

Foguetes de garrafas pet “flex”: Conceitos, construção, lançamento e procedimentos de segurança



.....
Camila Maria Sitko^{1,2,3,#},
João Batista Garcia Canalle⁴ e
Alberto Alves de Mesquita⁵

¹Universidade Federal do Paraná,
Curitiba, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Sul e
Sudeste do Pará, Pós-Graduação em
Educação em Ciências e Matemática,
Marabá, PA, Brasil.

³Instituto de Estudos Superiores de
Fafe, FaFe, Portugal.

⁴Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁵Universidade do Vale do Paraíba, São
José dos Campos, SP, Brasil.

RESUMO

Este trabalho visou a construção de um manual para a construção de foguete de garrafas PET “flex”, sua base de lançamento e os respectivos procedimentos de segurança em seus lançamentos. Esse tipo de foguete já vem sendo construído e utilizado por escolas devido ao grande incentivo que a OBA (Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica), a MOBFOG (Mostra Brasileira de Foguetes) e os EREAs (Encontros Regionais de Ensino de Astronomia) têm trazido para a educação básica em geral quanto à educação em astronomia, há 22 anos. Entretanto, não há na literatura nenhum manual detalhado que apresente, de forma escrita, o procedimento experimental da construção da base, do foguete “flex” e do lançamento e que leve em conta as questões de segurança necessárias para a prática, principalmente em ambiente escolar. Este artigo oferece comparações com foguetes profissionais e indicações de conceitos científicos que podem ser trabalhados em sala com o uso da atividade. O manual se faz extremamente necessário para auxiliar professores e estudantes que desejem iniciar sua prática com foguetes.

Palavras-chave: foguete de garrafa PET; MOBFOG; lançamento de projéteis; funcionamento de foguetes; procedimentos de segurança

.....

#Autor de correspondência: Camila Maria Sitko. E-mail: camilasitko@yahoo.com.br.

1. Introdução

A Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica, OBA, foi fundada em 1998, pelo engenheiro em aeronáutica Daniel Fonseca Lavouras [1]. Desde sua criação, esse evento de incentivo dos jovens em relação à astronomia e a astronáutica tem crescido a cada ano e tem, cada vez mais, atingido professores e alunos de maneira geral. São diversas as maneiras como a OBA tem incentivado o ensino da astronomia. Uma das formas é pela participação direta na olimpíada, nas atividades disponíveis no site da OBA. Outra forma é por meio da criação, readequação e/ou utilização de atividades paralelas em sala, a partir do que é proposto pela organização da OBA, como preparação para a olimpíada [2]. Além disso, a olimpíada tem servido também como material para pesquisas na área de ensino de astronomia, e de ciências, de maneira geral, como encontrado nas Refs. [3, 4].

O objetivo inicial da olimpíada era a divulgação de astronomia e astronáutica nas escolas. Entretanto, hoje o evento tomou grandes proporções, com uma média de 800.000 participantes nos últimos nove anos, o que levou à idealização e execução de vários eventos auxiliares, dentre eles os Encontros Regionais de Ensino de Astronomia, EREAs, que ocorrem em todo o Brasil e visam a formação de professores para o ensino de astronomia e astronáutica. Os EREAs foram iniciados em 2009, Ano Internacional da Astronomia, e até 2020, 78 deles já foram realizados, capacitando cerca de 7.800 professores

presencialmente.

Neles, são ensinados conceitos básicos de astronomia e astronáutica com aparatos interativos que permitem, por exemplo, que o conhecimento sobre o Sistema Solar seja trabalhado de forma lúdica e didática, contribuindo para que o aluno tenha noções dos conceitos e dimensões apresentadas, que, de outra forma, seriam de difícil assimilação, como proporções dos volumes dos planetas em escala reduzida em relação ao Sol, bem como a proporção do volume do Sol em relação a outras estrelas [5]. Trabalhos com conceitos como as

Com objetivo inicial de divulgação da astronomia e astronáutica nas escolas, a OBA tomou grandes proporções, e hoje atinge uma média de 800.000 participantes, constante nos últimos nove anos

órbitas dos planetas, estações do ano e fases da lua com o uso de aparatos simples como bolas de isopor, barbante, papelão e folhas de papel também são realizados, além de muitas outras atividades práticas. Finalmente, a montagem e o lançamento de foguetes de garrafas PET também são ensinados e realizados, para que os professores tenham condições de realizar atividades dessa natureza com seus alunos de forma prática e segura.

Além disso, ao longo desse tempo, foi sendo moldado também um evento auxiliar à OBA, que é a Mostra Brasileira de Foguetes, MOBFOG, a qual ocorre oficialmente com esse nome desde 2012 [6].

Assim como a OBA, a MOBFOG também tem se tornado um grande símbolo brasileiro no que diz respeito ao incentivo à astronomia e, principalmente, à astronáutica. Essa mostra ocorre de maneira independente em cada escola, em um determinado período do ano. Nela, os alunos precisam construir foguetes de garrafa PET e su-

as bases (os mesmos feitos nos EREA's pelos professores) de acordo com normas estabelecidas pela organização do evento, dependendo de seu nível escolar, e lançá-los. Alunos do sexto ao nono anos devem lançá-los com ar comprimido ou água e ar comprimido e alunos do Ensino Médio devem lançá-los com a mistura de vinagre e bicarbonato de sódio. As equipes campeãs das escolas participantes, desde que com lançamentos acima de 100 m de distância, medidos horizontalmente, são convidadas para participar de um outro evento, a Jornada de Foguetes, que ocorre na cidade de Barra do Pirai, RJ.

No entanto, a competição não é o principal atrativo da mostra. De acordo com resultados de experiências com a atividade, como pode ser visto nas Refs. [2, 3, 7-17], entre inúmeras outras, apenas a atividade

de construção e lançamento de foguetes no ambiente escolar já é motivadora para a aprendizagem e para a interação com o conteúdo científico.

Devido a ser uma atividade na qual o aluno constrói e experimenta, além de estar relacionada à astronomia e à astronáutica, o que por natureza já atrai o interesse da maior parte dos estudantes, a construção de foguetes abre espaço para estudos científicos em outras áreas, como a física, com o estudo de cinemática e mecânica; a química, com o estudo da propulsão a partir de combustíveis químicos; a robótica e as engenharias, com possíveis otimizações do foguete de garrafa PET para equipamentos automatizados, e outras mais, conforme a necessidade e o contexto educativo.

Dessa forma, incentiva-se que cada vez mais professores utilizem tal prática em suas turmas, não apenas de forma a participar da MOBFOG e da OBA, mas também para utilizá-la como artifício para o ensino de conteúdos científicos, como os de física, diretamente relacionados ao funcionamento do foguete. Para tanto, é pertinente que haja um guia que o professor possa utilizar para elaborar suas atividades desde a montagem do experimento, passando por procedimentos de lançamento e segurança - ainda mais tratando-se de ambientes escolares -, até suas potencialidades de uso.

Assim, neste trabalho, é apresentado inicialmente um manual de como

construir e lançar os foguetes “flex” (pois podem voar com pelo menos três tipos de propelentes, sendo eles: ar comprimido, água e ar comprimido e vinagre e bicarbonato de sódio). A construção de tais foguetes é apresentada conforme o regulamento da MOBFOG, da forma como são trabalhados em oficinas dos EREA's, para professores que não tenham tido a oportunidade de participar do encontro, e para estudantes que queiram montar seus próprios foguetes e não tenham tido a oportunidade de fazê-lo na escola (outros foguetes já foram anteriormente descritos [18, 19], mas não são os utilizados na OBA e na MOBFOG). São apresentados

os materiais e os passos necessários para a montagem da base e do foguete, assim como são mostrados os procedimentos corretos de lançamento, apontando também para importantes questões de segurança que devem ser levadas em conta para uma atividade segura com os alunos.

Além disso, é apresentado um rápido paralelo entre o foguete de garrafa PET construído e um foguete profissional, assim como indicados os principais conceitos científicos envolvidos na atividade, a fim de servir como sugestão para o professor de física, e de ciências em geral, que deseje trabalhar essa atividade em sala.

2. MOBFOG, construção e lançamento de foguetes

Na MOBFOG, os procedimentos de montagem e lançamento dos foguetes são especificados de acordo com a escolaridade dos alunos, o que lhes dá caráter “flex”: os alunos de nível 1 (1º ao 3º ano do Ensino Fundamental) devem lançar foguetes por simples impulsão, fazendo uso de canudinhos de refrigerante; os alunos do nível 2 (4º e 5º ano do Ensino Fundamental) devem construir foguetes utilizando uma folha de papel e simples impulsão; os alunos do nível 3 (6º ao 9º ano do Ensino Fundamental) devem construir foguetes de garrafa PET e suas bases de lançamento, e o propelente deve ser ar comprimido ou água e ar pressurizado, utilizando uma bomba manual de pressão; finalmente, os alunos do ní-

vel 4 (Ensino Médio) devem construir seus foguetes utilizando garrafas PET e, nesse nível, o propelente utilizado é o vinagre e o bicarbonato de sódio. Cabe aos participantes otimizarem suas bases e foguetes a fim de atingirem o maior alcance horizontal possível. Diferentemente de outros artigos, não recomendamos, assim como a MOBFOG, que os alunos façam lançamentos verticais de foguetes de garrafas PET, pois seu local de queda é imprevisível e podem ocorrer acidentes sérios.

Uma vez que os alunos dos níveis 3 a 4 devem seguir um padrão de montagem e execução da atividade, para participarem da mostra, faz-se necessária a elaboração de um manual que informe os passos corretos e detalhados para a confecção da base e do foguete e o procedimento de lançamento, seja com ar comprimido ou água e ar, seja com vinagre e bicarbonato de sódio, visando auxiliar alunos e professores na execução da tarefa.

A seguir, são apresentados os materiais necessários para a execução completa da atividade e os passos detalhados da montagem tanto da base quanto do próprio foguete; por fim, é trazido o procedimento correto de lançamento, utilizando tanto ar comprimido ou água e ar comprimido quanto vinagre e bicarbonato de sódio. Também apresentamos as questões de segurança importantes a serem levadas em conta.

2.1. Materiais necessários

Para a construção do foguete e de sua base, é necessária uma série de materiais, os quais estão detalhados no Quadro 1.

2.2. Construção do foguete e sua base de lançamento

A construção do foguete é dividida em duas etapas: a base de lançamento e o foguete. O tempo de construção de cada etapa é em torno de 1 h 30 min, pois é necessário que, além da construção em si, sejam oferecidas explicações a respeito dos conceitos físicos envolvidos, bem como procedimentos de segurança a serem seguidos. Assim, o processo totaliza um período de cerca de 3 h para a construção e mais 1 h para os lançamentos, dependendo do número de foguetes a serem lançados, bases disponíveis e bombas de pressurização.

A construção e o lançamento de foguetes oferecem espaço para a exploração de diversos conceitos científicos em sala, estimulando a interdisciplinaridade

É pertinente haver um guia com a montagem do experimento, procedimentos de lançamento e segurança, e suas potencialidades de uso no ensino

Quadro 1: Materiais necessários para a construção do foguete.

Quantidade	Material
1	Cano marrom soldável de PVC de 20 mm de diâmetro e 25 cm de comprimento
2	Cano marrom soldável de PVC de 20 mm de diâmetro com 20 cm de comprimento
2	Cano marrom soldável de PVC de 20 mm de diâmetro com 10 cm de comprimento
2	Cotovelo marrom soldável de PVC de 20 mm de diâmetro
1	“Tê” marrom soldável de PVC de 20 mm de diâmetro
1	Esquadro com os ângulos de 45°, 45° e 90°
2	Garrafa PET de 2 L de corpo liso (de líquido gaseificado)
Quantidade	Material
2	Balão de látex de festa nº 6,5
1	Pote de vaselina sólida ou outro lubrificante similar
1	Rolo de esparadrapo impermeável de algodão de 5 cm de largura
8	Abraçadeira de nylon de 3,6 mm x 140 mm ou 150 mm de comprimento
1	Folha de polionda
1	Folha de pasta de encadernação
1	Rolo de fita adesiva
1	Cola para cano de PVC
1	Válvula de pneu de bicicleta
1	Retalho de câmara de pneu de bicicleta
2	Caps marrom soldável de PVC de 20 mm de diâmetro
1	6 m de barbante grosso
1	Cano branco soldável de PVC “de esgoto” de 4 cm de diâmetro e 4 cm de comprimento com 3,5 cm
1	Abraçadeira de metal de 1”
1	Bomba de pressão com manômetro (bomba de encher pneu de bicicleta)
1	Tesoura
1	Estilete
1	Chave de boca para o parafuso da abraçadeira de 1”
2	Vergalhões de ferro de construção de 1/16” de diâmetro e 30 cm de comprimento

2.2.1. A base do foguete

Inicialmente, insira a válvula de pneu de bicicleta num cap soldável marrom de 20 mm de diâmetro. Para tanto, faça um furo com um prego (com diâmetro menor do que o da válvula) aquecido no centro do cap. Com a ponta de uma tesoura aumente o diâmetro do furo até ficar igual ou quase igual ao diâmetro da válvula. Obviamente também pode ser usada uma furadeira e uma broca com o mesmo diâmetro da válvula, se houver disponíveis. Em seguida, corte dois quadrados de retalhos de câmara de ar de pneu de bicicleta com cerca de 2 cm de lado; coloque cada um dos retalhos de um lado do cap e insira o bico de pneu, conforme mostra

a Fig. 1, e aperte com um alicate sobre a arruela uma das porcas que são vendidas no kit junto com a válvula (uma das porcas é descartada). Será necessário também um alicate de ponta longa e fina para segurar a cabeça da válvula dentro do cap para que ela não gire quando se aperta a porca.

O diâmetro do cano de lançamento (cano marrom soldável de 20 mm de diâmetro com 25 cm de comprimento, inclinado a 45 graus) é ligeiramente menor do que o diâmetro interno da “boca” das garrafas, isto é, dos foguetes; logo, precisamos eliminar essa folga para podermos pressurizar o foguete. Fitas isolantes, veda roscas ou similares não são adequadas, pois nunca se sabe quantas voltas delas se deve dar, uma

vez que ficam mais finas quanto mais as tensionamos e a espessura depende do fabricante. Utilizamos um procedimento que é bem preciso e suporta pressões de até cerca de 100 PSI¹. Recorte o bico de um dos balões de látex, apenas o bico; o balão precisa ser necessariamente o de número 6,5”, pois, quando maior o número do balão, mais grosso é esse bico e não deve exceder o que precisamos. Insira esse anel de látex no cano de 25 cm a 9,0 cm de distância a partir do Tê, conforme mostra a Fig. 2. Em seguida, passe uma volta de esparadrapo impermeável de algodão



Figura 1 - Em (a), a configuração para a montagem da base. Em (b), a base montada; o ângulo do cano de 25 cm com a horizontal deve ser de 45°.

Figura 2 - Bico do balão inserido no cano de 25 cm.

de 5 cm de largura em cima do anel constituído pelo bico do balão de aniversário. Deixe o anel aproximadamente no centro da “cinta” do esparadrapo. Importante: dê uma volta completa do esparadrapo e *deixe uma sobreposição de 5 a 10 mm apenas, pois mais do que isso pode acarretar que o diâmetro se torne maior do que o diâmetro interno da boca da garrafa.*

Por questões de segurança, a fim de fixar o foguete na base e evitar que este se desprenda antes do esperado devido à pressão, é necessário construir uma trava ou gatilho de lançamento. Para isso, corte os “rabichos” das 8 abraçadeiras de nylon com exatamente 10 cm de comprimento, medidos a partir da cabeça da abraçadeira, mas *excluída* a própria cabeça da abraçadeira. Esse comprimento do “rabicho” da abraçadeira de nylon permitirá que a parte interior da cabeça da abraçadeira de nylon fique apoiada sobre o anel externo da boca da garrafa, conforme ilustra a Fig. 3. Dica: *para fazer o teste de se os encaixes estão corretos, passe vaselina na parte da base que contém o esparadrapo, na região do bico da bexiga, para facilitar a passagem da garrafa.*

As cabeças das abraçadeiras de nylon fixam o foguete no tubo de lançamento (tubo de 25 cm de comprimento), mas elas mesmas precisam estar antes firmemente fixadas junto a esse tubo de lançamento. A fim de fixar as abraçadeiras no tubo de lançamento,

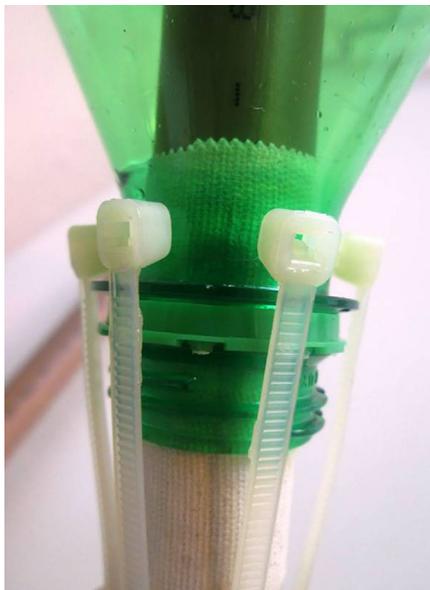


Figura 3 - A parte inferior das cabeças das abraçadeiras de nylon estão apoiadas sobre o anel externo da boca da garrafa.



Figura 4 - Abraçadeiras de nylon cortadas com 10 cm de comprimento. Fita adesiva e braçadeira de metal na base do cano de 25 cm. Na parte superior da figura, encontra-se a braçadeira de metal ampliada.

cole uma fita adesiva em volta do cano de 25 cm rente ao T, com o lado da cola para fora. Em seguida, coloque a abraçadeira de metal de 1” também na base do cano de 25 cm, conforme a Fig. 4.

Em seguida, posicione e pressione as 8 abraçadeiras de nylon na fita adesiva, de maneira equidistante, com a cabeça dos lacres voltadas para dentro, de forma a prender a garrafa, que será inserida na base posteriormente. Para fixar firmemente as abraçadeiras no tubo de lançamento, prendas-as com a abraçadeira de metal. Use para isso a chave de boca, pegando a cabeça do parafuso da abraçadeira de metal. Não use chave de fenda para isso, pois não conseguirá fixar tão firmemente a abraçadeira de metal ao redor do cano de lançamento. Veja a Fig. 5.

Como último passo da construção da base, amarre um barbante de 6 m de comprimento no cano branco soldável de 40 mm de diâmetro e 4 cm de comprimento. Essa peça é o gatilho do foguete, essencial para garantir maior segurança durante o lançamento, dando maior controle no disparo do foguete pelo lançador. Coloque, finalmente, o gatilho ao redor do cano de 25 cm, conforme mostra a Fig. 6.



Figura 5 - Abraçadeiras de nylon cortadas com 10 cm de comprimento. Fita adesiva e braçadeira de metal na base do cano de 25 cm.

2.2.2. O foguete

Para a construção do foguete, serão necessárias duas garrafas PET de 2 L. Se desejar utilizar garrafas de outros tamanhos (como as de 500 mL, 2,5 L, 3 L), não há problemas, desde que as duas tenham o mesmo volume. Para otimizar a aerodinâmica e a construção do foguete, utilize preferencialmente garrafas de corpo liso, isto é, que tenham o mesmo diâmetro ao longo de todo o corpo da garrafa. Se usar garrafas de menor volume, portanto menor altura, terá que reduzir um pouco o comprimento do tubo de lançamento, mas não pode alterar nada na construção do gatilho de lançamento.

É extremamente importante que as garrafas não tenham avarias, a fim de se garantir uma maior segurança, pois caso haja algum tipo de imperfeição, a garrafa pode estourar próximo ao lançador, enquanto este está fazendo a pressurização do foguete, causando acidentes. Além disso, garrafas que continham inicialmente líquido gaseificado são mais resistentes que aquelas que continham líquido sem gás. Portanto, indicamos fortemente o uso do primeiro tipo de garrafa, novamente por questões de segurança.

Corte a parte superior de uma das garrafas, cerca de 12 cm a partir do topo da boca da garrafa. Em seguida, coloque água (cerca de uma xícara pequena) no balão de látex e insira-o no “pescoço” do fragmento (bico) de garrafa, como mostra a Fig. 7a. É importante que o balão fique bem preso na ponta da garrafa, pois o objetivo de colocá-la ali é que o centro de massa do foguete possa ser deslocado para mais perto da ponta do foguete: se este oscilar, o foguete não terá uma trajetória bem definida. Após esse procedimento, encaixe esse sistema na parte inferior da segunda garrafa e fixe com fita adesiva, de acordo com a Fig. 7 [20].

Finalmente, descrevemos a construção das aletas do foguete. Utilize plástico polionda para sua confecção. As linhas estruturais do plástico polionda devem estar perpendiculares ao sentido do deslocamento do foguete, a fim de permanecerem rígidas durante o movimento. Podem ser feitas três ou quatro aletas. Deixamos aqui nossa sugestão.

Vamos construir três aletas e utilizar para tanto a relação $\frac{2D}{3}$ por $\frac{D}{3}$, onde D é o diâmetro da garrafa utilizada, inspirada em outros modelos na literatura [21]. Para descobrir qual é o diâmetro

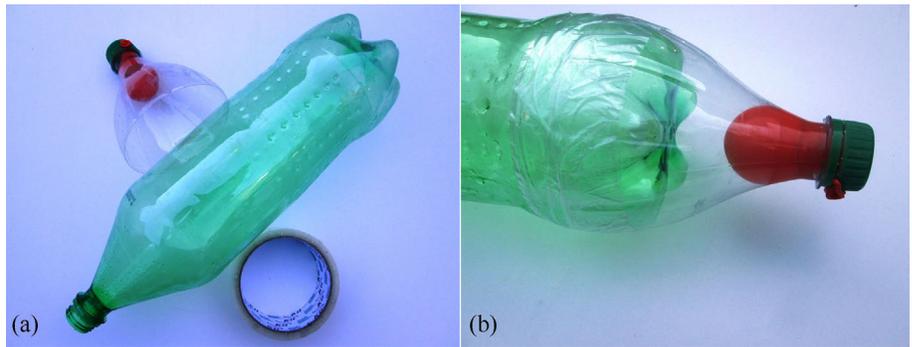


Fig. 7 - Em (a), bexiga com água no fragmento de garrafa. Em (b), o sistema está encaixado na parte inferior da outra garrafa.

da garrafa, utilize um barbante, enrole-o na garrafa e veja o comprimento; depois, é só determinar o valor do diâmetro pela fórmula $C = \pi D$, onde C é o comprimento da circunferência e D é o diâmetro. No caso da garrafa de 2 L, utilize $D = 10$ cm.

Em seguida, desenhe um quadrado de 10 cm de lado e com ele desenhe as medidas necessárias, determinadas pela relação aqui apresentada, conforme mostra a Fig. 8.

A partir do molde desenhado, faça três aletas. Em seguida, corte tiras de plástico de capa de encadernação para fixar as aletas no foguete, com uma altura entre 6 e 6,5 cm, e 1,5 cm de largura. Em seguida, dobre as tiras ao meio, na metade de suas larguras, conforme mostra a Fig. 8. Fixe, com fita adesiva, duas tiras em cada aleta, montando um sistema similar ao da

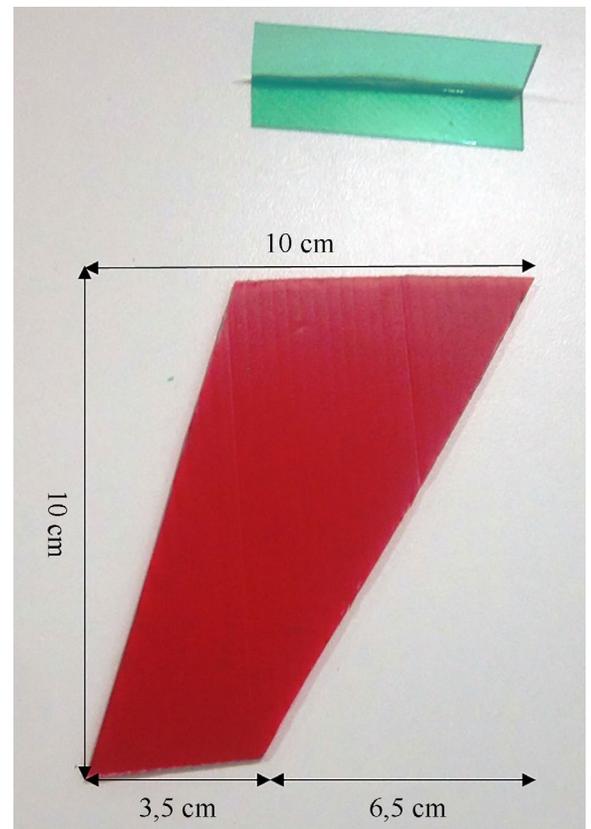


Figura 8 - Esquema das medidas utilizadas na confecção das aletas do foguete.

Fig. 9a. Após isso, fixe as 3 aletas com fita adesiva, separadas em 120 graus uma da outra, o mais próximo possível do foguete, mas ainda na parte lisa da garrafa, de acordo com a Fig. 9b. Sugerimos fixar uma das empenas no foguete e em seguida recortar um retângulo de papel com 10 cm de altura e comprimento igual a 1/3 do perímetro da garrafa. Encoste a aresta de 10 cm desse retângulo de papel à direita da primeira empena e risque a garrafa ao longo da aresta oposta.

Repita o processo à esquerda da primeira empena. Assim as três empenas ficam separadas em 120 graus uma da outra. Com isso, o foguete está finalizado.

2.3. Procedimentos para o lançamento

Os preparativos para o lançamento do foguete “flex” dependem do que for utilizado como propelente. Caso o propelente seja água e ar comprimido, siga os passos a seguir. Chamamos a atenção do leitor para que as orientações aponta-



Figura 6 - Gatilho sobre a base do foguete.

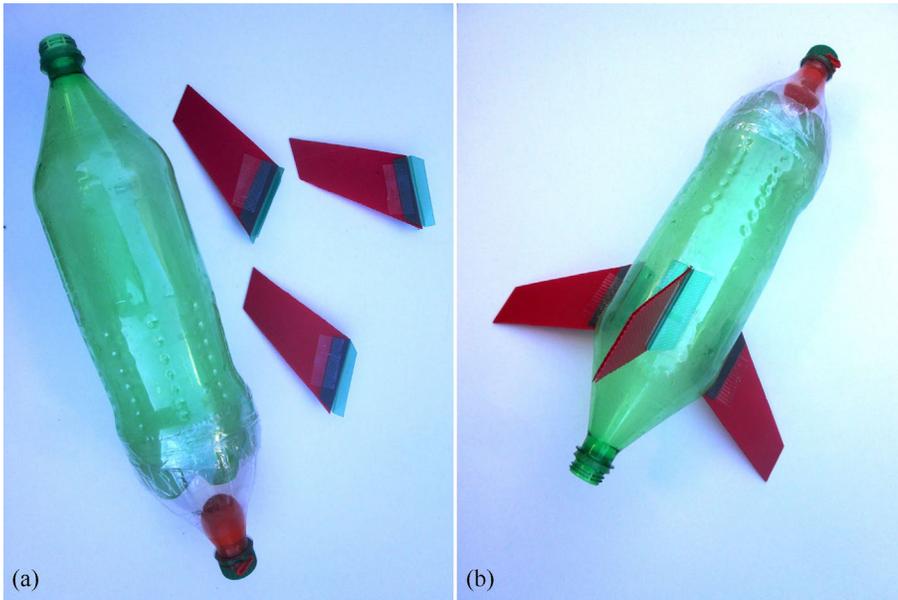


Figura 10 - Esquema de montagem para o lançamento.

Figura 9 - Em (a), aletas de plástico polionda com suportes de capa de encadernação para fixação no foguete. Em (b), aletas já fixadas no foguete.

das neste item sejam obedecidas rigorosamente, a fim de preservar a segurança dos participantes.

- 1º: Deixe o foguete invertido, isto é, com o bico para baixo, e encha aproximadamente 1/3 do volume da garrafa com água. Em seguida, passe vaselina sólida na parede interna da boca do foguete e sobre o esparadrapo que está sobre o bico do balão de látex preso no tubo de lançamento. A vaselina sólida pode ser substituída por outro lubrificante, mas é fundamental que essas partes estejam bem lubrificadas.
- 2º: Com o foguete ainda na posição invertida, encaixe nele a base e a trava com o gatilho.
- 3º: Quando fixar a base no solo, certifique-se de que o barbante do gatilho esteja passando por baixo da base, para que o destravamento não seja comprometido. Deixe o fio levemente esticado ao lado da base, para evitar que a pessoa que irá lançá-lo se molhe com o jato d'água resultante ou sofra acidentes.
- 4º: É extremamente importante que a base esteja muito bem fixada no solo, para que não se mova de modo nenhum quando o barbante do gatilho for puxado. Para fazer essa fixação, use pelo menos dois vergalhões feitos de ferro de construção, conforme os mostrados na Fig. 10. Os vergalhões devem prender os canos de 20 cm, e nunca os de 10 cm, caso contrário a base não fi-

cará estável e haverá maior chance de acidentes.

- 5º: Após o travamento do foguete à base, acople a bomba de pressão ao bico da base.
- 6º: Verifique se não há pessoas na direção do lançamento. Jamais realize lançamentos se houver pessoas na região onde o foguete será lançado, mesmo que estejam distantes.
- 7º: Pressurize o sistema até cerca de 60-80 PSI. Se todas as condições de fabricação, lançamento e segurança tiverem sido tomadas, é possível se chegar a 100 PSI. No entanto, não recomendamos que esse valor seja ultrapassado.
- 8º: Deite a bomba no chão, afaste-se do sistema, faça uma contagem regressiva chamando a atenção de todos que o foguete será lançado e puxe, não violentamente, o barbante para destravar o gatilho e ejetar o foguete.

ATENÇÃO: Caso o foguete tenha sido pressurizado, o gatilho tenha sido destravado e ainda assim o foguete não tenha sido ejetado, cuidado. Isso ocorre em geral devido ao esquecimento de lubrificar a boca do foguete e o esparadrapo que recobre o bico do balão de látex, ou porque foi colocada mais do que uma volta desse esparadrapo. Nesse caso, ou aumente a pressão, ou dê uma leve batida na parte inferior do foguete com um martelo (o mesmo que possivelmente será utilizado para a fixação dos vergalhões no chão) ou um

cabo de vassoura, para disparar o foguete. Nunca coloque a mão no sistema pressurizado, isso pode acarretar cortes nas mãos e braços da pessoa que nele mexer, devido a sua alta velocidade de lançamento.

Para o lançamento utilizando bicarbonato de sódio e vinagre, é necessário o uso de um balão de látex adicional, mas ainda de número 6,5", de preferência. Coloque o balão de látex vazio dentro do foguete, segurando seu bico fora do foguete, e em seguida coloque no balão cerca de 300 mL de vinagre; faça um nó no bico do balão e solte o balão dentro do foguete. Para facilitar esse procedimento, sugerimos colocar o bico do balão na garrafa de vinagre e em seguida colocar o balão dentro do foguete para enchê-lo. Amasse um pouco o foguete durante o processo, a fim de diminuir o volume inicial do foguete e facilitar o enchimento. Aperte a garrafa de vinagre para que o líquido entre dentro do balão.

Após isso, adicione cerca de 50 g de bicarbonato de sódio dentro do foguete. O bicarbonato de sódio pode ser comprado em embalagens de 1 kg em casas de ração para animais ou fertilizantes agrícolas. O vinagre e o bicarbonato de sódio só podem entrar em contato quando o foguete estiver firmemente preso pelo gatilho à sua base.

Para que o balão de látex estoure, é necessário fazer uma pequena modificação na base de lançamento. Para isso, utilize dois palitos de churrasco pontiagudos e um pedaço de esparadrapo de 5 cm de comprimento, aproximada-

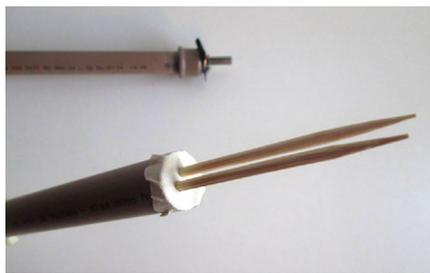


Figura 11 - Adaptação da base de lançamento para o uso de combustíveis químicos.

mente. Faça dois furos no esparadrapo e fixe-o na ponta do cano de 25 cm. Em seguida, encaixe os palitos de churrasco nesses furos, conforme a Fig. 11, fazendo-os encostar no fundo do tubo de lançamento.

Nesse caso, não é utilizada a bomba para pressurização, pois o gás produzido pela reação no interior do foguete provocará o aumento de pressão e posterior ejeção deste. É importante salientar então que ainda assim haverá uma grande pressão no sistema, e todas as medidas de segurança já mencionadas devem ser seguidas.

3. Segurança no lançamento

Embora o lançamento de foguetes de garrafa PET seja lúdico e empolgante, é de fundamental importância saber que ele não pode ser manuseado de qualquer forma e seu uso incorreto pode ocasionar acidentes graves que podem comprometer seriamente a integridade física dos participantes, que na maior parte das vezes são alunos, em ambiente escolar.

Apesar disso, a segurança do lançamento não tem sido apontada com a relevância devida em muitos artigos da área, que até mesmo comentam questões de segurança, mas de maneira superficial [18, 22, 23].

Baseados nisso, destacamos a importância de que a base seja bem fixada ao chão, pois caso isso não seja feito, pode ser ocasionada certa instabilidade no momento do lançamento e fazer com que o foguete seja apontado para um lado imprevisível, podendo assim ocasionar acidentes.

Além disso, é importante que a recomendação de pressão máxima seja seguida, pois de outra maneira pode ocorrer que o foguete tenha uma saída inesperada, acarretando em cortes, devido às suas aletas, nas mãos ou nos braços de quem o está manuseando. Dependendo do tipo de material utilizado nas aletas, os cortes na pele podem

ser profundos.

Além do mais, recomenda-se o lançamento oblíquo, e não o vertical; mesmo quando o lançamento é oblíquo, que é uma configuração que oferece menor risco no lançamento, ainda há a possibilidade de o foguete voltar para trás, devido a erros no posicionamento dos pontos de pressão e de gravidade. Num lançamento vertical, esse risco é bem maior, e ainda que ele consiga partir na vertical, não há qualquer controle no seu retorno. Em caso de alta pressurização, o foguete pode subir muito rápido e alto e, ao retornar, pode causar sérios danos às pessoas e objetos que estiverem no local de sua queda.

Há ainda o risco de o foguete estourar durante a pressurização. Devido a isso, é importante levar em conta a qualidade do material, que pode ser velho ou estar rachado, e sob alta pressão pode estourar nos locais dessas avarias. É muito comum os alunos não levarem isso em consideração. Entretanto, dependendo da pressão e das partes envolvidas, a garrafa pode se tornar uma espécie de granada, espalhando estilhaços para todos os lados, machucando quem estiver por perto.

Há também configurações de base em que ela é pressurizada, que é o caso

ATENÇÃO: Verifique se a base está bem presa ao solo, se não há pessoas na direção do lançamento. Não coloque a mão sobre o sistema pressurizado, e nem ultrapasse a pressão recomendada

da base deste trabalho, em que o limite estrutural do PVC precisa ser observado. Em média ela suporta até 140 PSI, mas não recomendamos que a pressurização ultrapasse os 100 PSI. Além disso, é de suma importância que haja um distanciamento de, no mínimo, 6 m do foguete, durante a pressurização e o lançamento, para que, em caso de falhas ou estouro do sistema base-foguete, os estilhaços não causem danos graves aos participantes da atividade.

Por fim, num lançamento oblíquo, também recomendamos que ninguém esteja no caminho do foguete, nem mesmo nas laterais, para que um eventual erro estrutural no foguete não o faça se desviar e atingir um observador desatento.

Por fim, num lançamento oblíquo, também recomendamos que ninguém esteja no caminho do foguete, nem mesmo nas laterais, para que um eventual erro estrutural no foguete não o faça se desviar e atingir um observador desatento.

Por fim, num lançamento oblíquo, também recomendamos que ninguém esteja no caminho do foguete, nem mesmo nas laterais, para que um eventual erro estrutural no foguete não o faça se desviar e atingir um observador desatento.

4. O foguete profissional e o foguete de garrafa PET

Os foguetes são veículos que transportam carga útil ao espaço, como satélites, e até mesmo pessoas, ou podem ser aparelhos de sondagem. Conforme Nogueira [24], podemos classificá-los quanto ao seu tipo, ou seja, sua finalidade, seu propelente, número de estágios, e se são tripulados ou não.

O foguete profissional e o de garrafa PET apresentam muitas semelhanças

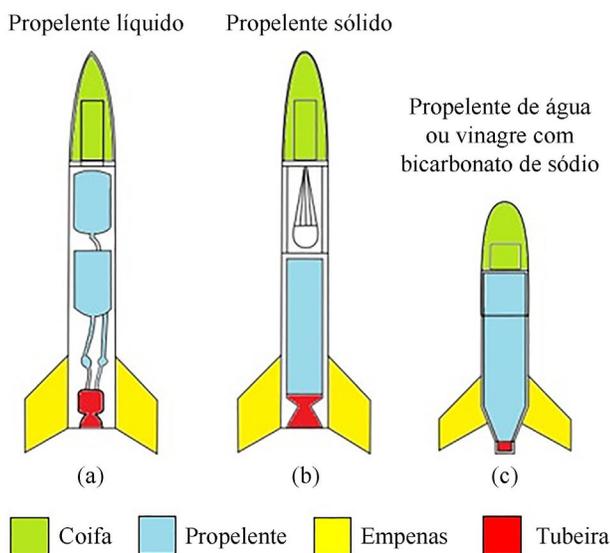


Figura 12 - Comparação entre foguetes a propelente líquido (a); a propelente sólido (b) e de garrafas PET a propelente de água ou vinagre com bicarbonato de sódio (c). As partes dos foguetes são semelhantes tanto para os foguetes profissionais quanto para os de garrafas PET. A cor verde corresponde à coifa, azul é o local do propelente, amarelo são as empenas e vermelho corresponde à tubeira. No caso do foguete de garrafas PET, a tubeira corresponde à boca da garrafa.

estruturais, além de obedecerem aos mesmos princípios físicos. Na Fig. 12, é possível observar uma representação esquemática da estrutura de um foguete, sendo ele profissional ou de PET.

Dentre as similaridades entre os foguetes profissionais e de PET, está o fato de os diferentes designs de ambos serem projetados visando minimizar a resistência do ar, a qual está relacionada com a velocidade que os foguetes atingem.

Além disso, para um foguete se deslocar, é necessário que este tenha capacidade de lançar algo massivo no sentido contrário ao que pretende seguir em sua trajetória. Assim, pode-se perceber que todos os foguetes seguem a terceira lei de Newton, ou seja, o princípio da ação e reação (que será discutido adiante).

Por razões como essas, foguetes de garrafas PET podem ser considerados foguetes autênticos. Apenas o tipo de propelente, velocidade, material de fabricação e o tamanho os diferenciam dos foguetes profissionais.

Além disso, até mesmo o termo “profissional” pode ser desconsiderado como diferença entre eles, já que no Japão, por exemplo, os foguetes de garrafas pet são também utilizados profissionalmente². Para içar e levar fios de transmissão de energia para regiões de difícil acesso, por exemplo, os trabalhadores das companhias elétricas amarraram a ponta do fio ao foguete e o lançam. Assim, um trabalho que levaria um dia inteiro, com o auxílio do foguete pode ser reduzido a cerca de meia hora.

Os foguetes profissionais utilizam a queima de propelente para acelerar, e o tempo de aceleração depende do tempo

de duração do propelente. É por isso que os foguetes de altas velocidades são muito grandes, uma vez que muito propelente (que ocupa um grande espaço) precisa ser queimado. Também é necessário levar em conta o peso da carga que se quer transportar no foguete; quanto maior a carga, maior ainda deve ser o foguete.

A velocidade de escape dos gases após a queima do propelente é fundamental para a aceleração do foguete, e quanto maior a velocidade de saída, mais eficientemente o foguete acelera. No foguete profissional, esse papel de aceleração dos gases é desempenhado pela tubeira, a qual converte um fluido

sônico (quando os gases da queima saem com velocidade por volta da velocidade do som, ou Mach 1 (1.235 km/h) [26] em sua “garganta” para supersônico (velocidade maior que a do som) na sua saída. O propelente, por sua vez, pode ser sólido, líquido ou híbrido. Os propelentes sólidos foram os primeiros a surgir e são os mais utilizados (como a mistura de alumínio em pó, perclorato de amônia, polibutadieno hidroxilado e agentes de cura) por serem de mais simples produção e funcionamento [24]. No entanto, nesse caso, uma vez que a queima foi acionada, não pode ser desligada nem controlada, o que confere ao propelente sólido grandes desvantagens e limites de aplicação. O foguete com propelente líquido (hidrogênio, querosene, oxigênio) surgiu então para suprir essas deficiências.

No entanto, esse modelo é extremamente complexo e falhas variadas podem acontecer com seu uso [24]. Inclusive, essas falhas foram algumas das razões dos grandes acidentes no começo dos lançamentos dos foguetes intercontinentais e espaciais. Um exemplo foi o caso de um foguete abastecido que estava sendo testado no campo de teste do cosmódromo de Baikonur, no acidente que ficou conhecido como a catástrofe de Nedelin, na URSS, em 1960; outro exemplo foi o acidente da Challenger em 1986, no Cabo Canaveral, EUA, dentre outros.

Já o foguete de PET utiliza como propelente água e ar, ou a mistura vinagre e bicarbonato de sódio. No primeiro caso, é a pressurização, através de uma bomba (Fig. 10), utilizando a base do foguete como intermediador, que coloca o propulsor (garrafa com abertura na boca) para funcionar. É o ar pressurizado que irá empurrar para fora o líquido do recipiente e fazê-lo se deslocar. No segundo caso, é a formação de gás carbônico a partir da reação química (Fig. 11), que causa a elevação da pressão no interior da garrafa, provocando a expulsão da mistura e o consequente lançamento do foguete. Assim, quanto maior a pressão no interior do foguete, maior será sua velocidade de lançamento e, consequentemente, maior alcance atingirá. Entretanto, é importante levar em con-

ta que tal pressão, apesar de alta, não pode ser superior à pressão que a garrafa suporta, pois, caso isso ocorra, a garrafa pode explodir.

Com relação à estrutura, o corpo do foguete deve ser o mais leve possível, já que é apenas um veículo de transporte, e o que importa é a sua carga útil, como no caso de veículos lançadores de satélites, ônibus espaciais, sondas etc. Assim, pensando em sua massa, os foguetes espaciais são geralmente feitos de ligas de alumínio. Da mesma maneira, o foguete de garrafa PET também deve

ser feito de um material leve e resistente. A “tubeira” de um foguete de PET não precisa apresentar o formato dos foguetes convencionais, pois a velocidade de

saída do seu propelente não é tão alta quanto a de um foguete profissional.

Disso, e de outras comparações não mencionadas, o que se pode perceber é que ambos os foguetes, profissional e de garrafas PET, são análogos, e tais comparações podem ser factíveis em atividades escolares, de modo a explorar a astronáutica na escola, em disciplinas como ciências, física, química, matemática etc., ao se compararem os elementos e o funcionamento do foguete profissional e o construído pelos alunos.

5. Conceitos científicos e o foguete de garrafa PET

Além de se trabalhar a atividade baseando-se na comparação com o foguete profissional, também é possível trabalhar conteúdos científicos e matemáticos, a partir dos princípios de funcionamento do foguete.

O conceito físico mais comum e talvez um dos mais abordados quando se fala em foguete é o da terceira lei de Newton, que afirma que para toda força de ação, há uma reação de mesma direção e intensidade, mas de sentido contrário [27]. Ou seja, à força dos gases sendo ejetados do foguete, corresponde a força que impulsiona o foguete para cima.

No entanto, além desse, há muitos outros conceitos envolvidos. Alguns deles serão aqui indicados e apresentados rapidamente, de modo a servir como sugestões para professores que desejem trabalhá-los em sala a partir da atividade da construção de foguetes (para sugestões de como se trabalhar alguns desses conceitos, ver Silva [7], Cuzinato

Para toda ação, existe uma reação: a força dos gases sendo ejetados para trás do foguete corresponde à força que o impulsiona para frente

Os foguetes de altas velocidades são grandes precisam queimar de muito propelente (que ocupa muito espaço) para que possam acelerar

e cols. [8], Silva [16], Oliveira [22], Jayaram e cols. [28]).

A segunda lei de Newton também pode ser abordada, já que é necessária uma força que faça o foguete acelerar. O restante de seu movimento segue uma trajetória balística, ou seja, apenas sob o efeito da gravidade e da resistência do ar. Tanto pelo ponto de vista da cinemática, na física, quanto da resolução e interpretação da equação quadrática, em matemática, também é possível explorar grandezas como altura, alcance horizontal e tempo de queda do foguete [8, 29].

Outro assunto fundamental que pode ser abordado é o Princípio da Conservação do Momento Linear, como tratado em Cuzinato e cols. [8]. Um foguete desloca-se devido a expelir para trás de si uma quantidade de massa de propelente a alta velocidade. Pela conservação da quantidade de movimento [29], a quantidade de momento no conjunto inicial foguete+combustível é igual à soma da quantidade final, que são o momento do foguete e o momento da massa de propelente, separadamente.

Além disso, um foguete não é um ponto material. Assim, efeitos aerodinâmicos também são importantes e podem comprometer sua estabilidade, ou seja, sua capacidade de manter a trajetória. Nesse sentido, dois conceitos podem, então, ser considerados: centro de gravidade e centro de pressão. O centro de gravidade é o ponto onde atua a resultante das forças gravitacionais. Isso significa que se um corpo ficar apoiado em cima desse ponto, ele não cairá, embora possa girar em torno dele.

Assim como o centro de gravidade, o centro de pressão é definido como sendo o ponto onde atua a resultante das forças aerodinâmicas. Para que o foguete siga uma trajetória estável, é necessário que o centro de gravidade esteja à frente do centro de pressão, numa distância aproximadamente igual ou ligeiramente maior do que o valor do diâmetro do foguete, a partir da ponta da coifa deste. Se o centro de pressão

estiver no mesmo ponto do centro de gravidade ou se o centro de pressão (CP) estiver mais próximo do bico do foguete do que o centro de gravidade (CG), o foguete dará “cambalhotas”, caindo logo após seu lançamento. Ainda com relação à estabilidade do foguete, é possível trabalhar também com conceitos de sistemas de massa variável, uma vez que o foguete muda de massa conforme ejeta seu propelente e seus diferentes estágios [30].

Quando se trata de aerodinâmica, também é interessante se trabalhar com mecânica dos fluidos, com conceitos como escoamento e forças de arrasto (como é trabalhado em Chang e cols. [31]) e empuxo (como feito em Kagan, Buchholtz e Klein [19], e em Oliveira [22]), que está relacionado à ação da saída do propelente e à reação da subida do foguete.

O propelente, a ignição e a combustão também podem ser abordados, tanto do ponto de vista físico quanto do químico, ao se trabalharem com altas pressões e a reação entre bicarbonato de sódio e vinagre e a produção de gás carbônico (como realizado em Souza & Amauro [11], e em Fonseca, Rodrigues e Fonseca [23]), ou mesmo para fazer discussões a respeito dos propelentes dos foguetes profissionais. Além disso, conteúdos como estados da matéria e mudanças de estado também podem ser trabalhados, como realizado por Silva [9].

E os conteúdos a serem abordados não acabam por aí: podem ser trabalhados numa aula de história, a partir da discussão sobre a Corrida Espacial, e em geografia, tanto na parte de geografia física e locais de lançamento da Terra, quanto em geografia política, no sentido de se discutirem as novas políticas e interesses espaciais internacionais. Enfim, a construção do foguete é multi e interdisciplinar e permite que professores de diversas áreas se comu-

niquem para trabalhar não só os conhecimentos básicos da natureza mas também os temas transversais, as relações interpessoais dos alunos, espírito de equipe, organização e disciplina.

6. Considerações finais

Além de ser a primeira experiência para alunos e professores que desejam participar da MOBFOG, a construção de foguetes de garrafas PET “flex” pode ser utilizada por professores em sala de aula, a fim de abordar conteúdos científicos como os aqui mencionados e também fazer um paralelo com relação ao foguete profissional, a partir de uma atividade completamente diferente das aulas tradicionais, proporcionando aos alunos o uso de várias habilidades que geralmente não se sobressaem na sala de aula, como de cooperação e investigação, o manuseio de equipamentos e a construção de conhecimentos com o

auxílio da prática.

Após a experiência com a construção do foguete aqui apresentado, ficam abertas aos professores e alunos as possibilidades de sua otimização, tanto quanto à base de lançamento como quanto ao próprio foguete. No entanto, deixamos aqui novamente nosso apelo para que sejam considerados os procedimentos de segurança durante as práticas, mesmo que sejam feitas personalizações e otimizações, tanto no foguete quanto na base.

Atividades como essa podem beneficiar o aprendizado de conhecimentos científicos pelos alunos, visto que trazem um caráter motivador, desafiador e lúdico, além de trabalharem habilidades de trabalho em grupo e técnicas específicas da construção e da investigação experimental.

Recebido em: 12 de Outubro de 2020

Aceito em: 7 de Dezembro de 2020

A construção de foguetes permite o trabalho multi e interdisciplinar, estimula relações interpessoais, cooperação, criatividade e habilidades experimentais

Notas

¹PSI \cong 6894,757 Pa = 68,046·10⁻³ atm

²Como é possível ver em Marcotronics [25].

Referências

- [1] J.P.C. Erthal, A.S. Vieira, Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia - RELEA **27**, 35 (2019).
- [2] S.A. Felicetti, I.C. Miorando, M.L. Ohse, Revista Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias **12**, 32 (2017).
- [3] R.S.C. Ferreira, *Oficina de Foguete: Aspectos Interdisciplinares Entre Astronomia, Astronáutica e Física*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Feira de Santana, 65 p., 2016.
- [4] D.E. Peixoto, M.U. Kleinke, Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia - RELEA **22**, 21 (2016).
- [5] OBA, *Downloads OBA e MOBFOG*. Disponível em <http://www.oba.org.br/site/?p=conteudo&idcat=11&pag=conteudo&m=s>, 2020.
- [6] J.B.G. Canalle, *XIX Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica. Relatório OBA*. Disponível em http://www.oba.org.br/sisglob/sisglob_arquivos/Relatorio%20da%20XIX%20OBA%20-%202016.pdf, 2016.
- [7] V.C.L. Silva, *A Utilização de Protótipos de Mini-Foguetes como Estratégia da Promoção da Aprendizagem Significativa das Leis do Movimento de Newton, em Nível Médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2009.
- [8] R.R. Cuzinato, A.M. D'Ambrosio, H.F. Andrade, B.R. Duarte, V.C. Lorencetti, S.A. Maéstri, R.D. Martins, M.F. Toledo Filho, Rev. Ciênc. Ext. **11**, 40 (2015).
- [9] M.A. Silva, *Conceitos de Física por Meio do Lançamento de Foguetes de Garrafa PET: Uma Proposta de Transposição Didática no Ensino Médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2015.
- [10] P.V.T. Souza, N.Q. Amauro, Revista Eixo **6**, 62 (2016a).
- [11] P.V.T. Souza, N.Q. Amauro, in: *Congresso Ibero-Americano em Investigação Qualitativa*, Porto, p. 936, 2016.
- [12] C.T.W. Rosa, A.B. Rosa, A.C. Giacomelli, Ciência e Natura **38**, 535 (2016).
- [13] R.R. Cuzinato, A.M. D'Ambrosio, H.F. de Andrade, A.M. de Queiroz, M.F. de Toledo Filho, B.R. Duarte, V.C. Lorencetti, S.A. Maeistri, R.D. Martins, Física na Escola **15**(1), 51 (2017).
- [14] M.M. Leal, I.C. Sousa, J.S. Silva, P.C.R. Moura, L.S. Meneses, in: *IV Congresso Nacional de Educação*, João Pessoa, 2017.
- [15] R.B. Pinheiro, E.M. Vidal, in: *I Interpolos do MNPEF no Ceará: Criando Estratégias para o Ensino de Física*, Fortaleza, 2017.
- [16] M.L. Silva, *Mostra Brasileira de Foguetes e o Uso de Mapas Mentais Como Ferramenta Avaliativa: Estudo Sobre o Ensino de Física em Cursos Integrados do IFMT – Campus de Alta Floresta*. Tese de Doutorado, Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, 2018.
- [17] F.S. Oliveira, *Lançamentos de Foguetes Como Uma Ferramenta Pedagógica Para o Ensino de Física*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, 2019.
- [18] J.A. Souza, Física na Escola **8**(2), 4 (2007).
- [19] D. Kagan, L. Buchholtz, L. Klein, The Physics Teacher **33**, 150 (1995).
- [20] J.B.G. Canalle, *Construção de Foguetes*. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=JNFAAksb008>, 2014.
- [21] T.V. Millingan, *What Type of Fin Shape is Best?* Disponível em https://www.apogeerockets.com/Rocket_Books_Videos/Pamphlets_Reports/Tech_Pub_16, 1996.
- [22] M.M.S. Oliveira, *Os Aspectos Físicos e Matemáticos do Lançamento do Foguete de Garrafa PET*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Católica de Brasília, 2008.
- [23] M.V.S. Fonseca, I.M.L. Rodrigues, M.B.S. Fonseca, Revista Brasileira de Ensino de Física **40**, e3504 (2018).
- [24] S. Nogueira, *Astronáutica: Ensino Fundamental e Médio - Coleção Explorando o Ensino* (MEC, Brasília, 2009), v. 12, 348 p.
- [25] Marcotronics, *Foguete PET*. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=3q4bKckj5OE&t=1s>, 2020.
- [26] D. Halliday, R. Resnick, R. Walker, *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2008), 8ª ed.
- [27] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica: Mecânica* (Edgard Blücher, São Paulo, 1996), 3ª ed.
- [28] S. Jayaram, L. Boyer, J. George, K. Ravindra, K. Mitchell, Acta Astronautica **66**, 1525 (2010).
- [29] D. Halliday, R. Resnick, R. Walker, *Fundamentos de Física: Mecânica* (LTC, Rio de Janeiro, 2008), 8ª ed.
- [30] M.S. Valvassore, *Modelagem de Um Sistema Físico de Massa Variável (Lançamento de um Projétil)*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Santa Catarina, 2016.
- [31] J.O. Chang, F.L.Q. Costa, I.C. Dutra, G.A.F. Nery, L.H. Nery, E.R.R. Rodrigues, A.M.G. Selin, F.T. Zambello, D.J.P. Silva, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **36**, 529 (2019).