



Construindo um foguete de garrafas PET e sua base de lançamento de PVC: O protótipo *Rocketeers* UNIFAL-MG

.....
R.R. Cuzinatto

E-mail: rodrigo.cuzinatto@unifal-mg.edu.br

A. M. D'Ambrosio

E-mail: amd9004@gmail.com

H.F. de Andrade

E-mail: hugo_pinta@hotmail.com

A.M. de Queiroz

E-mail: alemendesmq@gmail.com

M.F. de Toledo Filho

E-mail: mauroftf@gmail.com

B.R. Duarte

E-mail: brduarte2@gmail.com

V.C. Lorencetti

E-mail: lorencetti.victor@gmail.com

S.A. Maéstri

E-mail: sergio.maestri@unifal-mg.edu.br

R.D. Martins

E-mail: renandreschmartins@gmail.com

Universidade Federal de Alfenas,
Alfenas, MG, Brasil

.....

Apresentamos o plano detalhado de construção de um protótipo de foguete de garrafas PET e sua base de lançamento de tubos de PVC desenvolvidos pela equipe *Rocketeers* UNIFAL-MG. Este trabalho pode ser entendido como um complemento à montagem experimental do estudo de J.A. Souza, Física na Escola **8**(2), 4 (2007) – Ref. [1]. O manual de construção inclui a lista de todos os materiais necessários. Dedicamos especial atenção à descrição da montagem dos foguetes com ogivas destacáveis e paraquedas (módulo de recuperação), próprios para lançamentos verticais.

Introdução

No colégio [2] aprendemos nos cursos de física básica que a aceleração gravitacional é aproximadamente constante, vale $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e que é sempre vertical e para baixo. Por isso, o movimento de um objeto atirado para cima (lançamento vertical) ou para o lado (obliquamente) é chamado de uniformemente acelerado.

Aprendemos também a calcular o alcance R de um projétil lançado com um ângulo θ com a horizontal e uma velocidade v através da equação [3]

$$R = \frac{v^2}{g} \sin(2\theta). \quad (1)$$

e somos ensinados que a trajetória curva descrita por esse projétil desde o ponto de lançamento, passando pela altura máxima h e voltando ao chão é chamada de *parábola*.

Nas aulas de física, encontramos a equação para essa altura máxima em função do tempo t de voo:

$$h = \left(\frac{t}{2}\right)v \sin\theta - \frac{1}{2}g\left(\frac{t}{2}\right)^2. \quad (2)$$

Na Eq. (2), a quantidade t é o tempo cronometrado desde o lançamento até o retorno do objeto ao solo. A quantidade $(t/2)$ é o tempo decorrido até a altura máxima. Isso acontece porque o movimento do foguete é temporalmente simétrico quando desprezamos o efeito do arrasto do ar e a força de empuxo [4].

Tudo isso segue das equações para o movimento retilíneo uniforme (na direção horizontal) e para o movimento retilíneo uniformemente acelerado (que o projétil executa na direção vertical) para um corpo tomado como ponto material.¹ O que raramente aprendemos no colégio é como fazer experiências para testar a validade dessas equações. Dificilmente temos a

chance de lidar com aparatos que podem nos ajudar a observar o significado desses símbolos matemáticos. Um aparelho simples que permite essa experimentação é o *lançador de foguetes movidos pela combinação de água e ar a altas pressões*. Mostraremos neste artigo que esse aparelho pode ser montado no estilo “Faça Você Mesmo” pelos estudantes, professores e interessados na experimentação da “Física na Escola”. O sistema foguete-lançadora é composto de materiais recicláveis (como garrafas PET, placas de isopor, canudos) e de baixo custo (cola plástica, elásticos, tubo e conexões de PVC, bomba de pneu de bicicleta). Ele é portátil e pode ser construído em casa ou na classe e, depois, usado em quadras ou campos abertos.

O protótipo da equipe *Rocketeers* UNIFAL-MG foi desenvolvido para uso no projeto de extensão “A Física do Lançamento de Foguetes Artesanais” [5-7]. Ele foi testado em vários eventos nos últimos anos [5,8,9], construído em oficinas junto com professores e estudantes do Ensino Médio e usado para verificar as Eqs. (1) e (2).

Nas próximas seções compartilhamos o receituário de produção do sistema foguete-lançador dos *Rocketeers* UNIFAL-MG. Começamos na seção “Montagem da base de lançamento” apresentando o plano de construção da base de lançamento. A seção “Montagem dos foguetes”, que descreve a confecção dos foguetes, tem duas partes. Na primeira, que trata do modelo de foguete mais tradicional com ogiva fixa, apresentamos algumas modificações à montagem elaborada por Souza [1]. Na segunda parte mostramos como fazer o foguete com ogiva destacável e paraquedas, que funciona como sistema de recuperação do foguete para os lançamentos verticais. A Fig. 1 mostra o sistema completo ao qual estamos nos referindo.

Terminamos o artigo com a seção “Lançamento do foguete”, em que sugerimos

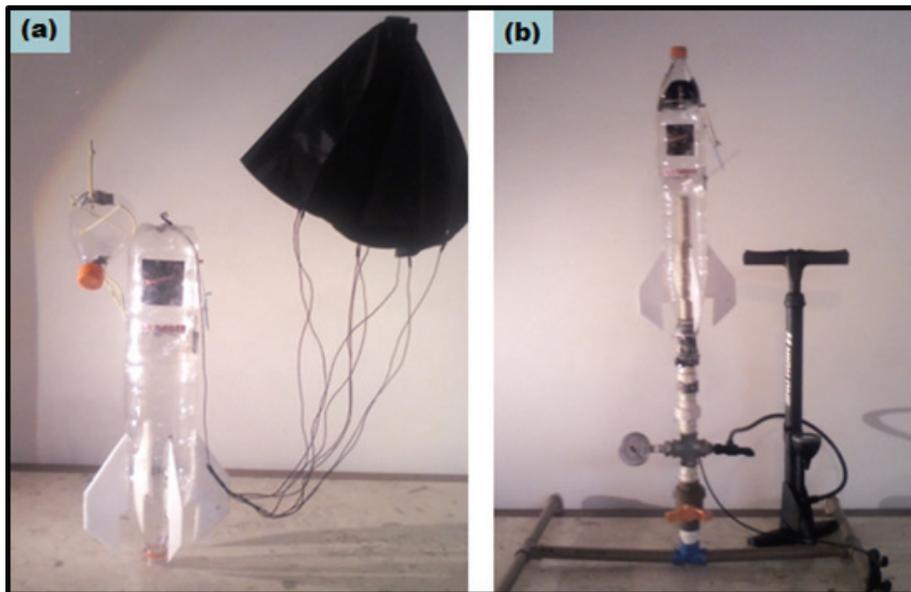


Figura 1: (a) Foguete artesanal com ogiva destacável e paraquedas (módulo de recuperação). (b) Foguete encaixado à base de lançamento composta por tubos e conexões de PVC, manômetro e bomba de ar.

mos um experimento simples com o sistema lançador-foguete que acabamos de montar.

Montagem da base de lançamento

Antes de começarmos, sugerimos que o leitor assista ao vídeo que ilustra a montagem da base de lançamento disponível no canal da equipe *Rocketeers* UNIFAL-MG no YouTube – vide Ref. [8] e vídeo da montagem da base de lançamento na internet. Além de dar uma visão geral sobre todo o trabalho detalhado a seguir, o vídeo mostra a integração das partes do lançador em uma animação de alta-fidelidade produzida em AutoCAD.

A construção da base de lançamento é a parte de todo o conjunto que demanda maior atenção e cuidado. Aqui, recomendamos a utilização de materiais de boa qualidade.

A seguir apresentamos a lista de materiais utilizados na construção da base de lançamento.

- 1 abraçadeira metálica com rosca sem fim (60 mm diâmetro)
- 1 anel de borracha para vedação (18 mm)
- 1 bucha de redução de PVC de $\frac{3}{4}$ "- $\frac{1}{2}$ "
- 2 cabos de aço com capa para freio de bicicleta
- 2 conduítes para cabo de aço (utilizados em freios de bicicleta)
- Cano de PVC $\frac{1}{2}$ " com parede reforçada (40 cm)
- 1 plugue de PVC $\frac{3}{4}$ " com rosca
- 4 abraçadeiras de plástico
- 1 cruzeta de alumínio fundido com

rosca $\frac{3}{4}$ "

- 30 cm de fita metálica multi-furos
- 4 joelhos de PVC $\frac{3}{4}$ " soldável
- 1 luva de PVC para esgoto (40 mm)
- 1 luva de união de PVC com rosca $\frac{3}{4}$ "
- 1 níquel de PVC com rosca $\frac{3}{4}$ "
- 1 registro de esfera com rosca $\frac{3}{4}$ "
- 1 tubo de PVC $\frac{3}{4}$ " (2 m)
- 1 cachimbo para criar rosca $\frac{1}{2}$ "
- 1 T de PVC com parede reforçada com uma rosca central $\frac{3}{4}$ "
- 2 T de PVC $\frac{3}{4}$ " soldável
- 1 bico de pneu de bicicleta
- 1 manômetro com rosca (medidor de pressão)
- 1 bucha de redução metálica de $\frac{3}{4}$ " para rosca cônica no diâmetro da rosca do manômetro

- 1 fita veda rosca
- 6 parafusos com diâmetro um pouco inferior ao diâmetro da fita metálica multi-furos
- 1 bomba para encher pneus de bicicleta
- 1 frasco de cola araldite para vedação
- 1 mola (de preferência de acelerador de Fusca) (10 cm, aprox.)
- 1 lixa para PVC
- Furadeira
- 1 conector de fios (utilizado para unir fios de chuveiros)

O apoio em H da base

O apoio mantém toda a estrutura da base de lançamento firme ao chão e contribui com o direcionamento do tubo de disparo. Além disso, ela permite abortar o lançamento caso haja algum problema. Seguem os passos necessários à sua montagem.

Primeiramente, corte o tubo de PVC $\frac{3}{4}$ " de forma a obter quatro partes de 30 cm cada. Conecte dois segmentos dos tubos de PVC $\frac{3}{4}$ " de 30 cm por meio do T de $\frac{3}{4}$ " de PVC com parede reforçada e rosca, como na Fig. 2-a.

O próximo passo é acoplar os dois T de PVC soldáveis aos lados livres dos canos de PVC de 30 cm (Fig. 2-b) e depois unir os outros dois canos de PVC $\frac{3}{4}$ " de 30 cm de comprimento a esses mesmos T (Fig. 2-c). Para finalizar o apoio da base de lançamento, conecte os quatro joelhos de PVC nas pontas dos canos de PVC soldável (Fig. 2-d).

O corpo da base

Faremos agora a montagem do corpo da base de lançamento. O corpo é responsável por direcionar e permitir a movimentação do ar para dentro da garrafa PET. Para iniciarmos essa etapa, precisamos unir o registro de esfera com rosca

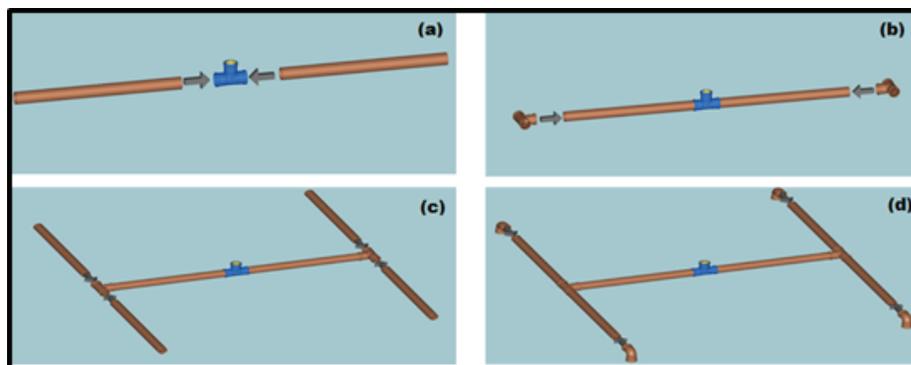


Figura 2: Sequência de passos para construção do apoio em H da base de lançamento mostrando em (a) a conexão dos dois segmentos de tubos de PVC $\frac{3}{4}$ " de 30 cm por meio do T de $\frac{3}{4}$ ", (b) acoplamento dos dois T de PVC soldáveis aos lados livres dos canos de PVC de 30 cm, (c) conexão dos outros dois canos de PVC $\frac{3}{4}$ " de 30 cm aos Tes acoplados em (b) e (d) conexão dos quatro joelhos de PVC nas pontas dos canos de PVC soldável.

$\frac{3}{4}$ " à rosca do T central do apoio H e juntar a cruzeta de alumínio ao registro (Fig. 3-a). Vale lembrar que nessa etapa de construção e em todas as seguintes até a finalização da montagem do corpo da base, todas as roscas deverão ser envolvidas com fita veda-rosca para que, quando unidas, as peças fiquem suficientemente vedadas, impedindo que haja vazamento de ar.

Agora daremos atenção ao plugue de PVC, operando-o separadamente. Essa peça receberá a válvula de bico de pneu de bicicleta que permitirá a entrada de ar no sistema. Uma furadeira pode ser usada para construir um orifício no plugue com aproximadamente o mesmo diâmetro que o bico do pneu (Fig. 4-a). O ideal é que o buraco tenha um diâmetro ligeiramente menor que o do bico, de modo que não permaneça nenhum tipo de folga aparente. Em seguida o bico deve ser empurrado para dentro do buraco até aproximadamente metade do seu tamanho. É necessário passar um pouco de cola araldite no interior do plugue para vedar e fixar o sistema plugue-bico.

A Fig. 3-b mostra como acoplar três das peças à cruzeta de alumínio. De um lado da cruzeta é inserida a bucha de redução metálica; do outro lado, o plugue de PVC com o bico de pneu de bicicleta; na parte de cima, é inserido o nípel.

Agora prepararemos a luva de PVC para juntá-la a nossa base. Essa peça possui algumas partes salientes no seu exterior que precisarão ser retiradas. Para isso, basta lixar o exterior da luva com a lixa para PVC até que a superfície da luva de PVC fique lisa, conforme apresentado na Fig. 4-b.

A Fig. 3-c mostra a união da luva de PVC com rosca ao nípel inserido na parte superior da cruzeta de alumínio e também o acoplamento do manômetro à bucha de redução metálica inserida em um dos lados da cruzeta.

A próxima etapa prepara a união do tubo de lançamento (Fig. 5-b) à base. Essa haste é responsável por garantir o direcionamento do protótipo e consiste em um cano de PVC, por onde a garrafa PET desliza antes de deixar a base para seu voo. Para isso, conectamos uma bucha de redução $\frac{3}{4}$ " para $\frac{1}{2}$ " à luva de PVC da parte superior da cruzeta (Fig. 3-d).

Devemos utilizar como haste um cano de PVC $\frac{1}{2}$ " com parede reforçada. O cano deve ser cortado para ter cerca de 30 cm de extensão. Para a conexão é necessária a criação de uma rosca em uma das pontas do cano (Fig. 5-a). Essa rosca deve apresentar aproximadamente 5 cm de comprimento e ser feita com uma tarraxa ou "cachimbo", indicada na lista inicial

de materiais. Além da rosca, faz-se necessário criar um sulco a uma distância de aproximadamente 2 cm do final da rosca (Fig. 5-a). Esse sulco serve para fixar o anel de borracha para vedação e impedir que a água e o ar introduzidos no foguete escapem. Para sua confecção, pode-se utilizar um ferro de solda elétrica ou até um prego quente.

Após a confecção da rosca no tubo, devemos encaixá-lo na bucha de redução acoplada anteriormente na parte superior da base (Fig. 5-b) e, em seguida, fixar quatro abraçadeiras de plástico em volta da luva de PVC (Fig. 6-a) com a abraçadeira metálica sem fim e cola araldite

(Fig. 6-b). Ressaltamos que a altura de fixação das abraçadeiras plásticas depende da garrafa PET utilizada e que a parte mais grossa dessas abraçadeiras servirá para segurar a garrafa no fim do bico através da saliência anelar da garrafa.

Módulo de disparo

O módulo de disparo é responsável por impedir que o foguete desprenda-se da base e seja lançado prematuramente durante a pressurização.

O primeiro passo da montagem do módulo de disparo é dobrarmos a fita metálica multi-furos até que ela envolva o cano de $\frac{1}{2}$ " (Fig. 7-a). Fixaremos essa

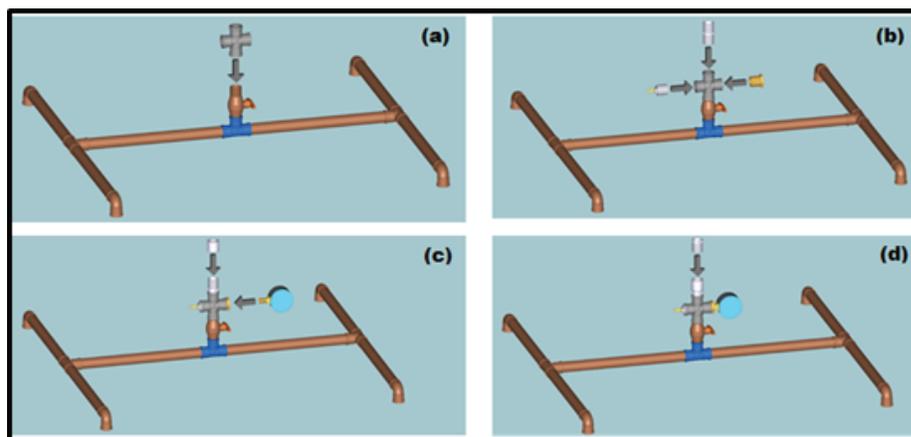


Figura 3: Sequência de passos para montagem do corpo da base mostrando em (a) a junção do registro de esfera ao T central do apoio H e da cruzeta de alumínio ao registro, (b) a adição da bucha de redução metálica à direita da cruzeta, do plugue com o bico de pneu de bicicleta (Fig. 4-a) à esquerda da cruzeta e do nípel acima dela, (c) a conexão do manômetro à bucha de redução e da luva de PVC sem saliências (Fig. 4-b) ao nípel e (d) o acoplamento da bucha de redução $\frac{3}{4}$ " para $\frac{1}{2}$ " à luva de PVC.

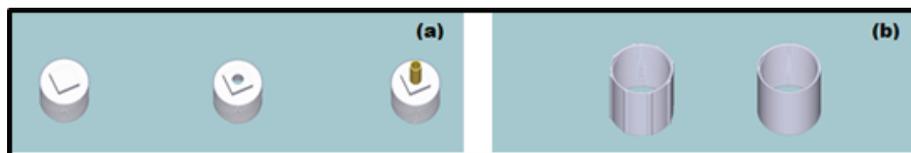


Figura 4: (a) Fixação do bico de pneu de bicicleta ao plugue de PVC. (b) Remoção das saliências exteriores da luva de PVC.

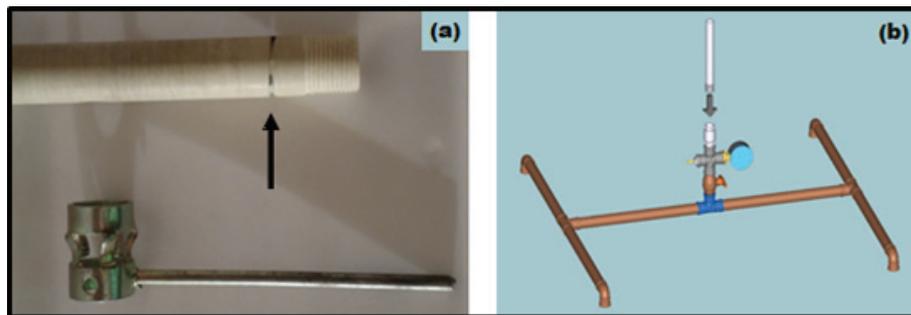


Figura 5: (a) Na parte de cima mostramos o tubo de lançamento com rosca e sulco, indicado pela seta. Abaixo mostramos o cachimbo utilizado para fazer a rosca no tubo de lançamento. (b) Fixação da haste à base.

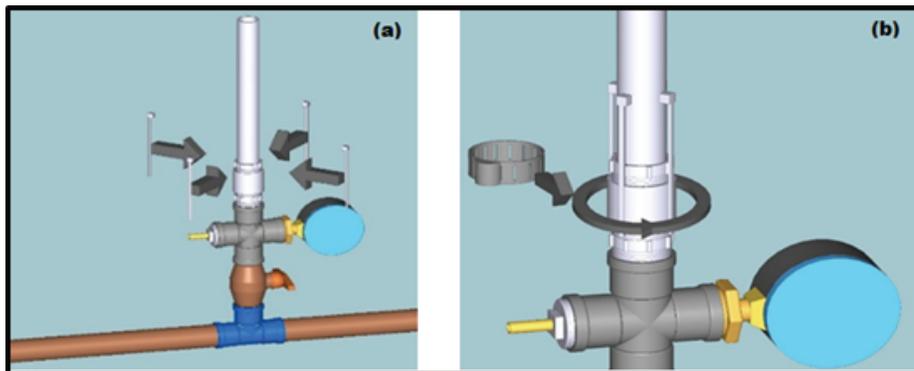


Figura 6: (a) Alocação das abraçadeiras plásticas na luva de PVC. (b) Fixação das abraçadeiras de plástico com a abraçadeira metálica com rosca sem fim.

peça em um dos dois canos inferiores que ligam o apoio da base H ao T de PVC com rosca $\frac{3}{4}$ ". Essa fixação deverá ser feita a uma distância de cerca de 10 cm do T que conecta os outros dois canos que se ligam ao joelho.

A uma distância de aproximadamente 10 cm da fixação anterior coloca-se um segmento da fita metálica perfurada, dobrada em forma de "U", envolvendo o cano PVC de $\frac{1}{2}$ ". Deve-se tomar cuidado para que os furos superiores da fita fiquem alinhados (Fig. 7-b). Deve-se prender essa parte ao cano com dois parafusos. Na próxima etapa será necessária a utilização dos dois cabos de aço e também dos conduítes plásticos para os cabos. Esses conduítes devem ter um comprimento menor do que os cabos.

O conjunto cabo de aço-conduíte deverá ser fixado ao corpo da cruzeta de alumínio (Fig. 7-c) com o auxílio das fitas de amarração, de modo que não haja folgas. A ponta mais grossa de cada cabo é presa com cola araldite ao anel de PVC que corre sobre as abraçadeiras de plástico verticais, as quais travam o foguete pela saliência na boca da garrafa PET. A outra extremidade de cada cabo é presa a um conector para fios e cabos elétricos, sendo a distância do objeto para o fim do cabo, o suficiente para que o mesmo fique entre o "U" e o anel da fita metálica.

A mola tem uma das extremidades presas na fita multi-furos da Fig. 7-a. A outra extremidade da mola é enganchada no conector. A mola é, então, esticada até que se alinhe com a peça em "U". Em seguida, um prego longo é usado para travar o conector. O prego pode ser amarrado a um barbante. Com o prego no lugar, o módulo de disparo estará engatilhado e assim deve permanecer durante a pressurização do foguete. Na pressão crítica puxamos o barbante, removendo o prego. A mola se contrai, puxando o cabo de aço que desloca o anel de PVC para baixo. Então, as abraçadeiras de plástico verti-

cais, posicionadas no topo do módulo de disparo, curvam-se para fora da saliência da garrafa e o foguete terá liberdade para sair do sistema.

Montagem dos foguetes

Foguete de ogiva fixa

O roteiro detalhado de construção de um foguete de ogiva fixa já foi publicado nesta mesma revista por Souza [1], e não há necessidade de repetir o assunto. Aqui, faremos apenas algumas observações que caracterizam particularidades do nosso protótipo.

Para uma rápida visualização de como é feita a montagem do foguete de ogiva fixa, convidamos o leitor a checar o canal *Rocketeers* UNIFAL-MG no YouTube – vide Ref. [8] e vídeo da construção dos foguetes na internet.

Conforme a Ref. [1], são necessárias duas garrafas PET para a construção do foguete. Uma delas é mantida intacta e forma a câmara de pressurização do

foguete. A segunda garrafa PET é recortada ao longo da linha onde ela começa a afunilar em direção à boca. A sua ponta é, então, colada ao corpo da primeira garrafa e usada como ogiva. A parte remanescente dessa segunda garrafa é, em geral, descartada. Neste trabalho, o corpo recortado é útil para a construção do foguete com módulo de recuperação – veja a seguir.

A tampa de plástico da ogiva é preenchida por uma mistura de cola epóxi e chumbo usado em varas de pescar. Isso desloca o centro de massa (CM) do foguete para a sua ponta; isso também aumenta a distância entre o CM e o centro de pressão (CP) do foguete. Conforme apontado por Souza [1], é condição de estabilidade do foguete durante o voo que o CM esteja acima do CP por uma distância igual ou maior que 1,5 cm (mas não muito maior).

O CP em nosso modelo de foguete ocupa uma posição diferente daquela apresentada pelo protótipo de Souza [1], pois as nossas aletas têm geometria diferente das adotadas naquele trabalho, conforme mostra a Fig. 8. Nela vemos uma aleta desenhada para uma garrafa de refrigerante de 2 litros. Essa mesma placa de isopor (usada para embalar frios em supermercados) pode ser empregada para o recorte das quatro aletas de um mesmo foguete, o que poupa material.

A técnica de determinação de CM e CP de um foguete PET são descritas na Ref. [1].

Foguetes de ogiva destacável

Conforme observado na Ref. [1] a velocidade de lançamento de um foguete pressurizado a 80 psi é estimada em

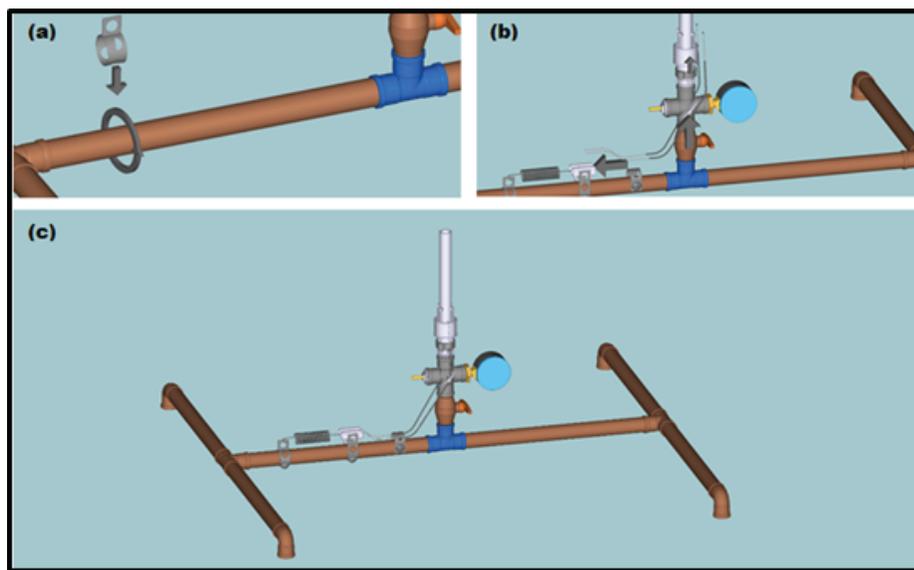


Figura 7: (a) Fixação da fita metálica ao cano de $\frac{1}{2}$ ". (b) Fixação do cabo de aço à base. (c) Base de lançamento de tubos e conexões de PVC completamente montada.

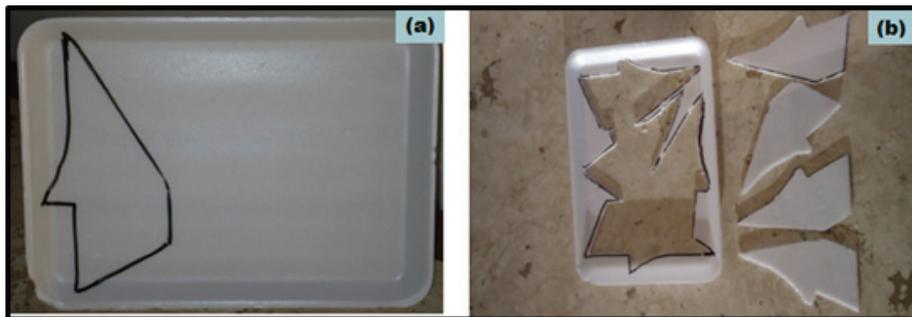


Figura 8: (a) Formato das aletas de isopor e (b) disposição das mesmas para o corte.

20 m/s (pela modelagem hidrodinâmica e termodinâmica) ou 22,5 m/s (pelo estudo do movimento desconsiderando o atrito e o formato do foguete). Isso significa que o foguete pode atingir o solo a 72 km/h no retorno de um lançamento vertical.² Isso pode provocar danos ao foguete, o que não é desejável por dois motivos: (i) exige a produção de mais foguetes PET quando o que se quer é economia; (ii) em protótipos mais sofisticados pretende-se inserir uma micro-câmera na ogiva para filmar o lançamento, e uma queda tão vertiginosa provavelmente danificaria esse equipamento. Pensando nisso, a equipe *Rocketeers* UNIFAL-MG desenvolveu um foguete com paraquedas. Ele é liberado logo após o foguete atingir a altura máxima em um lançamento vertical, no início do retorno ao solo. Nesta seção apresentamos um guia detalhado para o desenvolvimento dessa estrutura.

Módulo de recuperação

Vamos utilizar alguns dos materiais da lista de construção da base de lançamento e também os indicados a seguir:

- 1 garrafa PET
- 1 cilindro de garrafa PET reservado

da confecção de protótipo de ogiva fixa

- 1 fita adesiva do tipo *silver tape*
- 1 fita adesiva larga (45 mm)
- 6 arames revestidos com PVC com cerca de 80 mm de comprimento
- Hastes de cotonetes
- 1 alfinete com fecho (que antigamente prendia a fralda do bebê)
- 3 gomas elásticas (daqueles utilizados para prender dinheiro)

Com a garrafa PET em mãos, desenhemos uma linha pontilhada de modo que consigamos cortar um tipo de funil. Fazemos quatro furos nesse funil. Os dois primeiros (furos "A") são localizados 20 mm acima da borda do funil e espaçados de cerca de 5 mm, como indicado na Fig. 9-a. Os dois últimos (furos "B") estão a 80 mm acima da borda, do lado oposto da garrafa com respeito aos furos "A" e espaçados a 5 mm entre si, como na Fig. 9-a. Perceba que as medidas foram aferidas sobre toda a extensão da curvatura da garrafa, com uma fita métrica flexível. Os furos podem ser feitos com uma ponta de metal aquecida, como um prego fino, por exemplo.

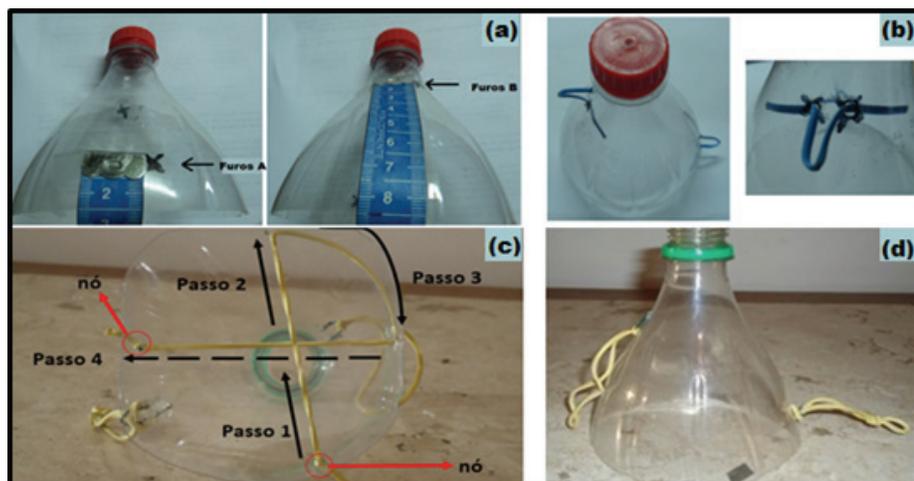


Figura 9: (a) Posição dos furos "A" e "B". (b) Posicionamento dos arames pelos furos "A" e "B". (c) Passo-a-passo da passagem da goma elástica linear pelos furos da ogiva. (d) Posicionamento das gomas elásticas na ogiva. Note o nó na extremidade do elástico da direita.

Vamos agora utilizar dois dos arames revestidos de PVC. O primeiro deles é inserido nos furos "A". Inserimos uma ponta do arame em cada orifício de forma que 20 mm de cada extremidade fique para dentro da garrafa. Depois, dobramos o arame de modo que as hastes fiquem bem próximas à parede da garrafa e formem uma volta em "U" do lado de fora da garrafa, como mostrado na Fig. 9-b. O segundo arame é acoplado nos furos "B" da mesma forma que o primeiro. Por fim, as extremidades dos arames são fixadas à parte interna da ogiva com cola quente ou fita adesiva.

Na ponta da dobra em "U" que está para fora do funil, inserimos gomas elásticas, como é indicado na Fig. 9-d. Perceba que a goma elástica posicionada nos furos "A" (parte inferior da garrafa), deve posuir um nó a uma distância de aproximadamente 10 mm de sua extremidade.

Com uma caneta esferográfica marcamos 4 pontos na parte inferior do funil que serão posteriormente furados com auxílio de um prego quente. O primeiro furo será localizado a cerca de 30 mm dos furos "A" (Fig. 9-c). O segundo estará a 80 mm do primeiro furo, o terceiro furo a 80 mm do segundo furo e o quarto furo a 80 mm do terceiro furo. Lembramos que todas essas medidas são aferidas levando-se em conta a curvatura da garrafa. Dessa forma os pontos ficam exatamente à mesma distância uns dos outros.

Após ter feito os furos, tome outra goma elástica (em forma de anel) e corte-a uma vez (para obter uma linha). Passe uma das pontas do elástico para dentro da garrafa através do primeiro furo do passo anterior; amarre a ponta elástica que ficou fora na própria garrafa produzindo um nó ("Passo 1", representado na Fig. 9-c). Passe a ponta livre do elástico dentro da garrafa pelo furo diametralmente oposto ("Passo 2", Fig. 9-c). Agora a ponta livre do elástico está do lado de fora da ogiva; ela deve percorrer a lateral de fora da ogiva até o furo adjacente. Insira essa ponta novamente na ogiva (conforme o "Passo 3" da Fig. 9-c). Então, passe a ponta livre do elástico pelo furo diametralmente oposto; quando a ponta estiver do lado de fora da garrafa novamente, amarre-a firmemente produzindo um segundo nó ("Passo 4", Fig. 9-c). Ao finalizarmos, fica evidente a formação de uma "cruz de elástico" no interior da ogiva; as pontas amarradas do lado de fora da garrafa.

A instalação desses elásticos é responsável por manter o paraquedas (cuja fabricação abordaremos posteriormente) dentro da parte superior do nosso foguete PET. Partiremos, então, para uma parte cru-

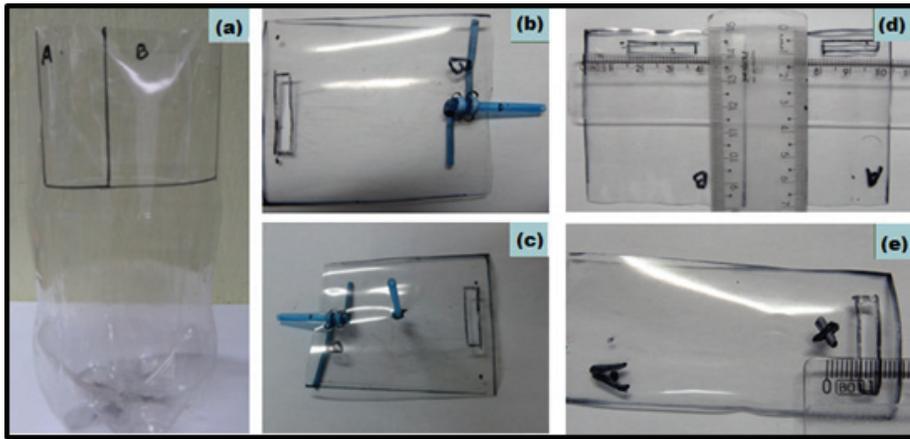


Figura 10: (a) Chapas "A" e "B" traçadas e cortadas do corpo da garrafa auxiliar. (b) Posições dos furos na chapa "B". Um arame enrola a haste de cotonete passando pelos quatro furos enquanto dá duas voltas ao seu redor. (c) Posicionamento da segunda haste de cotonete na chapa "B". (d) Posição dos cortes retangulares nas chapas "A" e "B". (e) Furo na chapa "A" a 15 mm do recorte.

cial da montagem do módulo de recuperação, responsável pela expulsão do paraquedas.

O leitor deve lembrar do corpo da garrafa descartado durante a confecção do foguete PET de ogiva fixa. Ele tem o formato mostrado na Fig. 10-a e será usado justamente nessa etapa.

Faremos duas marcações retangulares nesse corpo de garrafa sem a ponta. A primeira marcação, indicada na Fig. 10-a pela letra "A", deve apresentar 70 mm de comprimento por 30 mm de largura. A segunda marcação, indicada pela letra "B", deve apresentar 70 mm de comprimento e 55 mm de largura. Agora precisamos fazer um corte retangular em uma das extremidades, com auxílio de um estilete, de 25 mm por 5 mm na chapa "B" e de 20 mm por 5 mm na chapa "A", como apresentado na Fig. 10-d.

Na chapa "B", faça quatro furos localizados a 15 mm de distância da extremidade oposta ao corte retangular (Fig. 10-

b). Os furos devem ser posicionados no meio da largura da chapa. Esses furos serão necessários para amarrar a haste de cotonete de 30 mm com um arame, fazendo com que 15 mm dessa haste ultrapasse o final da aba de plástico (Fig. 10-c).

Ainda na chapa "B", vamos inserir mais uma haste de cotonete, essa haste agora com 15 mm de comprimento. Faça um furo a 35 mm da extremidade da chapa e cole a haste de cotonete na borda do furo; pode ser utilizada cola quente, como apresentado na Fig. 10-c. Na chapa "A", faremos apenas um furo a 15 mm da extremidade onde foi feito o corte retangular, conforme a Fig. 10-e.

Utilizando o restante da garrafa auxiliar empregada na confecção das chapas, continuaremos a montagem do módulo de disparo, onde as mesmas serão instaladas.

Recorte as rebarbas que sobraram na garrafa auxiliar, eliminando as reentrâncias que foram produzidas ao cortar as chapas "A" e "B". O topo do corte deve estar

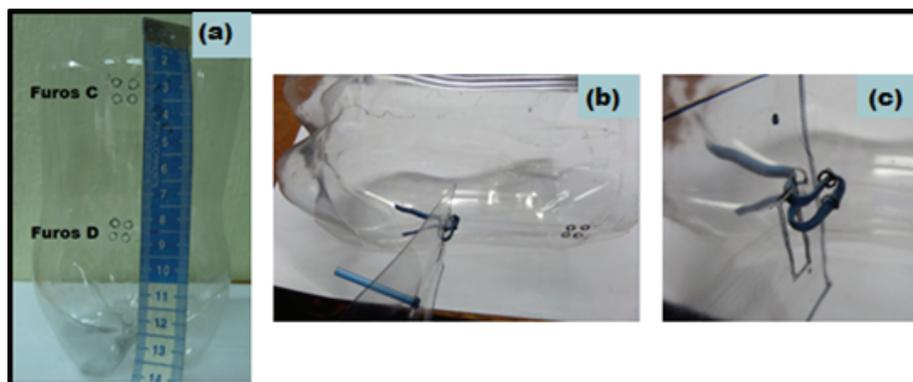


Figura 11: (a) Posição dos furos "C" e "D" para inserção dos arames. Os furos "E" são diametralmente opostos aos furos "C". (b) Acoplamento da chapa "B" ao fundo de garrafa com o arame de PVC. (c) Detalhe de como inserir o arame para fixação da chapa "B".

nivelado, de forma a deixar o corpo da garrafa auxiliar com altura de aproximadamente 15 cm, medidos desde o fundo até o topo da mesma, conforme Fig. 11-a. Três arames de PVC devem ser instalados nesse restante da garrafa. Para a fixação de cada arame na garrafa, serão feitos conjuntos de 4 furos em diferentes regiões. Ao visualizar a garrafa com a borda cortada para cima, a posição dos primeiros furos, furos "C", será 20 mm abaixo da parte cortada da garrafa. O segundo conjunto de furos, furos "E", será diametralmente oposto aos furos "C". O terceiro conjunto de furos, furos "D", será 55 mm abaixo dos furos "C" (Fig. 11-a).

Agora vamos fixar as chapas "A" e "B" no restante da garrafa auxiliar cortada pelos furos "C" e "D" que acabamos de fazer. Veja as Fig. 11-b, 11-c e a descrição a seguir. A chapa "B" será sustentada diante dos furos "D" com auxílio de um arame revestido de PVC. Primeiro passamos o arame por dois furos adjacentes, formando um "U" com a curva dentro da garrafa; depois, passamos as pontas livres pelo recorte da chapa "B"; então, curvamos o arame em um arco. Finalmente, inserimos as pontas livres do arame no par de furos "D" livres.

A chapa "A" é sustentada diante dos quatro furos "C" (no topo da sobra de garrafa) também com auxílio do arame, exatamente da mesma forma com que a chapa "B" foi colocada à frente dos furos "D". Assim, com as duas chapas posicionadas, a garrafa ficará na forma da Fig. 12-a e será denominada "corpo do módulo".

Perceba-se que as chapas do corpo do módulo são capazes de se movimentar livremente pelo arco de arame. Notamos também que a haste de cotonete que avança paralelamente à parte superior da chapa "B" se encaixa no furo (inferior) da chapa "B" e se encaixa no furo (inferior) da chapa de plástico "A", como na Fig. 12-b.

O conjunto de furos "E" (diametralmente oposto aos furos "C") serão utilizados agora. Um arame com cobertura de PVC é colocado por entre os furos "E" da mesma maneira que fizemos anteriormente, ou seja, como uma alça que se projeta do corpo do módulo (veja a parte superior da Fig. 13-a). Essa alça será usada para uma amarração com elásticos que manterá a ogiva presa ao corpo do foguete durante o movimento de subida. O resultado é mostrado nas partes (b)-(d) da Fig. 13. A seguir descrevemos como conectar os elásticos à ponta do foguete.

Antes, porém, é necessário afixar o alfinete que manterá o fio do paraquedas (que produziremos a seguir) fixo ao foguete. Para tanto, usa-se um alfinete com fecho e um arame. Utilize um prego para

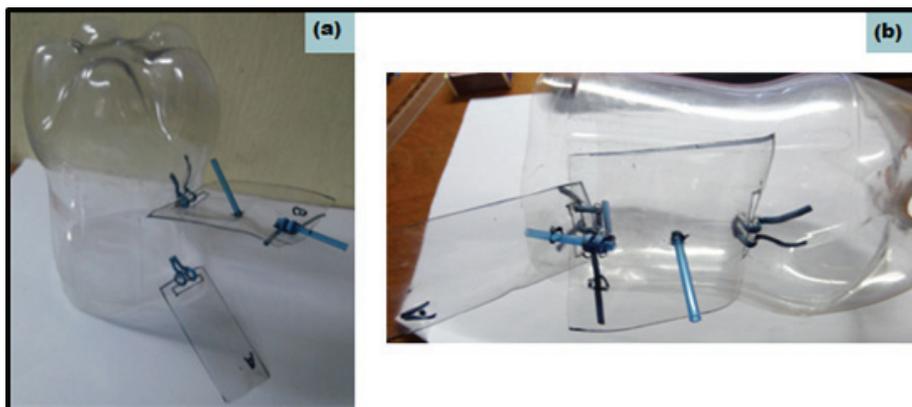


Figura 12: (a) Sistema chapas-arames posicionados no corpo do módulo de recuperação. (b) Encaixe da haste de cotonete da chapa "B" na chapa "A".

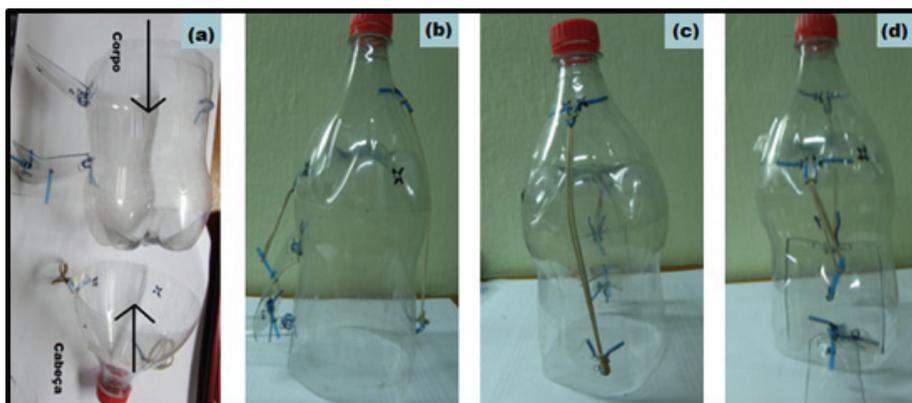


Figura 13: (a) Alinhamento do corpo do módulo para encaixe com a ogiva destacável. (b) Elásticos e hastes devidamente conectados, promovendo a união da cabeça do foguete com o corpo do módulo. (c) e (d) Diferentes ângulos de visada da conexão do corpo do módulo com a ogiva destacável.

fazer dois furos adjacentes no fundo da garrafa auxiliar da Fig. 13 (trata-se da região entre os quatro gomos de apoio da garrafa PET). Passe o arame por entre os furos, formando um arco para fora da garrafa. As pontas do arame dentro da garrafa podem ser coladas ao corpo do módulo ou amarradas firmemente umas às outras. O alfinete com fecho é colocado na alça. Resta apenas encaixar o funil no corpo do módulo, como mostra a posição de alinhamento na Fig. 13-a.

Vamos agora conectar os elásticos presentes na ogiva. O elástico conectado ao arame dos furos "B" (visto na Fig. 9-d, parte superior esquerda) será amarrado ao arame do corpo do módulo localizado nos furos "E" (mostrados na parte inferior da Fig. 13-c). Já o elástico localizado nos furos "A" (visto na Fig. 9-d, parte inferior direita) da cabeça será conectado à haste de cotonete de 15 mm (como se observa na região central da Fig. 13-d). Depois de acoplar todos os elásticos e hastes nas posições descritas acima, obtemos a estrutura do módulo de recuperação

como mostrado nas partes (b) a (d) da Fig. 13.

O foguete completo é obtido quando juntamos o módulo de recuperação à cauda do nosso foguete (peça que contém as aletas de isopor) por meio de fita adesiva larga. Essa parte é aquela também usada no foguete de ogiva fixa da Ref. [1] e que aparece na parte inferior de nossa Fig. 1-a. Lembramos que a ogiva destacável deve ter a sua borda circular recortada de forma que a ponta não fique totalmente justa,

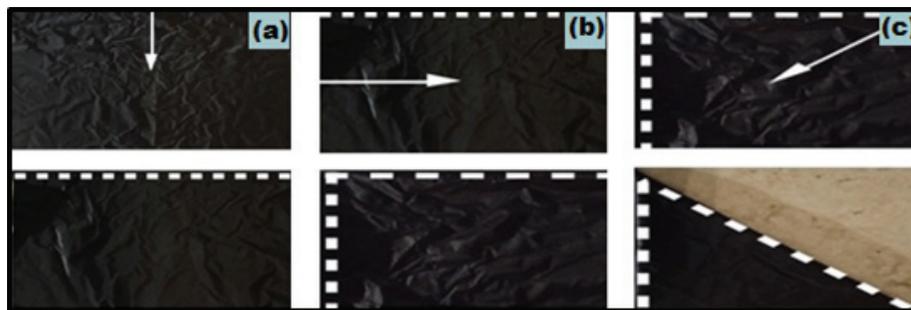


Figura 14: (a)-(c) Dobragem do tecido para o paraquedas. A parte (a) é constituída de duas fotos na mesma coluna; o mesmo vale para as partes (b) e (c).

apertada, quando colocada sob o corpo do módulo. Ela deve estar mantida na posição somente pelos elásticos, caso contrário o arrasto do ar na descida do foguete não será capaz de movimentar as chapas "A" e "B" para destacar a ogiva e permitir a abertura do paraquedas.

Confeção do paraquedas

Para finalizar definitivamente o módulo, construiremos o paraquedas responsável por diminuir a velocidade de queda do nosso protótipo de foguete PET. Para a sua confecção, precisaremos de:

- Tecido de nylon (semelhante ao usado em guarda-chuvas) medindo 550 mm x 550 mm
- 1 fita adesiva do tipo *silver tape*
- Furador de papel (do tipo que faz orifícios circulares)
- Fio de nylon com aproximadamente 1 mm de diâmetro

O primeiro passo é estender o tecido de nylon e dobrá-lo ao meio. Então, dobramos novamente o tecido, só que dessa vez lateralmente, e depois dobramos o tecido diagonalmente. Nas Figs. 14-a, b e c, as linhas pontilhadas indicam os locais de dobramento e as setas indicam o sentido da dobra.

Trace um arco no triângulo formado pelo tecido e faça um furo, não muito grande, um pouco acima desse arco, como na Fig. 15-a.

Se cortarmos na linha indicada na Fig. 15-a, o tecido aberto deve ter o formato de um círculo com oito furos separados pela mesma distância. Deveremos, então, cortar oito segmentos de aproximadamente 55 mm do fio de nylon. Cada um desses pedaços de fio deve ser passado por um único orifício do pano circular do paraquedas (Fig. 15-b). Após passar pelo orifício, o fio é dobrado na metade, tendo suas pontas reunidas e fixadas com fita *silver tape*. Fazemos isso para as oito tiras. Depois, as pontas soltas das oito tiras são unidas usando fita *silver tape*. Como próximo passo, cortamos uma nova tira de 45 mm de comprimento do mesmo tipo de fio, e prendemos uma extremidade des-

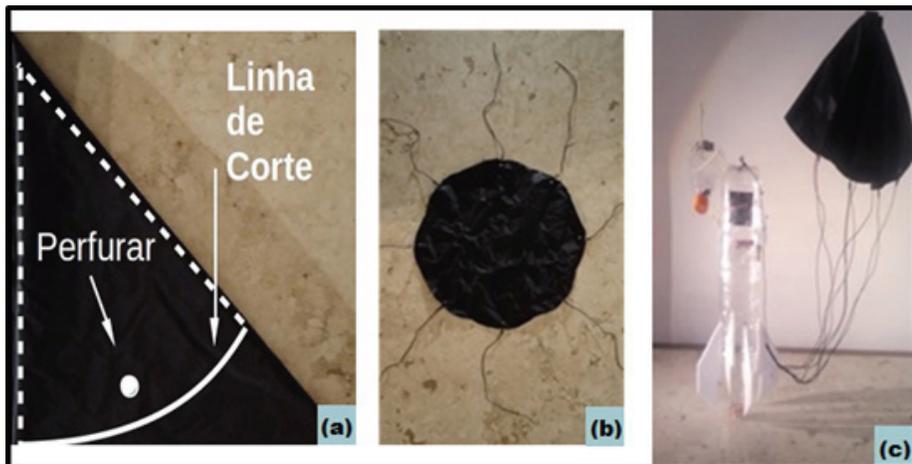


Figura 15: (a) Indicações de onde o arco e o furo devem ser feitos no tecido. (b) Paraquedas composto de tecido e fios de nylon. (c) Paraquedas instalado no módulo de recuperação.

se fio (com *silver tape*) ao conjunto de fios contendo o pano do paraquedas. A outra extremidade da tira de 45 mm deve ser presa ao alfinete com presilha no módulo de recuperação para, enfim, terminarmos a construção desse sistema. A Fig. 15-c mostra o paraquedas conectado ao módulo de recuperação.

Antes do lançamento, o paraquedas deve ser dobrado e alojado dentro da ogiva destacável, que então é montada com o sistema de elásticos, conforme a Fig. 13-b.

Como funciona o sistema de recuperação? O foguete é lançado para cima ($\theta = 90^\circ$). Ao atingir a altura máxima, o foguete para por um instante, com o bico ainda para cima, e começa a cair. O arrasto do ar levanta as chapas "A" e "B" do módulo de recuperação, a ogiva destaca-se da ponta do foguete, girando em direção aos furos "E", por onde se dependura pelo elástico. Simultaneamente, o paraquedas é liberado e se abre por conta do arrasto do ar. A partir daí, vemos o espetáculo do foguete descer suavemente até o solo (Fig. 16-b). Em condições de pouco vento lateral o foguete desce praticamente acima da base de lançamento. Isso, de fato, aconteceu em uma ocasião de nossos lançamentos.³ Nesta, um dos *Rocketeers* UNIFAL-MG foi capaz de recolher o foguete com as mãos, antes que ele atingisse o solo.

Lançamento do foguete

Agora que temos o equipamento pronto, podemos fazer uso dele. Vamos experimentar! Primeiro, compartilhamos algumas recomendações de uso; depois, sugerimos um experimento que permite usar as Eqs. (1) e (2). Para nós, isso foi um prazer. Brincando, descobrimos que as equações não são assim tão complicadas.⁴

O espaço escolhido para o lançamento é tão melhor quanto mais amplo. Isso per-

mite escolher valores suficientemente altos de pressão no foguete para produzir uma velocidade inicial v grande, o que leva a um alcance R também grande - conforme a Eq. (1) - no caso do lançamento oblíquo (Fig. 16-a). O ângulo que permite o maior alcance é $\theta = 45^\circ$. Isso segue da teoria, Eq. (1), e também da experimentação. Nós podemos lançar os foguetes em diferentes ângulos de inclinação para verificar que a distância máxima alcançada ocorre para $\theta = 45^\circ$, se mantivermos o mesmo valor de pressão (e sob as mesmas condições de vento).

Uma boa ideia é untar o cano de encaixe da base de lançamento que sustenta o foguete com óleo de cozinha. Isso evita que o foguete encalhe mesmo depois da pressurização e da liberação da trava.

Outra dica útil é encher o foguete PET até a metade com água. Com pouca água, o foguete não adquire uma velocidade inicial suficientemente elevada. Os estudantes estão convidados a explicar esse fato com base na terceira lei de Newton e na "fórmula do foguete" [4]. Muita água dentro do foguete faz com que ela entorne pelo cano de sustentação para dentro dos tubos da base, reduzindo drasticamente a pressão do sistema. Para um tratamento quantita-

tivo da pressão interna no foguete, indicamos novamente a Ref. [1].

O manômetro (medidor de pressão do sistema lançador-foguete) deve ser checado durante todo o processo de bombeamento de ar. É recomendável que a pressão interna nunca ultrapasse 80 psi, por uma medida de segurança. Também como medida de segurança, as pessoas devem ficar atrás da direção para onde aponta o foguete e, se possível, longe da base (Fig. 16-a). Não devemos pressurizar o foguete sem água, pois ele pode explodir em caso de, inadvertidamente, atingirmos pressões de cerca de 150 psi.

Depois que o foguete com meio volume de água é acoplado à base, é só bombear ar no foguete para pressurizá-lo⁵ e liberar sua trava. Rapidamente, a água é expelida do foguete, que é propulso para o voo. Ele sai da base com velocidade v em um ângulo θ , que é 90° no caso do lançamento vertical do foguete com módulo de recuperação, e $0 < \theta < 90^\circ$ no caso do lançamento oblíquo do foguete de ogiva fixa. Qual é a velocidade inicial v ? Para responder essa pergunta, vamos medir as características de voo.

O ângulo θ entre a direção horizontal (chão) e a direção do foguete (cano de sustentação da base) pode ser facilmente medido com um transferidor tipo meia-lua justaposto ao cano de ejeção. Um relógio de pulso ou cronômetro de celular são suficientes para medir o tempo t de voo do foguete. O alcance R do voo oblíquo pode ser estimado contando-se o número de passos desde a base até o ponto de impacto. Se a pessoa der passos de aproximadamente o mesmo comprimento durante a caminhada, é suficiente medir com uma fita métrica o tamanho de um único passo dessa pessoa. A distância total R é estimada multiplicando-se o número de passos pelo comprimento do passo.

Agora, basta substituir o valor tabelado [4] de $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e os valores medidos de θ e R na Eq. (1),⁶

$$v = \sqrt{\frac{gR}{\sin(2\theta)}} \quad (3)$$



Figura 16: (a) Lançamento oblíquo. (b) Descenso do foguete com paraquedas.

para encontrarmos o valor da velocidade inicial v do foguete. Em um lançamento oblíquo típico com o sistema foguete-lançador dos *Rocketeers* UNIFAL-MG (Fig. 16-a), fixamos $\theta = 45^\circ$ e, com uma pressão de lançamento de 80 psi, o alcance foi de $R = 33$ passos ≈ 30 m (cerca de 90 cm por passo). A Eq. (3) fornece o valor $v \approx 17$ m/s ≈ 62 km/h, ou seja, o foguete viaja mais rápido do que um carro que se desloca em uma via comum dentro da cidade. Note que esse valor está consistente com a estimativa de $v \approx 20$ m/s de Souza [1] em um lançamento vertical a 80 psi. Naquela referência foi usada uma técnica de cálculo inteiramente diferente da nossa, com uma física mais sofisticada envolvendo o escoamento da água pelo tubo do foguete e a expansão adiabática do vapor d'água ao final da ejeção. A concordância observada entre esses dois resultados (85%) sugere que a simplificação que adotamos (ausência de arrasto e movimento de um ponto material) é uma boa aproximação. Além disso, a bela consistência dos resultados mostra que a modelagem física realmente tem um grande poder preditivo.

A altura máxima h da trajetória oblíqua é calculada substituindo os valores do ângulo de lançamento θ , do tempo total de voo t e da velocidade v na expressão da Eq. (2). No experimento típico que mencionamos acima, o tempo total de voo foi de $t = 4$ s. Isso leva a $h \approx 4,5$ m. Esse valor pode ser comparado com a altura de prédios ou árvores ao redor do espaço de lançamento.

Podemos também obter a altura máxima do foguete utilizando a expressão para a velocidade vertical do mesmo, dada

por $v_y = v_{0y} - gt$, em que $v_{0y} = v \sin \theta$ é a componente vertical da velocidade inicial v . A velocidade vertical do foguete na altura máxima é nula, ou seja, $v_y = 0$, de modo que neste ponto temos $t/2 = v_{0y}/g$, sendo t o tempo total de voo. Substituindo $t/2$ na Eq. (2) obtemos:

$$h = \frac{v^2 \sin^2 \theta}{2g}. \quad (4)$$

Para estimar h usando a forma usual da Eq. (4), precisamos do valor da velocidade inicial v calculado via Eq. (3), além do ângulo θ medido diretamente. Por outro lado, a Eq. (2) prescinde apenas de grandezas que medimos diretamente.

Esse exemplo é apenas um experimento típico com o sistema foguete-lançador que construímos. No lançamento vertical do foguete com o paraquedas, pode-se encontrar a velocidade inicial, a altura de lançamento e estudar as características do movimento de descenso do foguete (Fig. 16-b). Por exemplo, com a altura máxima e o tempo de descenso, estimamos a velocidade terminal do projétil [4]; daí estimamos as características aerodinâmicas do sistema como o coeficiente de arrasto (usando a massa específica do ar e a área de seção reta do paraquedas.)

Mãos à obra e boa diversão com a "Física do Lançamento de Foguetes"!

Agradecimentos

Os autores são gratos ao Ministério da Educação do Governo Federal do Brasil (edital PROBEXT 2014 MEC/SESu); à Pró-Reitoria de Extensão da UNIFAL-MG e ao PET-Ciência UNIFAL-MG pelo apoio financeiro.

Notas

¹As Eqs. (1) e (2) são uma simplificação do movimento de um corpo extenso no ar. De fato, o arrasto não aparece computado nessas equações e sua inclusão complica consideravelmente a modelagem matemática do lançamento de foguetes, como mostra a Ref. [3], por exemplo. A Ref. [1] apresenta – além de detalhes sobre a montagem de um foguete PET de ogiva fixa e bases de lançamentos – uma extensa discussão sobre a aerodinâmica do foguete, a relação entre o centro de massa e de pressão, a importância das aletas na estabilidade do voo, a técnica de determinação teórica e experimental da velocidade máxima do foguete. Este trabalho vigoroso combina mecânica (leis de Newton), hidrodinâmica (equações de Bernoulli e da continuidade) e termodinâmica (expansão adiabática de gás ideal) para o estudo do movimento vertical de foguetes PET.

²Admitimos aqui a aproximação de arrasto desprezível. Nesse caso, as equações que descrevem o lançamento vertical (um movimento retilíneo uniformemente variado) garantem que o tempo de subida é igual ao tempo de queda livre e que a velocidade de impacto com o solo é a mesma da de lançamento: 20 m/s ou 72 km/h.

³No evento de extensão "Foguetes na Fazenda!" descrito na Ref. [5].

⁴O uso das Eqs. (1) e (2) pressupõe que estamos desprezando o arrasto do ar. Isso se mostra uma boa aproximação depois que se toma o cuidado de produzir os foguetes PET com a qualidade aerodinâmica garantida pelo roteiro da Ref. [1]. Os estudos experimentais que permitiram essas conclusões estão sendo preparados para publicação. De qualquer forma, o tratamento matemático do lançamento com arrasto é abordado na Ref. [3].

⁵Usa-se, para isso, a bomba de encher pneu de bicicleta, acoplada ao bico da base da Fig. 7-c.

⁶A Eq. (3) é apenas uma outra forma de escrever a Eq. (1).

Referências

- [1] J.A. Souza, Física na Escola **8**(2), 4 (2007).
- [2] F. Ramalho Jr., N.G. Ferraro e P.A.T. Soares, *Os Fundamentos da Física: v. 1 – Ensino Médio – 1º Ano* (Moderna – Didáticos, São Paulo, 2008).
- [3] A.M. de Queiroz e R.R. Cuzinatto, Revista Brasileira de Iniciação Científica **4**, 82 (2017).
- [4] D. Halliday, R. Resnick e R. Walker, *Fundamentos de Física. Mecânica* (LTC, Rio de Janeiro, 2008).
- [5] R.R. Cuzinatto, A.M. D'Ambrósio, H.F. de Andrade, B.R. Duarte, V.C. Lorencetti e cols., Rev. Ciênc. Ext. **11**, 40 (2015).
- [6] S.A. Maéstri, A.M. D'Ambrósio, H.F. de Andrade, V.C. Lorencetti, M.F. de Toledo Filho e cols., *Caderno de Resumos da III Semana do Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Economia (BICE) / IV Semana do Programa Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (PIPEX) da UNIFAL-MG*, organizado por D.C. Oliveira, E. Zwick, L.L.M. Rodrigues, M.V. Coelho, P.C.L. Silveiro e cols. UNIFAL-MG, Varginha, 2012, p. 22, disponível em <http://www.unifal-mg.edu.br/icsa/files/file/anais2012.pdf>, acesso em 30/01/2017.
- [7] A.M. D'Ambrósio, H.F. de Andrade, V.C. Lorencetti, S.A. Maéstri, M.F. de Toledo Filho e cols., *Estudo da Física no Lançamento de Foguetes. Relatório Sobre o Trabalho do Projeto Multidisciplinar V* (Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2012), disponível em www.unifal-mg.edu.br/foguetes, acesso em 30/01/2017.
- [8] R.D. Martins, A.M. D'Ambrósio, V.C. Lorencetti, S.A. Maéstri, M.F. Toledo Filho e cols., *Rocketeers UNIFAL-MG*, 2014. Canal do YouTube, disponível em https://www.youtube.com/channel/UChJ0EUyaOMni9qa7P_ViuZw, acesso em 30/01/2017.
- [9] R.D. Martins, A.M. D'Ambrósio, V.C. Lorencetti, S.A. Maéstri, M.F. Toledo Filho e cols., *A Física do Lançamento de Foguetes Artesanais* (Pró-Reitoria de Extensão da UNIFAL-MG, Poços de Caldas, 2013), disponível em <http://www.unifal-mg.edu.br/foguetes>, acesso em 30/01/2017.

Recursos de Internet

Vídeo da montagem da base de lançamento: <https://www.youtube.com/watch?v=esKGBbiotxQ>.

Vídeo da construção dos foguetes: <https://www.youtube.com/watch?v=duIKywLHLjM>.