



Um foguete de garrafas PET

.....
James Alves de Souza

Departamento de Física, Universidade
 Federal de São Carlos, São Carlos, SP,
 Brasil

E-mail: jamesfisica@gmail.com

Neste trabalho descreve-se a construção de um foguete utilizando garrafas descartáveis de refrigerante (PET) de 2 l e a montagem de um sistema de propulsão que funciona com água e ar comprimido. Mostra-se também vários fatores que influenciam na estabilidade do foguete durante o voo, como a obtenção e relação entre centro de massa e centro de pressão. Apresenta-se ainda a teoria envolvida durante o lançamento por meio de algumas aproximações, mostrando a aplicabilidade de assuntos comuns no ensino médio como segunda e terceira leis de Newton, conceitos de momento linear e velocidade relativa, movimento de um fluido perfeito utilizando a equação de Bernoulli e a equação de continuidade e expansão adiabática de um gás ideal. Por fim, obtém-se a velocidade máxima que o foguete pode atingir aplicando-se uma pressão de 80 psi, sendo possível estimar a aceleração do mesmo durante o processo de ejeção de água, algo próximo a 25 g, um resultado surpreendente pela simplicidade da montagem.

Mostramos também que a medida de pressão é o psi - *pound-force per square inch*, significa libra por polegada quadrada -, porque esta é a unidade dos manômetros das bombas de encher pneus. A unidade pascal (Pa) é a utilizada no sistema internacional de unidades (SI).

Material utilizado

Os materiais citados abaixo não são os únicos que podem ser utilizados para a construção do foguete; a imaginação do construtor pode dar lugar a substituições. São necessários:

- 2 garrafas descartáveis de refrigerante (PET) de dois litros. Utilize somente PET, pois este material pode suportar altíssimas pressões internas
- placa pluma ou isopor de alta densidade (facilmente encontrada em supermercados na forma de bande-

jas para embalagem de alimentos)

- fita adesiva transparente
- 1 rolha de cortiça grande
- 1 válvula de pneu de bicicleta
- 1 tubo de caneta vazio
- 1 mangueira com até 6 mm de diâmetro
- 1 bomba de encher pneu de bicicleta

Procedimento

Foguete

As duas garrafas PET são os principais componentes do foguete, pois serão utilizadas para a construção da sua fuselagem, que é composta pela câmara de combustão (que chamaremos de câmara de compressão) e pelo nariz, região frontal do foguete.

Para a câmara de compressão utilizaremos uma garrafa inteira sem alterações. Esta é a parte do foguete em que estará contido o seu combustível (a água). Para o nariz, utilizaremos apenas a parte de cima da garrafa, cônica, como mostra a Fig. 1a. Essa peça tem a função de minimizar o atrito do ar durante o voo do foguete, fornecendo ao mesmo um formato mais aerodinâmico. Em seguida, fixe a parte cônica no fundo da outra garrafa inteira com a fita adesiva, conforme mostra a Fig. 1b. É importante que se tenha um bom alinhamento entre estas partes (Fig. 1c), para que não haja maiores complicações durante o voo.

O próximo passo é a construção das aletas do foguete; elas são fundamentais para sua estabilidade durante o voo. Pegue as bandejas de isopor de alta densidade e recorte-as no formato de trapézios, de modo que eles se encaixem na parte cônica da garrafa inteira (Fig. 2). O formato das aletas é arbitrário, mas sugerimos trapézios por conter somente retas e ser mais fácil de manipular durante o corte.

Utilizando a fita adesiva, fixe as quatro aletas na parte cônica da garrafa inte-

Propõe-se a construção de um pequeno foguete movido pela pressão d'água, de baixo custo, para ilustrar de forma lúdica o uso das leis de Newton e da equação de Bernoulli.

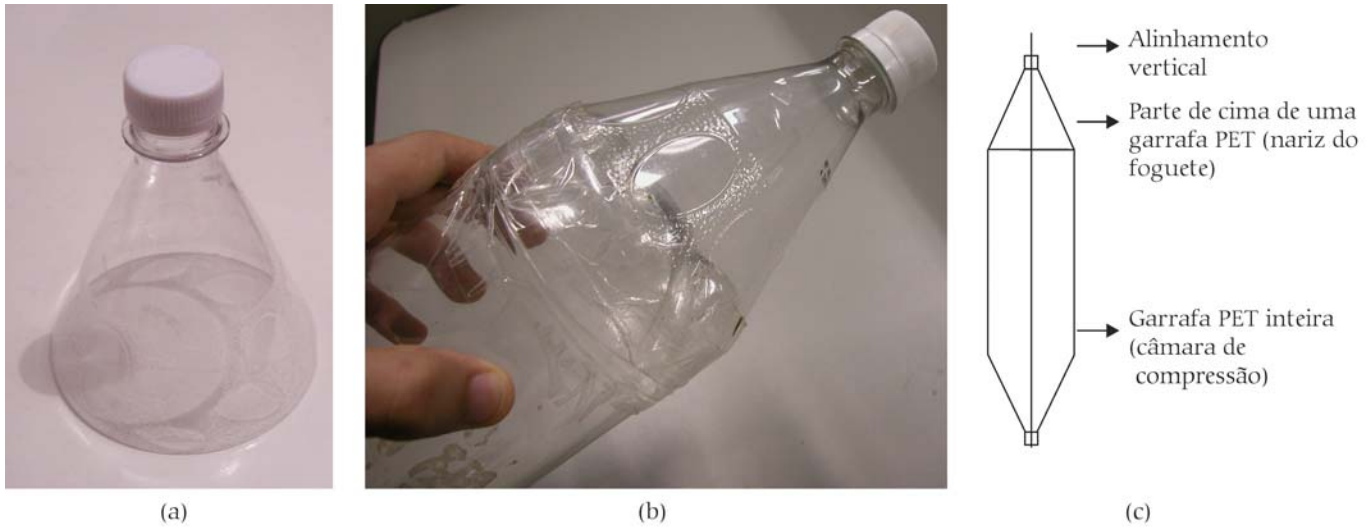


Figura 1. (a) Nariz do foguete obtido cortando-se a parte de cima de uma garrafa PET; (b) nariz fixado ao fundo da outra garrafa e (c) máximo alinhamento possível entre as partes.

ra, na região inferior do foguete, de modo que fiquem bem alinhadas duas a duas como se fossem imagens especulares (Fig. 3a).

Se os passos descritos até o momento forem bem sucedidos, o foguete estará pronto, como mostra a Fig. 3b. Nada impede a utilização de garrafas PET de outros formatos, mas optamos por garrafas de paredes retas por um motivo que descreveremos na seção sobre a estabilidade do foguete.

Sistema de propulsão

O sistema de propulsão consta da base de lançamento e o aparato de pressurização que será conectado à câmara de compressão do foguete.

Pegue a rolha de cortiça e faça um furo com diâmetro um pouco menor que o diâmetro externo da mangueira, para que a mesma passe pelo furo e fique bem justa (Fig. 4a). Deixe a mangueira com uma ponta sobrando e encaixe o tubo de caneta nesta ponta (Fig. 4b). Apesar de não ser essencial, esse tubo tem a função de evitar alguns incômodos, como não deixar entrar água na bomba ou evitar



Figura 3. (a) As aletas devem ser fixadas simetricamente duas a duas. (b) Foguete pronto sobre a base de lançamento.

que a mangueira escape da rolha, pois seu encaixe provoca um estrangulamento na ponta da mangueira. Esse conjunto será encaixado no bocal da garrafa e é importante que fique firme, pois será a parte do sistema de propulsão que suportará o aumento da pressão interna do foguete. Se não for possível conseguir

uma rolha grande que satisfaça essa condição, pode-se optar por uma rolha menor e revesti-la com uma capa de pé de cadeira, como fizemos neste trabalho (Fig. 4a).

Agora encaixe a válvula de pneu de bicicleta na outra extremidade da mangueira, de maneira que a mesma fique bem encaixada na bomba de encher pneus. Se a bomba não contiver o encaixe mostrado na Fig. 4c, será preciso retirar o pino da válvula de pneu, pois este impossibilitará o bombeamento de ar para câmara. Nesse caso o tubo de caneta é indispensável.

A construção da base de lançamentos fica por conta da criatividade do leitor, mas pode-se optar por fazer uma base simples com outra garrafa PET, como mostra a Fig. 5a. Pegue a parte inferior de uma garrafa e faça cortes em suas laterais na direção das aletas do foguete, para que o mes-

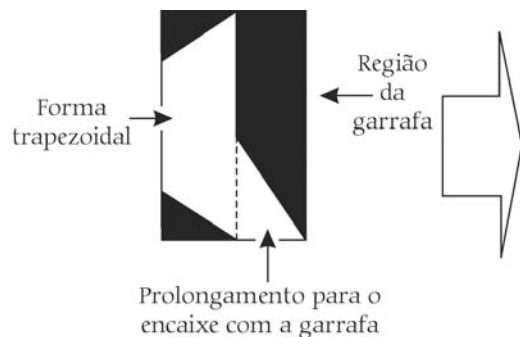


Figura 2. Formato das aletas do foguete.



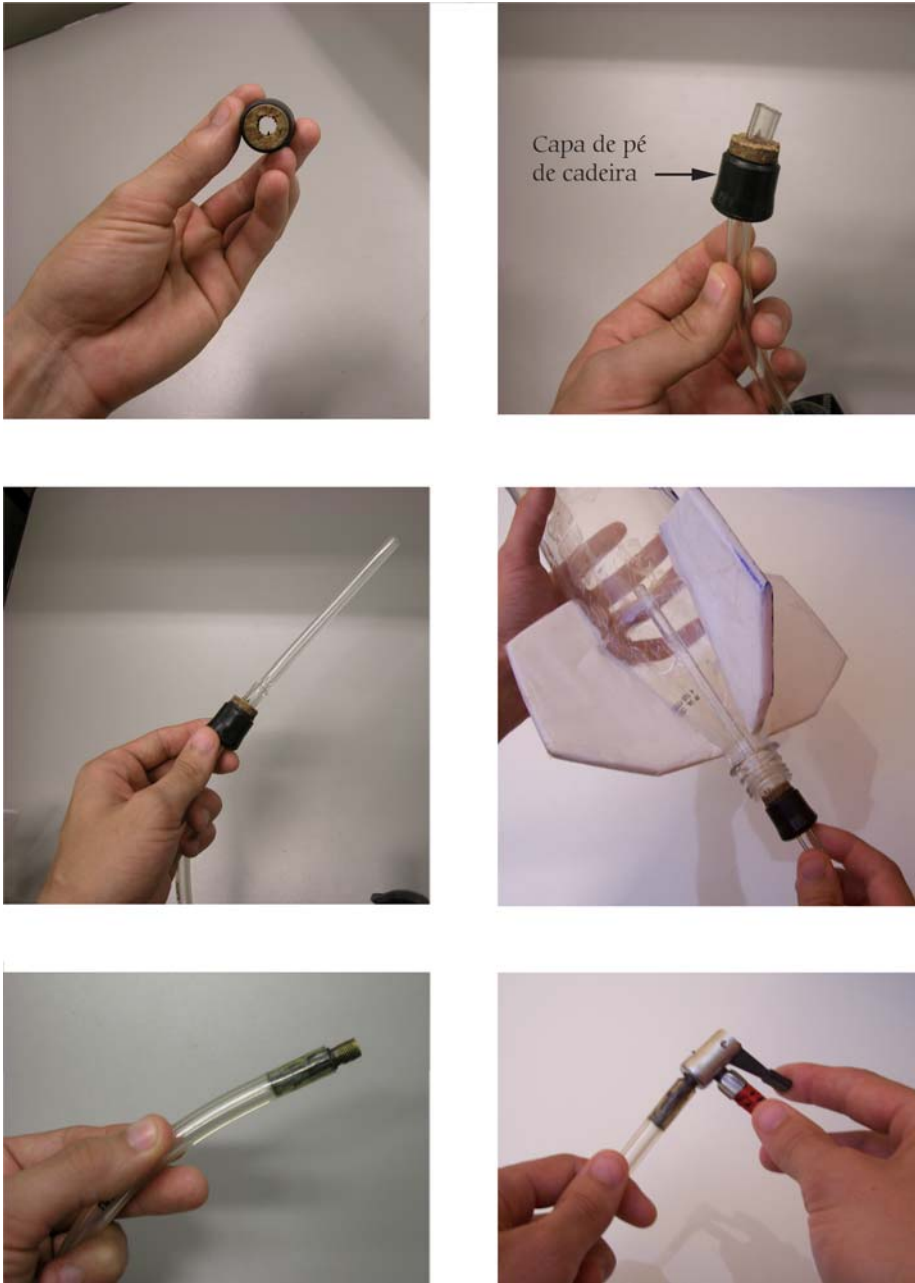


Figura 4. Sistema de propulsão do foguete. (a) Encaixe da mangueira na rolha. (b) Encaixe do tubo de caneta na ponta saliente da mangueira; esse sistema será colocado no bocal da garrafa inteira. (c) Encaixe da válvula de pneu de bicicleta na outra extremidade da mangueira, para uma boa fixação da bomba.

mo fique apoiado na vertical. Em seguida faça um furo na lateral inferior da garrafa para inserção da mangueira conectada à rolha e a base estará concluída. Outra opção é fazer uma base mais sofisticada com tubos e conexões de PVC na forma de tripé (Fig. 5b). Foram utilizados três cotovelos de 45° e duas junções em T, sendo que a da parte central, onde o foguete se apóia, foi perfurada para a passagem da mangueira com a rolha. Os canos são de 3/4"; essa medida proporciona o encaixe perfeito do bocal da garrafa na junção em T. É interessante não colar as

junções assinaladas na figura para que se tenha liberdade de ajuste da base em locais irregulares, fazendo com que o foguete fique na vertical e também permitindo diferentes inclinações para lançamentos oblíquos. Na verdade, todas as partes dessa base podem ser somente encaixadas, mas para garantir firmeza é bom colar as outras conexões. Utilize cola adesiva própria para PVC. A Fig. 5b é um aumento da Fig. 3b.

Estabilidade do foguete

Dois cuidados muito importantes para a estabilidade do foguete durante o



Figura 5. Opções para a construção da base de lançamentos. Em (a), base construída com uma garrafa PET. Em (b), base construída com tubos e conexões de PVC.

vôo já foram tomados: utilizar uma garrafa cilíndrica, pelo fato de possuir simetria radial, e colar as aletas de maneira simétrica. Estes fatores nos proporcionam uma distribuição de massa razoavelmente homogênea em relação ao plano que passa pelo centro do foguete na vertical.

Diferentemente dos aviões que possuem asas e superfícies móveis de controle produzindo sustentação e permitindo a realização de vôos na horizontal, os foguetes são veículos projetados para se deslocar na direção vertical, ou o mais próximo possível desta, vencendo a força da gravidade. Então devemos nos atentar a dois pontos de equilíbrio de forças que são o centro de massa (CM) e o centro de pressão (CP), para que o foguete siga uma trajetória retilínea e reproduza de maneira satisfatória o vôo de um foguete real a combustão.

O CM é o ponto de equilíbrio das forças gravitacionais que agem sobre o foguete e está relacionado com a massa de cada parte que o compõe. Sua posição é bem definida e pode ser obtida pela seguinte expressão [1]

$$y_{CM} = \frac{\sum_i y_i m_i}{\sum_i m_i}, \quad (1)$$

onde y_i é a ordenada (ou altura) do CM da parte i (aleta, nariz, ...) do foguete e m_i sua massa correspondente. A soma das partes, $\sum m_i$, é a massa total do foguete.

Note que explicitamos somente a altura do CM, pois sabemos que o mesmo estará localizado no eixo central do foguete, devido à sua simetria radial. Como o CM é o ponto onde as forças gravitacionais se equilibram, podemos encontrá-lo de maneira mais simplificada sem a necessidade de utilizar a Eq. (1). Basta equilibrar o foguete (na horizontal) sobre uma régua e no momento em que o equilíbrio for estabelecido o CM estará no eixo central do foguete, acima do ponto de contato com a régua (Fig. 6).

Como a propulsão do foguete se dá em sua parte traseira, qualquer perturbação que possa ocorrer, seja por rajadas de vento ou má distribuição de massa, fará com que o foguete gire em torno de seu CM, como se esse ponto fosse um pivô. Uma maneira de perceber facilmente tal fato é tentar empurrar um objeto com o dedo indicador pela sua parte traseira. Observe que qualquer imperfeição da superfície em que o objeto estiver, ou se o ponto de contato entre seu dedo e o mesmo for diferente da reta que contém o CM, fará com que o objeto desvie de sua trajetória inicial em um movimento de rotação em torno de seu CM.

Já que tomamos cuidado com a distribuição de massa do foguete durante a sua montagem, o próximo problema serão os torques provocados pelas forças aerodinâmicas que agem sobre suas partes durante o vôo. Isso faz com que o foguete

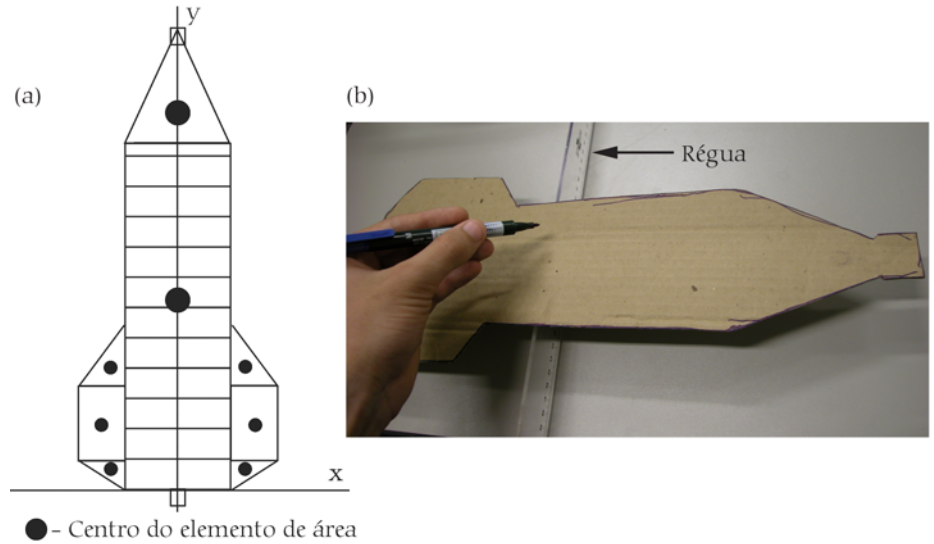


Figura 7. (a) Projete a silhueta do foguete em um papel e divida suas partes em regiões retangulares e triangulares para facilitar a obtenção do CP. (b) Projete a silhueta do foguete em um pedaço de papelão e encontre seu CM; isto fornecerá uma idéia da posição do CP do foguete, que neste caso coincide com o CM do papelão.

gire em uma dada direção, dependendo se a intensidade da pressão exercida pelo ar for maior ou menor na região acima ou abaixo do CM.

Sendo impossível eliminar todos os tipos de perturbações, precisamos fazer com que o foguete corrija sua trajetória retornando à posição vertical da melhor forma possível. Para resolver esse problema recorreremos ao centro de pressão do foguete. O CP é o ponto de equilíbrio das forças aerodinâmicas exercidas sobre as partes do foguete, e é importante por equilibrar os torques gerados por essas forças. Note a semelhança da definição do CM e CP; o que muda é a natureza das forças. O CP está relacionado às formas, textura e área das partes do foguete.

Para encontrar o CP podemos fazer

uma primeira aproximação projetando a silhueta (sombra) do foguete em um papel e dividindo suas partes em áreas retangulares e triangulares, já que as forças aerodinâmicas que definem tal ponto são proporcionadas pela pressão que o ar exerce sobre as áreas de suas diferentes partes. Esta é a vantagem de utilizarmos garrafas de paredes retas, pois áreas de triângulos e retângulos são facilmente obtidas. Uma maneira conveniente de situarmos o sistema de coordenadas sobre a projeção do foguete é mostrada na Fig. 7a. A coordenada y do CP é dada de maneira semelhante à do CM, ou seja [2]

$$y_{CP} = \frac{\sum_i y_i A_i}{\sum_i A_i}, \quad (2)$$

onde y_i é a coordenada do centro do elemento de área retangular ou triangular i , A_i sua área correspondente e $\sum A_i$ a soma das áreas dos elementos formados pela projeção do foguete no papel. Novamente utilizamos o argumento de simetria para justificar a ausência do cálculo da coordenada x do CP.

Assim como utilizamos um artifício para a obtenção do CM sem o uso da Eq. (1), podemos também fazer uma nova aproximação para obtermos o CP sem precisar utilizar a Eq. (2). Podemos projetar a silhueta do foguete em um pedaço de papelão e encontrar seu CM (veja a Fig. 7b), pois nesse caso o centro do elemento de área que corresponde ao CP do plano coincide com seu CM. Note que essas aproximações seriam mais satisfa-

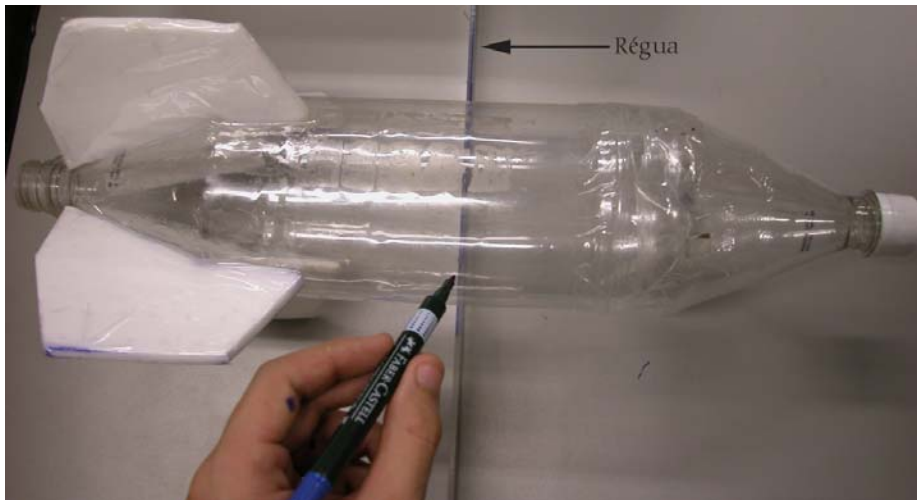


Figura 6. Obtenção simplificada do CM do foguete.

tórias se os materiais que constituem o foguete tivessem a mesma densidade, o que não é o caso, mas podemos utilizá-las para nos fornecer uma boa idéia da posição desse ponto de equilíbrio sem muito trabalho.

Para que haja boa estabilidade do foguete é preciso que o CM esteja a 1,5 cm [2], ou mais, acima do CP. Se durante a montagem não foi possível obter esta configuração, não é necessário refazer o foguete. Pode-se utilizar o nariz do mesmo como compartimento de carga, acrescentando pequenos pesos em seu interior e fazendo com que seu CM seja deslocado para cima. É importante que os pesos fiquem uniformemente distribuídos. Outra maneira é trocar as aletas do foguete por aletas mais largas ou alongadas, fazendo com que o CP se desloque para trás. Deve-se tomar cuidado nesse procedimento, pois se o material das aletas for pesado deslocaremos também o CM do foguete para trás, podendo acarretar uma não alteração da distância entre os pontos de equilíbrio (CM e CP). Não é interessante que a distância entre o CM e CP seja muito grande, $\gg 1,5$ cm, pois o foguete pode ficar oscilando sua parte traseira no ar, como se estivesse “rebolando” devido às rápidas correções que ele realiza tentando voltar para a posição vertical. Mas a que se devem estas correções durante o voo?

A força de impulsão do foguete é dada na direção vertical ascendente na linha que contém o seu CM, enquanto as forças aerodinâmicas (atrito do ar) agem no sentido contrário, para baixo, na posição de seu CP. Como já adiantamos anteriormente, qualquer perturbação pode fazer com que o foguete gire em torno de seu

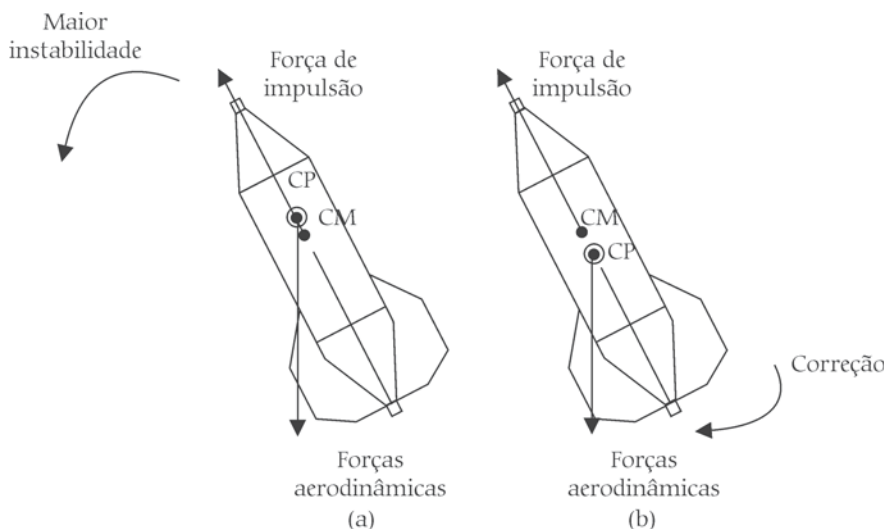


Figura 8. (a) Posição incorreta do CM em relação ao CP causando maior instabilidade no foguete durante o voo. (b) Posição correta entre CM e CP, causando a correção durante o voo.

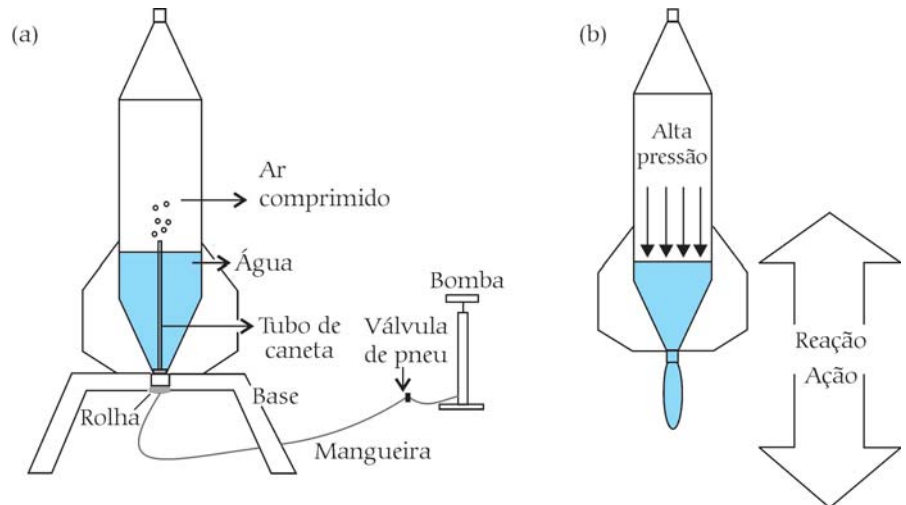


Figura 9. (a) Ilustração da montagem final do foguete para o lançamento. (b) Terceira lei de Newton durante a ascensão do foguete.

CM. Caso seu CP esteja posicionado acima do CM, as forças aerodinâmicas contribuirão para a rotação do foguete, desestabilizando completamente seu voo (Fig. 8a). Mas, pelo contrário, se o CP estiver abaixo do CM, as forças aerodinâmicas atuarão no foguete “puxando” sua parte traseira novamente para a vertical e fazendo a correção desejada, mantendo sua trajetória inicial (Fig. 8b).

Lançamento

O voo de um foguete real se dá pela queima de combustível. A explosão faz com que haja ejeção dos gases provenientes da combustão em sentido contrário ao do movimento do foguete, impulsionando-o para frente. Na nossa montagem, a água substitui os gases quentes e sua ejeção se dá pela compressão do ar em vez

de explosão. Para o lançamento do foguete siga os seguintes passos:

1° - Pegue o foguete e preencha-o com um pouco de água. Procure otimizar a quantidade para maior ascensão do foguete, pois acrescentando-se muita água ele ficará pesado, dificultando sua subida; com pouca água não haverá propulsão suficiente para subidas longas.

2° - Em seguida encaixe a rolha com o tubo de caneta no bocal da garrafa, vedando-a para que a água não derrame. A rolha deve ficar bem apertada, pois esse será um dos fatores mais importantes para maior ascensão do foguete.

3° - Feito isso é só bombear o ar para dentro da câmara de compressão até que o foguete seja lançado.

Um esquema final da montagem está ilustrado na Fig. 9a.

Mas qual a física envolvida no lançamento?

O que temos é uma aplicação direta da conhecida lei da ação e reação ou terceira lei de Newton. Ao bombearmos o ar para dentro da câmara de compressão, o mesmo vai se comprimindo e exercendo uma força (pressão) cada vez maior sobre a superfície da água ali contida. No momento em que essa força se torna maior que a força de atrito que mantém a rolha presa à garrafa, a rolha e a água saem com uma velocidade muito grande, ação, fornecendo ao foguete um impulso vertical em sentido contrário e possibilitando o seu voo, reação, ou seja, a água dá um “empurrão” no foguete (Fig. 9b). Em física dizemos que há uma transferência de momento linear da água para o foguete.

Você poderia perguntar: por que não lançar somente uma garrafa PET para reproduzir o voo de um foguete? A resposta é simples; uma garrafa sem as aletas

e o nariz seria lançada como um projétil seguindo uma trajetória parabólica e girando em torno de seu CM. Pode-se mostrar este fato para enfatizar a importância dos aparatos acrescentados para que se tenha estabilidade e reprodução do vôo de um foguete real.

A seguir, exploraremos um pouco mais a física para obtermos uma aproximação da aceleração que o foguete pode atingir durante a ejeção de água e sua velocidade ao final desse processo pelo cálculo da velocidade de escape da água.

Movimento do foguete durante a ejeção de água

Para os cálculos a seguir será preciso acrescentar um dispositivo à montagem, que é um manômetro (medidor de pressão) acoplado à bomba, pois precisaremos da magnitude desta grandeza para obtenção da velocidade de escape da água.

O movimento do foguete durante o lançamento pode ser entendido pela aplicação da segunda lei de Newton [3]

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (3)$$

Para sua descrição, consideremos que a única força atuante sobre o foguete é a força gravitacional (desprezemos o atrito do ar). Imaginemos que o foguete está em movimento inicial uniforme, com velocidade constante v . Na realidade a velocidade é zero, pois o foguete está parado sobre a base de lançamentos, mas utilizaremos este artifício para manipulações matemáticas mais simples. O momento linear inicial do foguete será então $p_i = Mv$, onde M é sua massa inicial que é dada por $M = m_f + m_{H_2O}$, ou seja, a massa do foguete vazio (m_f) mais a massa de água contida em seu interior (m_{H_2O}), como mostra a Fig. 10a. No momento em que ocorre a ejeção de uma pequena quantidade de água Δm_{H_2O} a uma velocidade v_f , a velocidade do foguete é alterada de Δv (Fig. 10b). Logo, o sistema terá um momento final dado por [3]

$$p_f = (M - \Delta m_{H_2O}) \cdot (v + \Delta v) - \Delta m_{H_2O} v_f. \quad (4)$$

Se $\Sigma F = -Mg$, substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) obtemos [3]

$$-Mg = \frac{(M - \Delta m_{H_2O})(v + \Delta v) - \Delta m_{H_2O} v_f - Mv}{\Delta t}. \quad (5)$$

Manipulando esta equação e desprezando o termo $\Delta m_{H_2O} \Delta v$ já que Δm_{H_2O} é muito pequeno, obtemos para a velocidade do foguete Δv [3]

$$\Delta v = -g\Delta t + \frac{\Delta m_{H_2O}}{M} u, \quad (6)$$

onde u é a velocidade de escape da água relativa ao foguete, $u = v + v_f$. Utilizando as quantidades $\Delta m_{H_2O} = \rho \Delta V$ e $M = \rho V_{H_2O} + m_f$, onde ρ é a densidade da água, ΔV a mudança no volume de ar dentro do foguete, V_{H_2O} o volume de água dentro do foguete e m_f a massa do foguete vazio, temos [3]

$$\Delta v = -g\Delta t + \left(\frac{\rho \Delta V}{\rho V_{H_2O} + m_f} \right) u. \quad (7)$$

Podemos obter a velocidade do foguete durante o tempo Δt de ejeção da água conhecendo-se a velocidade de escape da água u em relação ao foguete. Uma maneira de determinar Δt é lançar o foguete em frente a um anteparo como um muro ou pilastra, de modo que possamos estabelecer uma escala e utilizar uma câmera digital qualquer para filmar o momento do lançamento. Em seguida é só separar o filme em quadros (*frames*), utilizando algum programa de edição de vídeo (utilizamos o VirtualDub 1.3c, que pode ser encontrado gratuitamente na internet), desde o momento em que o foguete deixa a base até o momento em que ocorre toda ejeção de água. O intervalo de tempo de um quadro para outro é mostrado no programa e é da ordem de milésimos de segundo.

Para obtermos u , vamos considerar a água como um fluido perfeito e incompressível e seu escoamento pelo tubo (foguete) estacionário. Utilizando a equação

de Bernoulli, temos [4]

$$\frac{1}{2} \rho v_L^2 + P = \frac{1}{2} \rho u^2 + P_{atm}, \quad (8)$$

onde as quantidades apontadas no primeiro membro da Eq. (8) estão relacionadas à quantidade de água no interior do foguete, ou seja, sua densidade ρ e sua velocidade v_L , a pressão P em sua superfície. No segundo membro estão as quantidades relacionadas à porção de água que é ejetada do foguete, que são sua velocidade relativa u , a qual queremos encontrar, e a pressão atmosférica P_{atm} no bocal da garrafa. Note que estamos desprezando a parte da energia potencial gravitacional da equação de Bernoulli, pois sua magnitude é desprezível comparada com as outras grandezas envolvidas.

Ambas as velocidades u e v_L estão relacionadas com a taxa com que a água é ejetada, ou, equivalentemente, à taxa com que o volume de ar V dentro da câmara aumenta. Esta relação é dada pela equação de continuidade [3, 5]

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{4} u \pi D_B^2 = \frac{1}{4} v_L \pi D_F^2, \quad (9)$$

sendo D_B e D_F os diâmetros do bocal e do corpo da garrafa, respectivamente. A Fig. 10c ilustra as grandezas apresentadas nas Eqs. (8) e (9).

A Eq. (9) mostra que a vazão na área dada pela parte interna da câmara de compressão, corpo do foguete, deve ser a mesma na área dada pelo bocal, pois estamos

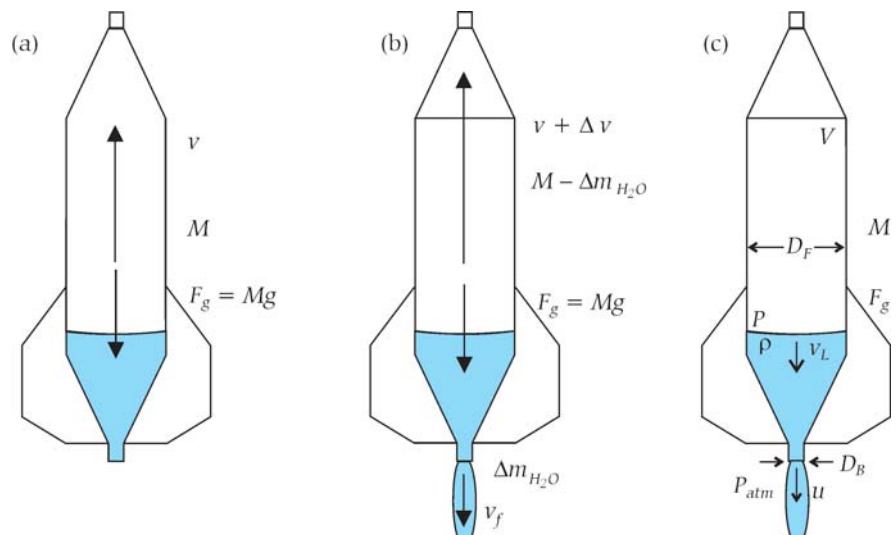


Figura 10. (a) Configuração do foguete no momento em que não é ejetada nenhuma quantidade de água; sua massa é M e sua velocidade é v . A única força atuante é a força gravitacional, F_g . (b) Configuração do foguete após a ejeção de uma pequena quantidade de água com massa Δm_{H_2O} e velocidade v_f . A massa do foguete muda para $M - \Delta m_{H_2O}$ e sua velocidade para $v + \Delta v$. (c) Mostra-se o volume V de ar dentro do foguete; P , a pressão sobre a superfície da água; D_F , o diâmetro do foguete; D_B , o diâmetro do bocal; ρ , a densidade da água; v_L , a velocidade da água dentro do foguete; u , a velocidade de escape da água em relação ao foguete e P_{atm} , a pressão atmosférica.

tratando a água como um fluido incompressível. Isso justifica o fato da velocidade da água no bocal da garrafa (menor área) ser bem maior que em seu interior (maior área). Este fato é interessante, pois é observado no dia a dia quando em um encanamento de uma residência a água flui de um cano de maior diâmetro para um de menor diâmetro. É comum ouvirmos que a água sai com maior pressão. O que ocorre realmente é que a água sai com maior velocidade, o que implica em uma menor pressão nas paredes do cano ou torneira em que a água sai. Este é o famoso fenômeno de Venturi. Essa confusão é comum pelo fato das pessoas associarem a maior transferência de momento da água que sai com maior velocidade sobre nossa mão. Quando colocado desta forma, podemos dizer que ocorre maior pressão, mas na superfície em que a água está colidindo, e não nas paredes do cano ou torneira por onde a água sai. Portanto, se alguém perguntar qual procedimento deveríamos tomar para aumentar a pressão da água na torneira de sua casa, não cometa o erro de dizer que é só diminuir o diâmetro do cano de saída. O que se deve fazer é aumentar a altura da caixa d'água, o que equivale a aumentar a coluna de água sobre o ponto de saída (torneira) e consequentemente a força aplicada sobre este ponto, mas esta já é outra história; vamos retornar ao foguete.

Da Eq. (9) observa-se que v_L é proporcional à razão D_B/D_F , que por sua vez é muito menor que 1, tornando-se menor ainda quando elevada à quarta potência na Eq. (8). Logo, podemos desprezar o primeiro termo da Eq. (8), o que nos permite obter a expressão para a velocidade de escape da água, que é dada por [3]

$$u = \sqrt{\frac{2(P - P_{atm})}{\rho}} \quad (10)$$

Quando a garrafa retorna ao solo observa-se que há vapor de água dentro da mesma, e isso implica que houve resfriamento do ar dentro da garrafa no momento de sua expansão. Como Δt é muito pequeno, significa que este processo de expansão pode ter ocorrido sem trocas de calor entre o sistema, câmara de compressão e a vizinhança. Portanto podemos supor que houve uma expansão adiabática. Admitindo que o ar seja um gás ideal, temos [3]

$$P = P_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (11)$$

onde P_0 é a pressão absoluta inicial dentro do foguete, V_0 o volume inicial de ar dentro do mesmo e V seu volume final, que é

o volume da garrafa. Como o ar pode ser considerado um gás diatômico, temos que $\gamma = 1,4$ [4]. Substituindo a Eq. (11) na Eq. (10), obtemos finalmente, para a velocidade de escape da água,

$$u = u_c \sqrt{\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}} \quad (12)$$

onde u_c é a velocidade característica dada por

$$u_c = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \quad (13)$$

Calculando u pela Eq. (12) e substituindo na Eq. (6), pode-se obter a velocidade do foguete no momento em que ocorre toda ejeção de água (Eq. (14)) e estimar sua aceleração durante o processo que, dependendo da pressão imposta, pode ser da ordem de dezenas de vezes a aceleração da gravidade; um resultado realmente incrível utilizando apenas garrafas PET, água e ar comprimido.

$$\Delta v = -g\Delta t + u_c \left[\left(\frac{\rho\Delta V}{\rho V_{H_2O} + m_f} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma - \frac{P_{atm}}{P_0}} \right] \quad (14)$$

Nesta simples descrição, a pressão máxima que conseguimos colocar na câmara do foguete foi de aproximadamente $(5,5 \times 10^5)$ Pa ou 80 psi.

Para essa pressão e uma quantidade de água de 600 ml, o tempo de ejeção total foi de 80 ms, como pode ser observado na seqüência de quadros apresentados na Fig. 11. Note que a nitidez do foguete torna-se pequena pelo fato de não trabalharmos com uma câmera profissional e sua velocidade ser muito alta, mas é possível termos uma idéia de sua evolução. Realizamos o experimento em frente a uma torre cujas partições são de precisamente

2 m. A velocidade u calculada pela Eq. (12) foi obtida a partir dos dados a seguir:

- ρ = densidade da água (1000 kg/m^3)
- V_0 = volume inicial de ar dentro do foguete; como utilizamos 600 ml de água temos que $V_0 = 1,4 \text{ l}$. Conversão de unidades: $1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
- V = volume total da câmara de compressão do foguete ($\approx 2 \text{ l}$)
- V_{H_2O} = volume de água ($\approx 600 \text{ ml}$)
- D_B = diâmetro do bocal da garrafa ($\approx 1,5 \text{ cm}$)
- D_F = diâmetro da câmara de compressão do foguete ($\approx 11,0 \text{ cm}$)
- m_f = massa do foguete vazio ($\approx 0,081 \text{ kg}$)
- P_{atm} = pressão atmosférica ($\approx 1,05 \times 10^5$) Pa ou 14,7 psi
- P_0 = pressão absoluta inicial dentro do foguete ($5,5 \times 10^5$) Pa ou 80 psi
- g = aceleração da gravidade, $9,81 \text{ m/s}^2$
- $\Delta t = 80 \text{ ms}$ ou $0,08 \text{ s}$.

O resultado obtido foi $u \approx 33 \text{ m/s}$ o que nos fornece uma velocidade para o foguete de $\Delta v \approx 20 \text{ m/s}$, que é a velocidade máxima que o foguete atinge durante todo processo de vôo. A partir do momento em que a água é totalmente ejetada, o foguete fica sujeito às forças da gravidade e atrito do ar. Daí podemos estimar sua aceleração, que é $a \approx 25 \text{ g}$, um resultado realmente fascinante. Nessa configuração o foguete atingiu uma altura aproximada de 30 m, resultado estimado pela filmagem. Portanto deve-se tomar cuidado e realizar lançamentos em locais abertos como campos de futebol ou praças, onde não existam pessoas ou carros que possam ser atingidos pelo foguete na descida, uma vez que a velocidade com que o foguete chega ao solo também é muito grande. É interessante manter a tampa da garrafa no nariz do foguete, pois ela o protege no momento em que o mesmo choca-se com o solo.

O modelo para obtenção da velocidade

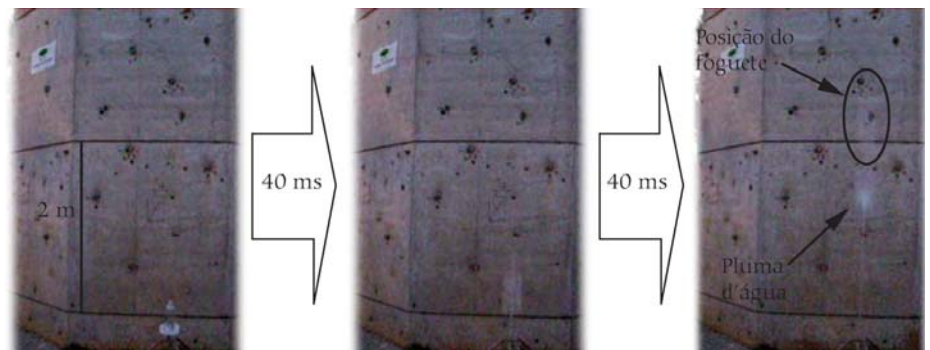


Figura 11. Tempo em que a água é totalmente ejetada do foguete $\Delta t = 80 \text{ ms}$, correspondendo a uma altura de aproximadamente 1,80 m que é o espaço em que o foguete é acelerado. Note a formação de uma pluma d'água ao final da ejeção e a difícil definição do formato do foguete (elipse), devido à sua altíssima velocidade, $\Delta v \approx 20 \text{ m/s}$ nessa posição, obtida pela Eq. (14).

do foguete não é tão ruim, pois na análise dos quadros mostrados na Fig. 11 o foguete percorreu uma distância de 1,8 m em 0,08 s o que dá uma velocidade média de $v_M = 22,5$ m/s (desprezando o atrito, a gravidade e até mesmo as dimensões do foguete, ou seja, é a velocidade média de um ponto material).

Pode-se otimizar os resultados obtidos fazendo um sistema de gatilho para possibilitar o aumento de pressão dentro da câmara do foguete e dispará-lo manualmente, à distância, é claro, ou pesquisar materiais que proporcionem um foguete mais leve fazendo com que

o mesmo voe a alturas bem maiores. Não foi verificado o limite de pressão que as garrafas PET podem suportar, mas é aconselhável não ultrapassar 130 psi, pois, apesar do material que constitui as garrafas ser de grande resistência, é aconselhável respeitar certos limites para evitar

O foguete de garrafa PET aborda uma grande quantidade de fenômenos físicos, e assim destacamos que o professor nunca deve desprezar a simplicidade e a importância de um experimento

eventuais acidentes. Vemos então que a física quando entendida e bem manipulada pode ser muito poderosa e divertida.

Conclusão

Note a quantidade de fenômenos físicos que foi possível abordar em uma simples brincadeira de baixíssimo custo levada a cabo em um final de semana, com resultados incrivelmente chocantes. É importante que nas aulas de física sejam trabalhadas ordens de grandezas de quantidades que pretende-se determinar para que os alunos tenham uma noção mais palpável da ciência.

Para isso não é necessário que se tenha precisão exata, basta ter-se uma idéia do que está acontecendo, e a experimentação é uma ferramenta essencial para estes fins. O professor de física nunca deve desprezar a simplicidade e a importância de um experimento, pois este pode despertar o

interesse de alunos que provavelmente farão história na ciência. Quem sabe, com esta brincadeira do foguete possam surgir futuros colaboradores para o programa espacial brasileiro.

Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física - Mecânica* (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro), v. 1, 4ª ed.
- [2] S.A. Widmark, *The Physics Teacher* **36**, 148 (1998).
- [3] D. Kagan, L. Buchholtz and L. Klein, *The Physics Teacher* **33**, 159 (1995).
- [4] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica - Fluidos, Oscilações, Ondas e Calor* (Editora Edgard Blücher LTDA, 2002), v. 2, 4ª ed.
- [5] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro), v. 2, 4ª ed.

Química Nova na Escola



Desde 1995 a revista Química Nova na Escola traz artigos abordando diversas áreas da química, dentre as quais ensino, experimentos de baixo custo, atualidades e história da química.

Os fascículos de 2007 trouxeram artigos sobre embalagem longa vida, chuva ácida, investigação dos componentes presentes no leite, maresia, formação de professores, identificação de íons ferro em medicamentos comerciais e muito mais.

Além dos fascículos periódicos, QNesc publica seus Cadernos Temáticos, fascículos abordando temas específicos em química. Em 2007 sairá o caderno Representação Estrutural em Química.

Conheça mais sobre as atividades da Divisão em Ensino de Química acessando a página da Sociedade Brasileira de Química em

<http://www.s bq.org.br>