do motor (assegurando que a purga de nitrogênio forçou todo o combustível do motor) a válvula de oxigênio gasoso pode ser fechada. A válvula de purga de nitrogênio é fechada, as válvulas dos cilindros são fechadas e a válvula de ventilação do tanque de combustível é aberta. A linha de oxigênio é ventilada abrindo brevemente a válvula de vazão de oxigênio. A água deve ser permitida fluir pela bolsa de resfriamento do motor por alguns minutos depois do fim da operação;
15. Em caso de falha do motor, a sequência de encerramento detalhada em (14), acima, deve ser seguida. Sempre corte o combustível líquido primeiro. Se peças de metal do motor estão queimando, também corte imediatamente a vazão de oxigênio gasoso (metal vai queimar vigorosamente em um ambiente de oxigênio);

16. Um novo ignitor será necessário para cada tentativa de ignição ou queima do motor. A montagem de ignição é parcialmente consumida durante o processo de ignição e os resíduos são rapidamente expelidos da câmara de combustão devido a ignição de combustível líquido;
17. Sempre inspecione o motor e outros componentes por danos, sobre aquecimento aparente ou pontos quentes antes de outro teste;
18. Alguns projetos de motor podem exibir instabilidade de combustão (chuggin, chuffing, combustão errática, etc.) a pressão de câmara baixa ou baixas velocidades de injeção de combustível. Para prevenir esses problemas, o operador deve rapidamente aumentar a pressão da câmara depois de uma inicial introdução de combustível líquido;

Ignição e operação de motores de foguete líquido pequenos da maneira descrita acima, oferece ao amador uma relativa segurança e uma atividade interessante. O operador vai descobrir rapidamente e usar muitos procedimentos para melhorar a operação do motor e da bancada de testes.

Depois de atingir operação inicial do motor e da bancada de testes, o amador pode começar a considerar métodos de medir empuxo do motor, determinar a transferência de calor para a água refrigerante e determinar as características da pluma de exaustão do motor de foguete. Fotografia dessa pluma é definitivamente um desafio. Enquanto esses recursos são adicionados ao aparato experimental, o amador deve sempre manter a segurança e procedimentos de operação segura em mente.

## A LEI

Não existem leis proibindo o projeto ou construção de motores de foguete, foguetes ou acessórios, nos Estados Unidos. Entretanto, certas comunidades têm leis proibindo a operação de motores de foguete ou o voo livre de foguetes. Antes de dar ignição em um motor de foguete, o amador deve ter certeza que não está violando algum decreto. Se algum decreto proíbe o teste no local, um local remoto pode ser necessário.

O amador deve ter em mente que o motor de foguete, mesmo um pequeno, é um dispositivo extremamente barulhento. Se é permitido testar em áreas populadas, o amador deve considerar os efeitos da operação do motor em seus vizinhos antes do teste. O som de um motor de foguete vem do encontro entre o jato de exaustão em alta velocidade e a atmosfera ao redor. Um pouco do ruído pode ser eliminado funcionando o motor dentro de um tubo resfriado com água. Quantidades amplas de água deve ser jogada no duto de exaustão para resfriar rapidamente o fluxo de exaustão do motor e proteger o duto. Entretanto, essa técnica restringe a visualização da pluma de exaustão e elimina uma das características únicas da operação de um motor de foguete.

# BIBLIOGRAFIA

O leitor é estimulado a consultar qualquer um dos livros a seguir para mais informações relacionadas a motores de foguete, materiais ou projeto.

Rocket Propulsion Elements, by George P. Sutton. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1964.

Design of Liquid, Solid, and Hybrid Rockets, by R. L. Peters. Hayden Book Co. Inc., New York, 1965.

Elements of Flight Propulsion, by J. V. Foa. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.

Rocket Propulsion, by M. Barrere and others. Elsevier Publishing Co., Netherlands 1960.

Aerospace Propulsion, by Dennis G. Shepherd, Elsevier Publishing Company, 335 Vanderbilt Avenue, New York, NY, 1972. ISBN 71-190302.

Rocket Encyclopedia Illustrated. Aero Publishers. Inc., Los Angeles 26, California, 1959.

Thermodynamics, by Gordon J. Van Wylen. John Wiley & Sons, Inc., New York 1959.

Fluid Mechanics, by Victor L. Streeter. McGraw Hill Book Company, Inc., New York, 1966.

Heat Transmission, by W. H. McAdams. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, latest edition.

Design of Machine Elements, by M. F. Spotts. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1955.

Mechanics of Materials, by Laurson & Cox. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1955.

Stainless Steel Handbook, published by Allegheny Ludlum Steel Corp., Pittsburgh 22, Pa., 1959.

Alcoa Aluminum Handbooks published by Aluminum Company of America. Pittsburgh. 1959.

Alcoa Handbook of Design Stresses for Aluminum, published by Aluminum Company of America, Pittsburgh.

Matheson Compressed Gas Data Book, published by Matheson, P.O. Box 85 East Rutherford N.J. 1966.

# LISTA DE FORNECEDORES

A lista de fornecedores a seguir não está completa já que existe, literalmente, centenas de empresas nos Estados Unidos, produzindo itens de interesse e uso para o amador. O leitor é estimulado a consultar as páginas amarelas da agenda telefônica mais próximo de sua cidade. Catálogos ilustrados podem ser obtidos escrevendo para as empresas listadas abaixo, peça pela lista de preços atual e o nome do fornecedor mais próximo.

## Reguladores

Grove Valve and Regulator Co.  
6 529 Hollis Street  
Oakland, California 94608

Victor Equipment Co.  
840-854 Folsom Street  
San Francisco, California 94107

The Harris Calorific Co.  
5501 Cass Avenue  
Cleveland, Ohio 44102

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park  
Cresskill, New Jersey 07626

## Válvulas Agulha

Dragon Engineering Co.  
Excelsior Drive & Carmenita  
P. O. 80x 489  
Norwalk, California 90650

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park  
Cresskill, New Jersey 07626

Republic Manufacturing, Co.  
15655 Brookpark Road  
Cleveland Ohio 44142

Robbins Aviation, Inc.  
3817 Santa Fe Avenue  
Vernon, California 90058

Circle Seal Products Co., Inc.  
East Foothill Blvd. & Craig Street  
Pasadena, California 91107

### Válvulas Esfera

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park  
Cresskill, New Jersey 07626

Jamesbury Corporation  
669 Lincoln Street  
Worcester, Massachusetts 01605

Hydromatics, Inc.  
7 Lawrence Street  
Bloomfield, New Jersey 07003

Republic Manufacturing Co.  
15655 Brookpark Road  
Cleveland Ohio 44142

### Válvulas de Retenção

Circle Seal Products Co., Inc.  
East Foothill Blvd. & Craig Street  
Pasadena, California 91107

Republic Manufacturing Co.  
15655 Brookpark Road  
Cleveland, Ohio 44142

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park  
Cresskill, New Jersey 07626

### Filtros

Purolator Products, Inc.  
1000 New Brunswick Avenue  
Rahway, New Jersey 07065

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park  
Cresskill, New Jersey 07626

Microporous Filter Division  
Circle Seal Development Corp.  
P. O. Box 3666  
Anaheim, California 92803

### Válvulas de Alívio

Circle Seal Products Co., Inc.  
East Foothill Blvd & Craig Street  
Pasadena, California 91107

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park

Cresskill, New Jersey 07626

Sensores de Pressão

Helicoid Gage Division  
American Chain & Cable Co.  
Connecticut Avenue & Hewitt Street  
Bridgeport, Connecticut 06602

United States Gauge Division  
American Machine & Metals, Inc.  
Sellersville, Pennsylvania 18960

Marsh Instrument Co.  
3501 Howard Street  
Skokie, Illinois 60076

Heise Bourdon Tube Co., Inc.  
1 Brook Road  
Newtown, Connecticut 06470

O'rings

Parker Seal Co.  
10567 Jefferson Blvd.  
Culver City, California 90230

Minnesota Rubber Co.  
3628 Wooddale Avenue  
Minneapolis, Minnesota 55416

Juntas de Vedação

Gasket Manufacturing Co., Inc.  
319 West 17th Street  
P. O. Box 15438  
Los Angeles, California 90015

Tubeiras

Delaval Manufacturing Co.  
Grand Avenue & 4th Street  
West Des Moines, Iowa 50265

Spraying Systems Co.  
3265 Randolph Street  
Bellwood, Illinois 60104

Conexões de Tubos

Parker Tube Fittings Division  
Parker-Hannifin Corp.  
17327 Euclid Avenue  
Cleveland, Ohio 44112

Imperial-Eastman Corp.  
6300 West Howard Street  
Chicago, Illinois 60648

Featherhead Co.  
320 East 131st Street  
Cleveland, Ohio 44108

Conexões de Cilindros

Western Enterprises, Inc.  
27360 West Oviatt Road  
P. O. Box 9737  
Bay Village, Ohio 44140

Hoke Incorporated  
10 Tenakill Park  
Cresskill, New Jersey 07626

# FATORES DE CONVERSÃO

<u>Multiplique</u>	<u>Por</u>	<u>Para Obter</u>
Btu/min	0,02356	Cavalos força
Btu/min	17,57	Watts
Pés cúbicos	1728	Polegadas cúbicas
Pés cúbicos	7,48052	Galões
Pés	12	Polegadas
Galões	0,1337	Pés cúbicos
Galões	231	Polegadas cúbicas
Galões de água	8,3453	Libras de água
Milhas	5280	Pés
Milhas/hora	1,467	Pés/s
Minuto	60	Segundos
Libras	16	Onças
Libras de água	0,1198	Galões
Pés quadrados	144	Polegadas quadradas
Temp (°C + 17,78)	1,8	Temp (°F)
Temp (°F + 460)	1	Temp (°R)
Temp (°F - 32)	5/9	Temp (°C)