

FOGUETES

Manual do Professor com Atividades de Ciências,
Matemática e Tecnologia



National Aeronautics and Space Administration

Departamento de Recursos Humanos e Educação

Divisão de Educação

Washington, D.C.



Grupo de Trabalho em Educação

NASA Johnson Space Center

Houston, Texas

Esta publicação é de domínio público e não está protegida pela lei de direitos autorais.
Não é necessária a permissão para duplicações.

EG-1996-09-108-HQ

Setembro, 1996

Produto Educacional	
Professores	Pré a 3ª série do Ensino Médio

Universidade do Vale do Paraíba

REITORIA

Reitor

Prof. Dr. Baptista Gargione Filho

Vice-Reitor e Pró-Reitor de Integração Universidade / Sociedade

Prof. Dr. Antônio de Souza Teixeira Júnior

Pró-Reitor de Credenciamento e Recredenciamento de Cursos e de Recredenciamento da Universidade

Prof. João Luiz Teixeira Pinto

Pró-Reitor de Planejamento, Administração e Finanças

Ailton Teixeira

Pró-Reitora de Assuntos Jurídicos

Dr.^a Maria Cristina Goulart Pupio Silva

Pró-Reitora de Cultura e Divulgação

Prof.^a Maria da Fátima Ramia Manfredini

* * * *

INSTITUTO SUPERIOR DE EDUCAÇÃO

Diretora

Prof.^a Maria Valdelis Nunes Pereira

CURSO NORMAL SUPERIOR

Coordenadora

Prof.^a Maria de Fátima Garcia Moreira Daniel



-
- Campus Centro:**
- Praça Cândido Dias Castejón, 116 - Centro
São José dos Campos - SP - CEP 12245-720 - Tel.: (12) 3922-2355
 - Rua Paraibuna, 75 - Centro
São José dos Campos - SP - CEP 12245-020 - Tel.: (12) 3922-2355
- Campus Urbanova:**
- Avenida Shishima Hifumi, 2911 - Urbanova
São José dos Campos - SP - CEP 12244-000 - Tel.: (12) 3947-1000
- Unidade Villa Branca:**
- Estrada Municipal do Limoeiro, 250 - Villa Branca
Jacareí - SP - CEP 12300-000 - Tel.: (12) 3958-4000
- Unidade Aquarius:**
- Rua Dr. Tertuliano Delphim Junior, 181 - Jardim Aquarius
São José dos Campos - SP - CEP 12246-080 - Tel.: (12) 3923-9090

<http://www.univap.br>

Sumário

Como usar este Manual	9
Formato das Atividades	10
Breve História dos Foguetes	11
Conhecimentos Básicos sobre Foguetes	20
Construção de Foguetes na Prática	25
Álbum de Família dos Veículos Lançadores	33
Matriz de Atividades - Padrões Curriculares e Habilidades	43
Atividades	
Motor de Hero de Lata de Refrigerante	45
Carro-Foguete de Corrida	51
3-2-1 Fogo!	60
Corrida de Comprimido Efervescente	64
Foguetes de Papel	68
O Carro de Newton	74
Balão com Estágios	80
Foguete como Meio de Transporte	83
Rastreamento de Altitude	86
Lançador de Foguete de Garrafa	94
Foguete de Garrafa	98
Projeto X-35	102
Aprofundamentos Adicionais	121
Glossário	122
Materiais Educacionais da NASA	124
Sugestões de Leitura	125
Recursos na Web para Educadores	126
Recursos Educacionais da NASA	128
Rede dos Centros de Recursos para Professores da NASA	130
Ficha de Avaliação	133

Universidade do Vale do Paraíba
Ficha Catalográfica

N23f National Aeronautics and Space Administration
Foguetes - Manual do Professor com Atividades de Ciências,
Matemática e Tecnologia / NASA; Traduzido pela Universidade do Vale
do Paraíba. — São José dos Campos: Univap. 2001.
134p.: il.; 21 cm

1. Ciências. 2. Tecnologia. 3. Matemática. I. NASA. II. Universidade
do Vale do Paraíba III. Título

Esta publicação é de domínio público e não está protegida por direitos autorais.
Não é necessária a permissão para cópias.

EG-1996-09-108-HQ
Setembro, 1996



Supervisão Gráfica: Profª Maria da Fátima Ramia Manfredini - Pró-Reitoria de Cultura e Divulgação -
Univap • Tradução e Digitação: ComUnique Assessoria S/C • Revisão: Profª Glória Cardozo Bertti -
(12) 3922-1168 • Designer Gráfico: Spiral Comunicação - (12) 3921-8764 • Designer da Capa: Fábio
Siqueira • Impressão: JAC Gráfica e Editora - (12) 3928-1555 • Publicação: Univap/2001



Agradecimentos

Esta publicação foi desenvolvida pela NASA com a colaboração de centenas de professores da área da região IV do Texas e por educadores do Programa de Serviços Educacionais Aeroespaciais, Oklahoma State University.

Redatores:

Deborah A. Shearer

Gregory L. Vogt, Ed. D.

Programa *Ensinando através do Espaço*

NASA Johnson Space Center

Houston, TX

Editora:

Carla B. Rosenberg

Programa *Ensinando através do Espaço*

Sede da NASA

Washington, DC

Agradecimentos especiais a:

Timothy J. Wickenheiser

Chefe, Filial de Análise Avançada de Missão

NASA Lewis Research Center

Gordon W. Eskridge

Educação Aeroespacial

Oklahoma State University

ROCKETS

A Teacher's Guide with Activities In Science,
Mathematics, and Tecnology



National Aeronautics and Space Administration

Office of Human Resources and Education

Eduaction Division

Washington, D.C.



Education Working Group
NASA Johnson Space Center
Houston, Texas

This publication is in the Public Domain and is not protected by copyright.
Permission is not required for duplication.

EG-1996-09-108-HQ

September 1996

Este Manual do Professor oferece sugestões para diferentes aplicações e exemplificações de como o entendimento das propriedades dos gases permitiram progredir, do buscapé às naves espaciais.

Professores de diferentes disciplinas encontrarão neste Manual indicações muito importantes para ilustrar suas aulas, em diferentes níveis, de aplicações de conceitos da Física e da Química, principalmente.

São oferecidas importantes sugestões para a “decolagem” de alunos, em diferentes níveis de escolaridade, de modo a evoluírem no entendimento, aliando teoria às atividades necessárias à vida em uma nave espacial.

Alimentação, roupas, utilização do espaço, consumo de água, respiração, movimentação, atividades a que estamos acostumados, têm diferente conotação quando no interior de uma nave espacial.

Os alunos encontrarão neste Manual as mais variadas instruções e a seguir são instados a responder perguntas, que os colocam em condições de ambientes totalmente diversos de sua vivência diária, obrigando-os a exercícios mentais de grande inventividade.

São necessárias extrapolações que conduzam a soluções para tornar a vida possível, em alguns metros cúbicos de um compartimento, durante longos intervalos de tempo. Como são enviados sinais para a Terra? Como o satélite detecta um campo magnético? Como é possível sair da nave espacial, em movimento, no espaço, e a ela voltar, com segurança? Como a atividade altera a pressão arterial? Como se prepara um café da manhã em uma nave espacial? Por que são usados alimentos reidratados no Ônibus Espacial?

Estas são algumas perguntas feitas para que os alunos respondam e forneçam sugestões para os professores. São acompanhadas de indicações de equipamentos a serem montados para realizar experimentos esclarecedores de como responder.

É todo um sistema, cuidadosamente montado, para proporcionar o aprendizado, em condições de independência de atuação e de liberdade para solucionar problemas realmente novos.

Baptista Gargione Filho
Reitor da Univap

Como usar este Manual

Os foguetes são a forma mais antiga de veículos autônomos que já existiu. Os primeiros foguetes foram usados há mais de dois mil anos. Percorrendo uma história longa e empolgante, os foguetes evoluíram de simples tubos cheios de pólvora a poderosos veículos capazes de lançar uma espaçonave em direção às galáxias. Poucas experiências podem ser comparadas à emoção e tensão de ver um veículo acionado por foguetes, como o Ônibus Espacial, decolar para o espaço. Sonhos sobre foguetes voando para mundos distantes aguçam a imaginação tanto de crianças quanto de adultos.

Com alguns materiais baratos e simples, você pode elaborar aulas emocionantes e úteis para crianças quando o assunto é foguetes, aulas essas que incorporam Ciências, Matemática e Ensino de Tecnologia. As muitas atividades contidas neste Manual enfatizam o envolvimento prático, a previsão de eventos, a coleta e a interpretação de dados, o trabalho em equipe e a solução de problemas. Mais ainda, o Manual contém as informações de referência sobre a história dos foguetes e os conhecimentos científicos básicos sobre foguetes que tornam seus alunos “cientistas de foguetes”.

O Manual começa com as informações de referência sobre a história da produção de foguetes, os princípios científicos e a parte prática. As seções sobre princípios científicos e a prática enfocam as três Leis do Movimento de Isaac Newton. Essas leis explicam porque os foguetes funcionam e como torná-los mais eficientes.

Depois das seções de referência há uma série de atividades que demonstra os fundamentos científicos da fabricação de foguetes e, ao mesmo tempo, desafia os alunos em atividades de projeto. Em cada uma das atividades você encontrará diagramas de montagem, listas de materiais e ferramentas, e instruções. Uma pequena seção de referência acompanha cada atividade e dá noções sobre os conceitos cobertos e leva de

volta ao material contido na introdução do Manual. Também foram incluídas informações sobre a que área da Ciência a atividade se refere e os padrões de Matemática, idéias para avaliação e aprofundamentos. Veja a página 10 para obter maiores detalhes sobre como as páginas das atividades estão montadas.

Como muitas das atividades e demonstrações aplicam-se a mais de uma área, uma tabela indica e identifica as oportunidades para experiências de aprendizado ainda maiores. O gráfico indica as áreas por título da atividade. Além disso, muitas das atividades dos alunos estimulam a solução de problemas e o aprendizado cooperativo. Por exemplo, os alunos podem usar a solução de problemas para pensar em maneiras de melhorar o desempenho de carros impulsionados por foguetes. O aprendizado cooperativo é uma necessidade das atividades *de Rastreamento de Altitude e Balão com Estágios*.

A duração do tempo envolvido em cada atividade varia de acordo com seu grau de dificuldade e do grau de desenvolvimento dos alunos. Com exceção da atividade *Projeto X-35*, no final do Manual, é possível completar a maioria das atividades em uma ou duas aulas.

Finalmente, o Manual termina com um glossário de termos, lista de leituras sugeridas, recursos educacionais da NASA incluindo recursos eletrônicos, e um questionário de avaliação. Com a intenção de sempre melhorar este Manual em futuras edições, gostaríamos de contar com as suas sugestões através do questionário anexo.

Observação sobre Unidades de Medidas

Ao desenvolver o Manual usamos unidades métricas. Normalmente, nas listas de materiais e ferramentas, são usadas algumas unidades de medida do sistema inglês. Nos Estados Unidos certos itens, como parafusos, são difíceis de encontrar com medidas métricas, por isso foi usado o sistema inglês.



Formato das Atividades

Objetivos da atividade

Descrição do que a atividade faz

Padrões

Idéias para avaliação

Informações de referência

Idéias para discussão

Aprofundamento

Dicas para gerenciamento

O que você precisa

Páginas de instrução para os alunos

3-2-1 FOGO!

1 Enrole o papel ao redor do tubo de PVC e prenda com fita adesiva. A parte da tampa do cilindro de filme fica para baixo!

2 Tampo

3 Prenda as alças com fita adesiva ao seu foguete.

4 Enrole um tubo de papel e cole-o com fita adesiva a parte de cima do seu foguete.

5 Pronto para a vida!

Molde do cone

Os cones podem ser de qualquer tamanho.

Páginas de dados para os alunos

NOMES DOS CONSTRUTORES DO FOGUETE

CONTAGEM REGRESSIVA.

1. Coloque os óculos de segurança.
2. Vire o foguete para baixo e ancha a embalagem de filme com um tubo de água.

FAÇA BOMBA RAPIDAMENTE OS PRÓXIMOS PASSOS!

3. Deixe cair na água 1/2 tableta de antiácido.
4. Prenda bem a tampa.
5. Coloque o foguete em pé sobre uma plataforma de lançamento.
6. Fique a distância.

DECOLAGEM!

Indique três modos de melhorar seu foguete:

1. _____
2. _____
3. _____



Breve História dos Foguetes

Os foguetes atuais são resultado memoráveis da engenhosidade humana que têm suas raízes na Ciência e na Tecnologia do passado. Eles são rebentos naturais de literalmente milhares de anos de experimentação e pesquisa sobre foguetes e propulsão por foguetes.

Um dos primeiros dispositivos a aplicar com sucesso os princípios essenciais do voo por foguete foi um pássaro de madeira. Os escritos de Aulus Gellius, um romano, contam a história de um grego chamado Arquitas que morou na cidade de Tarentum, hoje parte do sul da Itália. Em algum ponto do ano 400 A.C., Arquitas encantava e alegrava os cidadãos de Tarentum fazendo um pombo de madeira voar. O escape de vapor impulsionava o pombo para frente, suspenso por fios de arame. O pombo usava o princípio da ação e reação, que só foi estabelecido como lei científica no século XVII.



Mecanismo inventado por Hero.

Cerca de trezentos anos depois do voo do pombo, um outro grego, Hero de Alexandria, inventou um dispositivo parecido com foguete semelhante ao pombo chamado de aeolipile, ou molinete de Hero. Esse dispositivo, também, usava o vapor como gás propulsor. Hero montou uma esfera no alto de uma chaleira. O fogo sob a chaleira transformava a água dentro da chaleira em vapor, e o gás percorria tubos até a esfera. Dois tubos em forma de “L”, colocados em lados opostos da esfera, permitiam que o gás escapasse, e, fazendo isso, davam à esfera o movimento giratório.

Não se sabe exatamente quando os primeiros foguetes de verdade apareceram. Há histórias de dispositivos parecidos com foguetes permeando esporadicamente relatos históricos de várias culturas. Talvez os primeiros verdadeiros foguetes tenham aparecido por acidente. Há relatos contando que, no século I D.C., os chineses possuíam uma forma simples de pó para armas feito com salitre (nitrato de potássio), enxofre e pó de carvão. Usavam esse pó principalmente para fogos de artifício em celebrações religiosas e em outras festividades. Para criar explosões, durante os festivais religiosos, eles enchiam tubos de bambu com essa mistura e faziam com que pegasse fogo. Talvez algum desses tubos tenha falhado e, ao invés de explodir, tenha subido, impulsionado pelos gases e faíscas produzidas pela queima da pólvora.

Os chineses começaram seus experimentos com os tubos cheios de pólvora. Em algum momento, prenderam os tubos de bambu a flechas e lançaram-nas com arcos. Logo descobriram que esses tubos de pólvora poderiam lançar-se a si mesmos com a força produzida pelo gás que escapava. Nascia o verdadeiro foguete.

A data registrada como da primeira vez em que um foguete foi usado é 1232. Nessa época, chineses e mongóis estavam em guerra. Durante a batalha de Kai-Keng, os chineses expulsaram os mongóis com uma barricada de “flechas de fogo voador”. Essas flechas de fogo eram uma forma simples de foguete a propulsão

sólida. Um tubo, tampado em uma extremidade, continha a pólvora. A outra extremidade era deixada aberta e o tubo era preso a uma longa vara. Quando a pólvora era acendida, a queima rápida da pólvora fazia o fogo liberar fumaça, e o gás escapava para fora produzindo um impulso. A vareta era usada apenas como sistema de direcionamento que mantinha o foguete no alvo ao voar pelo ar. A eficiência dessas flechas de fogo como armas de destruição para guerra não é clara, mas seus efeitos psicológicos sobre os mongóis devem ter sido formidáveis.



Flechas de fogo dos chineses.

Depois da batalha de Kai-Keng, os mongóis fabricaram seus próprios foguetes e foram os responsáveis pela disseminação da técnica dos foguetes pela Europa. Muitos registros descrevem experimentos com foguetes durante os séculos XIII a XV. Na Inglaterra, um monge chamado Roger Bacon trabalhou em formas mais aprimoradas de pólvora que aumentavam consideravelmente o alcance dos foguetes. Na França, Jean Froissart conseguiu mais precisão nos vôos lançando foguetes através de tubos. A idéia de Froissart foi a precursora da bazuca moderna. Joanes de Fontana, na Itália, projetou um torpedo impulsionado por foguete que corria na superfície para incendiar navios inimigos.

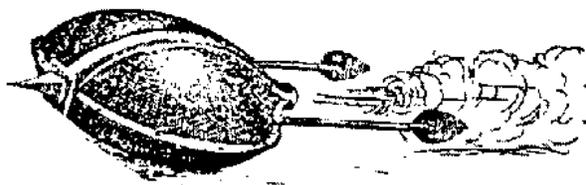
Em meados do século XVI, os foguetes passaram por uma época de desuso, como arma de guerra, embora ainda fossem usados em exibições de fogos de artifício. Um fabricante de



Soldado chinês lança uma flecha de fogo.

fogos de artifício alemão, Johann Schmidlap, inventou o “foguete de passo”, um veículo com múltiplos estágios, para levantar fogos a alturas maiores. Um foguete maior (primeiro estágio) carregava um foguete menor (segundo estágio). Quando o foguete maior se queimava, o menor continuava a uma altitude mais alta antes de iluminar o céu com suas cinzas brilhantes. A idéia de Schmidlap é o fundamento de todos os foguetes que hoje são lançados ao espaço.

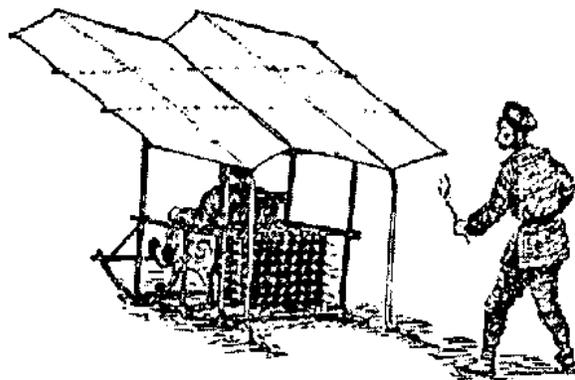
Praticamente todas as utilidades dos foguetes até essa época resumiam-se à guerra ou a exibições pirotécnicas, mas uma antiga lenda chinesa relata o uso de foguetes como meio de transporte.



Torpedo de superfície.

Com a ajuda de alguns assistentes, um oficial chinês menos famoso, chamado Wan-Hu, montou uma cadeira voadora impulsionada por foguete. Eram duas pipas presas a uma cadeira, e havia quarenta e sete foguetes de flecha de fogo também fixados às pipas.

No dia programado para o vôo, Wan-Hu sentou-se na cadeira e deu o comando para que acendessem os foguetes. Quarenta e sete assistentes, todos com tochas, correram para acender os foguetes. Um tremendo estrondo soou no ar, acompanhado por nuvens de fumaça. Quando a fumaça se dissipou, Wan-Hu e sua cadeira haviam desaparecido. Ninguém sabe o que lhe aconteceu, mas, se essa história for verdadeira, Wan-Hu e sua cadeira, provavelmente, não



O lendário oficial chinês Wan Hu prende-se antes da “decolagem”.

sobreviveram à explosão. As flechas de fogo tanto podiam voar como explodir.

A Fabricação de Foguetes torna-se uma Ciência

Durante a segunda metade do século XVII, o grande cientista inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) estabeleceu os fundamentos científicos para os foguetes modernos. Newton organizou o conhecimento do movimento físico em três leis científicas. As leis explicam como os foguetes funcionam e porque são capazes de funcionar no vácuo do espaço sideral. (veja *Conhecimentos Básicos sobre Foguetes* para obter maiores informações sobre as Três Leis do Movimento de Newton, com início na página 20).

As leis de Newton logo começaram a ter um impacto prático no projeto dos foguetes. Por volta de 1720, um professor holandês, Willem Gravesande, construiu carros em miniatura propulsados por jatos de vapor. Experiências com foguetes na Alemanha e na Rússia começaram a usar foguetes com massa acima de 45 quilogramas. Alguns desses foguetes eram tão potentes que as chamas de escape faziam buracos profundos no chão antes da decolagem.

Durante o final do século XVIII e início do século XIX, os foguetes experimentaram um breve renascimento como arma de guerra. O sucesso das barricadas de foguetes feitas pelos índios americanos contra os ingleses em 1792 e, novamente, em 1799, chamaram a atenção do especialista em artilharia, Coronel William Congreve. Congreve começou a projetar foguetes para serem usados pelo exército inglês.

Os foguetes de Congreve tiveram um grande sucesso nas batalhas. Usados pelos navios britânicos para tomar o forte McHerny na guerra de 1812, eles inspiraram Francis Scott Key a escrever "O Brilho Vermelho dos Foguetes" em seu poema que mais tarde se tornou *The Star-Spangled Banner*.

Mesmo com o trabalho de Congreve, a precisão dos foguetes ainda não tinha melhorado muito em relação aos primeiros foguetes. A natureza devastadora dos foguetes de guerra não estava relacionada à sua precisão de alvo ou à potência, mas à sua quantidade. Durante um ataque típico, milhares de foguetes podiam ser ati-

rados ao inimigo. No mundo todo, os pesquisadores de foguetes tentaram melhorar sua pontaria. Um inglês, William Hale, desenvolveu uma técnica chamada estabilização de giro em parafuso. De acordo com esse método, os gases de exaustão, barrados por pequenos pás na parte inferior do foguete, faziam com que ele rodasse de um modo mais parecido com o comportamento de uma bala em vôo. Muitos foguetes, ainda hoje, usam variações desse princípio.

O uso de foguetes continuou a ter sucesso nas batalhas por todo o continente europeu. Entretanto, na guerra com a Prússia, as brigadas de foguetes da Áustria tiveram de enfrentar novos projetos de peças de artilharia. Canhões de retrocarga¹ com canos de rifles e ogivas de combate eram armas muito mais poderosas do que os melhores foguetes. Mais uma vez, os exércitos relegaram os foguetes para uso em tempos de paz.

Aparece o Foguete Moderno

Em 1898, um professor russo, Konstantin Tsiolkovsky (1857-1935), propôs a idéia da exploração do espaço através de foguetes. Num relatório publicado em 1903, Tsiolkovsky sugeriu o uso de combustíveis líquidos para conseguir um alcance mais longo. Tsiolkovsky afirmou que somente a velocidade de exaustão dos gases limitava a velocidade e o alcance de um foguete. Por suas idéias, pesquisa cuidadosa e grande visão, Tsiolkovsky foi chamado de pai da astronáutica moderna.

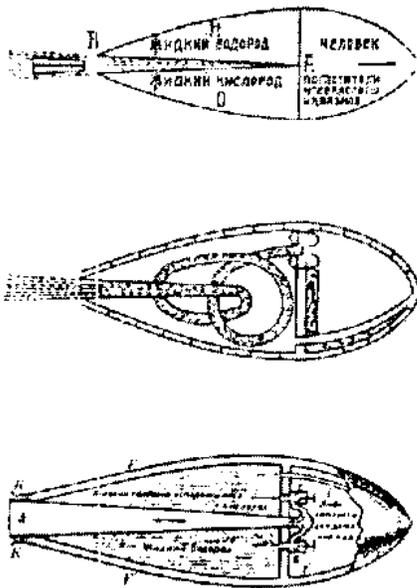
No início do século XX, um americano, Robert H. Goddard (1882-1945), conduziu experimentos físicos com foguetes. Ele interessou-se pelo modo como se poderia atingir altitudes maiores do que eram possíveis com balões mais leves que o ar. Ele publicou um panfleto em 1919 intitulado *Um Método para Chegar a Grandes Altitudes*. Hoje, damos a essa análise matemática o nome de foguete de sonda meteorológica.

Nesse panfleto, Goddard chegou a várias conclusões importantes para o desenvolvimento dos foguetes. Através de seus testes, ele afirmou que um foguete consegue funcionar com maior eficiência no vácuo do que no ar.

¹ N. T.: de carregamento pela culatra.



Naquele tempo, a maioria das pessoas acreditava, erroneamente, que a presença do ar era necessária para o foguete provocar uma força contrária. Um editorial do jornal *New York Times* daquele dia zombou da ausência, no trabalho de Goddard, da “física básica derramada diariamente nas salas de aula do colegial.” Goddard também afirmou que os foguetes de múltiplos estágios ou de passo seriam a resposta para que se conseguisse atingir maiores altitudes e essa seria a única maneira de se atingir a velocidade necessária para sair da área da força de gravidade da Terra.



Projetos de Foguete de Tsiolkovsky.

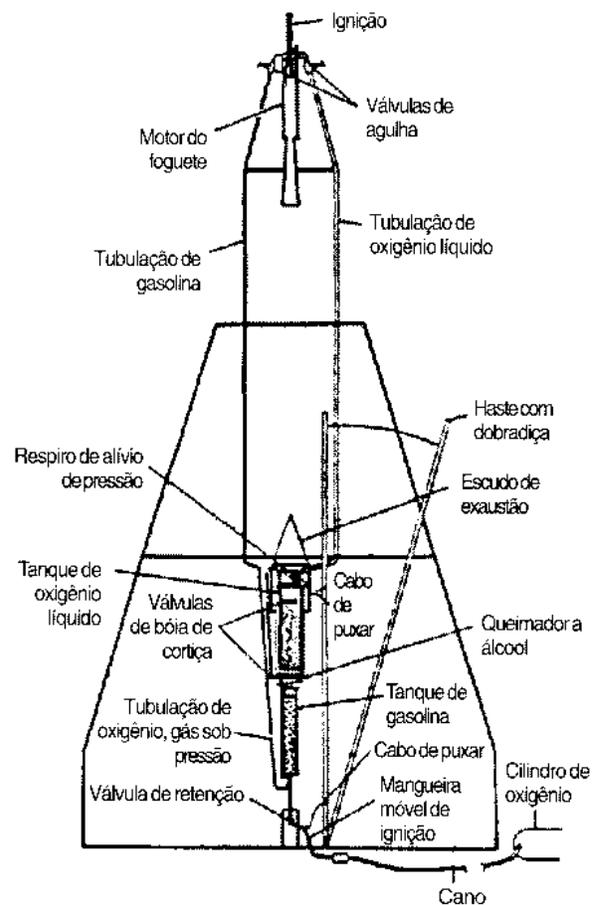
Os primeiros experimentos de Goddard aconteceram com foguetes a combustível sólido. Em 1915, ele começou a experimentar outros tipos de combustíveis sólidos e a medir as velocidades de exaustão dos gases eliminados.

Enquanto trabalhava com foguetes a combustível sólido, Goddard convenceu-se de que seria melhor usar combustível líquido. Ninguém, até então, havia construído, com sucesso, um foguete a combustível líquido. Foi uma tarefa bem mais diferente do que construir foguetes movidos a combustível sólido. Seriam necessários agora tanques de combustível e de oxigênio, turbinas e câmaras de combustão. Apesar das dificuldades, Goddard conseguiu o primeiro vôo bem-sucedido com foguete a combustível líquido no dia 16 de março de 1926. Abastecido com oxigênio líquido e gasolina, o foguete voou por apenas dois segundos e meio,

subindo 12,5 metros e aterrissou a 56 metros em uma plantação de repolhos. Para os padrões atuais, o vôo não foi grande coisa, mas, como o primeiro vôo do avião dos irmãos Wright em 1903, o foguete a gasolina de Goddard foi o pioneiro de uma nova era nos vôos de foguetes.

Os experimentos de Goddard com foguetes a combustível líquido continuaram por muitos anos. Seus foguetes foram aumentando de tamanho e voando mais alto. Ele desenvolveu um sistema de controle de vôo e um compartimento de carga para instrumentos científicos. Sistemas de recuperação através de pára-quadras traziam os foguetes e os instrumentos de volta com segurança. Por suas conquistas, Goddard é chamado o pai do foguete moderno.

Um terceiro grande pioneiro do espaço, Hermann Oberth (1894-1989), da Alemanha, publicou um livro, em 1923, sobre as viagens de foguete ao espaço. Seus escritos são importantes. Devido a eles, muitas pequenas associações de cientistas especialistas em foguetes apareceram no mundo todo.



Foguete do Dr. Goddard de 1926.



Na Alemanha, a formação de uma dessas sociedades, a Verein für Raumschiffahrt (Sociedade para Viagens Espaciais), levou os alemães ao desenvolvimento do foguete V-2, usado pelos alemães contra Londres na Segunda Guerra Mundial. Em 1937, engenheiros e cientistas alemães, incluindo Oberth, reuniram-se, em Peenemunde, na costa do mar Báltico. Ali, sob a diretoria de Wernher von Braun, engenheiros e cientistas construíram e lançaram o mais avançado foguete até então.

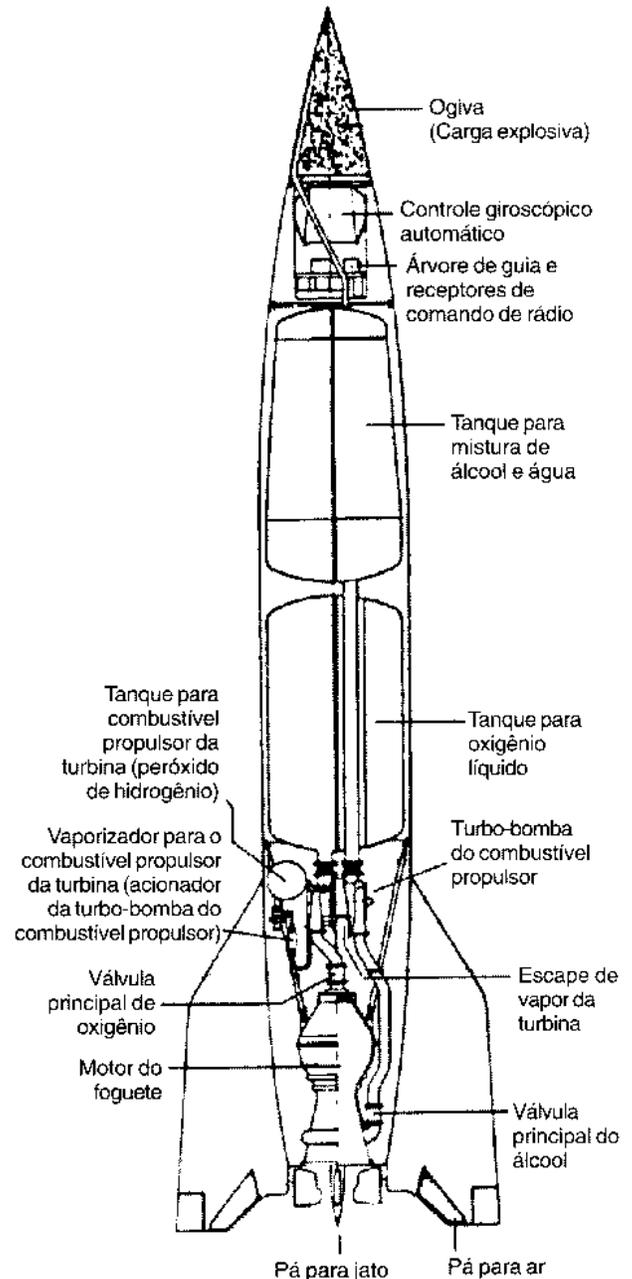


O Dr. Robert H. Goddard ajusta a parte de cima da câmara de combustão de um foguete nessa fotografia tirada em 1940 em Roswell, Novo México.

O foguete V-2 (na Alemanha chamado de A-4) era pequeno em comparação com os foguetes atuais. Ele conseguiu um maior impulso devido a uma mistura de oxigênio líquido e álcool a uma frequência de cerca de uma tonelada a cada sete segundos. Uma vez lançado, o V-2 foi uma arma formidável capaz de devastar quarteirões inteiros de uma cidade.

Felizmente, para Londres e para as forças aliadas, o V-2 apareceu muito tarde na guerra para que pudesse mudar o resultado. Entretanto, no final da Guerra, os cientistas e engenheiros alemães dedicados à pesquisa de foguetes já tinham lançado os planos para mísseis avançados capazes de cruzar o Oceano Atlântico e aterrissar

nos Estados Unidos. Esses mísseis tinham um alcance bem grande, mas uma pequena capacidade para carga.



Míssil alemão V-2 (A-4).

Com a queda da Alemanha, os aliados tomaram posse de foguetes V-2 não utilizados e de seus componentes. Muitos dos cientistas alemães dessa área foram para os Estados Unidos, outros, para a União Soviética. Os cientistas alemães, incluindo Wernher von Braun, ficaram impressionados com os progressos conseguidos por Goddard.

Tanto os Estados Unidos quanto a União Soviética reconheceram o potencial dos foguetes como arma militar e iniciaram uma variedade de programas experimentais. Primeiro, os

Estados Unidos começaram um programa com foguetes de sonda atmosférica de grande altitude, uma das primeiras idéias de Goddard. Mais tarde, desenvolveram uma gama de mísseis balísticos intercontinentais de médio e de longo alcance. Eles tornaram-se o ponto de partida do programa espacial norte-americano. Mísseis como o Redstone, o Atlas e o Titan, um dia, poderiam lançar astronautas ao espaço.

A 4 de outubro de 1957, a União Soviética impressionou o mundo com o lançamento de um satélite artificial à órbita da Terra. Chamado *Sputnik I*, o satélite foi o primeiro sucesso de uma corrida para o espaço entre duas superpotências. Menos de um mês depois, os soviéticos lançaram um satélite carregando uma cadela a bordo, a Laika. Ela sobreviveu no espaço sete dias antes de ser sacrificada antes do término do suprimento de oxigênio.

Alguns meses depois do primeiro *Sputnik*, os Estados Unidos lançaram um satélite próprio. O Exército norte-americano lançou o *Explorer I* em 31 de janeiro de 1958. Em outubro desse ano, os Estados Unidos organizaram formalmente o seu programa espacial, criando a National Aeronautics and Space Administration (NASA). A NASA tornou-se uma agência civil, com o objetivo da exploração pacífica do espaço para o bem de toda a humanidade.

Logo, foguetes lançaram muitas pessoas e equipamentos ao espaço. Astronautas orbitaram a Terra e aterrissaram na Lua. Naves robóticas viajaram aos planetas. O espaço, de repente, abriu-se à exploração e à especulação comercial. Os satélites permitiram aos cientistas investigar o nosso mundo, prever o clima e comunicar-se instantaneamente com o mundo todo. A procura por veículos que pudessem levar uma carga maior ao espaço criou a necessidade de desenvolver uma grande variedade de foguetes potentes e versáteis.

A exploração científica do espaço usando naves-robôs continuou em ritmo acelerado. Tanto a Rússia quanto os Estados Unidos iniciaram programas para a exploração da Lua. O desafio inicial era desenvolver uma tecnologia que permitisse o envio de uma sonda à Lua. Nove meses depois do *Explorer I* os Estados Unidos lançaram a primeira sonda lunar não-

tripulada, mas o veículo lançador, um foguete Atlas com um estágio superior Able, falhou 45 segundos após a decolagem quando a carga se rasgou para longe do foguete. Os Russos tiveram mais sucesso com a Luna 1, que voou próxima à Lua em janeiro de 1959. Mais tarde, nesse mesmo ano, o programa Luna colocou uma sonda na Lua, tirando as primeiras fotografias do lado escuro. Entre 1958 e 1960, os Estados Unidos enviaram uma série de missões, as sondas lunares *Pioneer*, para fotografar e obter dados científicos sobre a Lua. Essas sondas não tiveram sucesso, na sua maioria, devido a falhas nos veículos de lançamento. Somente uma das oito sondas conseguiu cumprir sua missão à Lua, embora várias sondas, posicionadas entre a Lua e a Terra, tenham fornecido importantes informações científicas sobre o número e a extensão dos anéis de radiação ao redor da Terra. Os Estados Unidos pareciam estar bem atrás da União Soviética na corrida espacial.

A cada lançamento, os vôos tripulados ficavam mais perto de tornarem-se realidade. Em abril de 1961, um russo chamado Yuri Gagarin tornou-se o primeiro homem a permanecer na órbita da Terra. Menos de um mês depois, os Estados Unidos lançaram o primeiro norte-americano ao espaço, Allan Shepard. O vôo foi uma subida suborbital, e o retorno imediato à Terra. O foguete Redstone não tinha potência suficiente para colocar a cápsula *Mercury* em órbita. O vôo durou apenas pouco mais de 15 minutos e chegou a uma altitude de 187 quilômetros. Allan Shepard experimentou cerca de 5 minutos de microgravidade antes de voltar à Terra, retorno no qual sentiu forças doze vezes maiores do que a força da gravidade. Vinte dias depois, embora ainda tecnicamente atrás da União Soviética, o presidente John Kennedy anunciou o objetivo de colocar um homem na Lua até o final da década.

Em fevereiro de 1962, John Glenn tornou-se o primeiro homem a orbitar a Terra em uma pequena cápsula que só tinha lugar para ficar sentado. Lançado por um foguete Atlas mais potente, John Glenn ficou em órbita por quatro horas e cinquenta minutos antes de descer ao Oceano Atlântico. O programa *Mercury* teve um total de seis lançamentos: dois suborbitais e quatro orbitais. Esses lançamentos demonstraram a capacidade de os Estados Unidos enviarem



homens à órbita da Terra, permitiram a tripulação trabalhar no espaço, operar a nave e fazer observações científicas.

Os Estados Unidos iniciaram, então, um programa intenso, não-tripulado, visando dar apoio à aterrissagem do homem na Lua. Três projetos separados coletaram informações sobre locais de aterrissagem e outros dados sobre a superfície da Lua e o ambiente ao seu redor. O primeiro foi a série *Ranger*, a primeira tentativa dos Estados Unidos para tirar fotos de perto da Lua. A nave tirou várias fotos em preto e branco da Lua à medida que descia e se chocava com a superfície lunar. Embora a série *Ranger* tenha fornecido muitos dados detalhados, os planejadores da futura missão Apollo queriam dados mais abrangentes.



Fotografia bem próxima do solo da Lua tirada pela nave *Ranger* 9 momentos antes do impacto. O pequeno círculo à esquerda é o local de impacto.

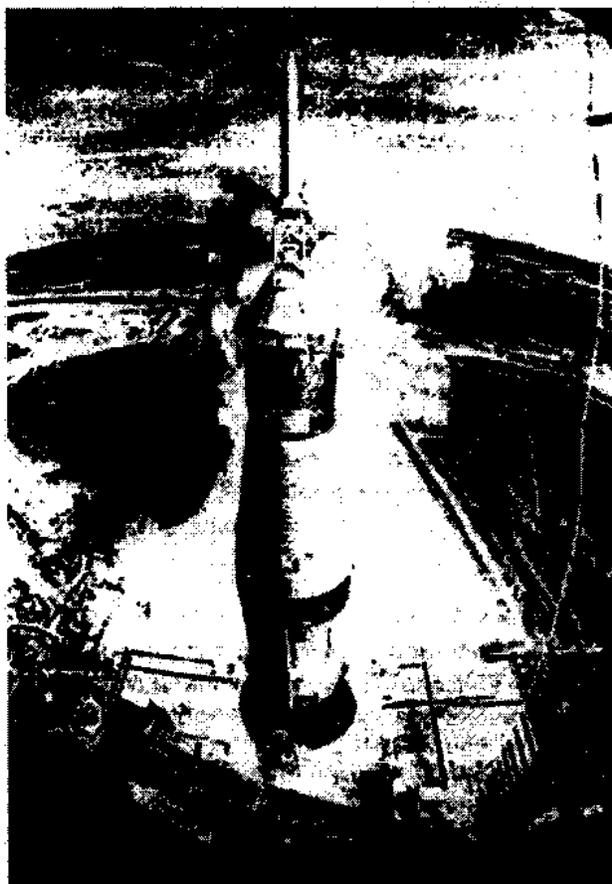
Os dois programas lunares finais foram projetados para trabalharem juntos. O *Lunar Orbiter* forneceu um mapa bem minucioso da superfície da Lua. O *Surveyor* forneceu fotografias detalhadas e em cores da superfície da Lua, bem como dados sobre os elementos do sedimento lunar e uma avaliação da capacidade do sedimento agüentar o peso dos módulos de aterrissagem tripulados. Através da análise dos dois conjuntos de dados, os planejadores

foram capazes de identificar locais para a aterrissagem dos módulos tripulados. Entretanto, existia um problema ainda significativo sem solução. A nave *Surveyor* era muito grande para ser lançada pelos foguetes existentes Atlas/Agena, portanto, um novo estágio superior de alta energia, chamado Centauro, foi desenvolvido para substituir o Agena especificamente para essa missão. O estágio superior do Centauro usava combustíveis eficientes de hidrogênio e oxigênio que melhoravam drasticamente seu desempenho, mas a baixa temperatura das grandes altitudes e a sua natureza altamente explosiva apresentavam grandes desafios técnicos. Além disso, eles construíram os tanques do Centauro com aço inoxidável fino para economizar o precioso peso. Era necessário manter a pressão moderada no tanque para que ele não sofresse uma implosão. A construção do foguete estava melhorando a capacidade de os Estados Unidos explorarem a Lua.

A *Gemini* foi a segunda cápsula tripulada a ser desenvolvida pelos Estados Unidos. Foi projetada para levar dois astronautas e foi lançada com o maior veículo de lançamento construído até então, o Titan II. O mandato do presidente Kennedy desviou significativamente a missão *Gemini* de seu objetivo principal de expandir a experiência no espaço, preparando o país para uma aterrissagem tripulada na Lua. Ela abriu caminho para o programa *Apollo*, demonstrando o encontro e acoplamento requeridos para que o módulo lunar pudesse voltar à Terra, a Atividade Extraveicular - EVA [Extraveicular Activity], necessária para a exploração da superfície da Lua e muitos consertos de emergência, e, finalmente, a capacidade para seres humanos sobreviverem e trabalharem durante uma missão lunar de oito dias. O programa *Gemini* lançou dez missões tripuladas em 1965 e 1966; oito vôos encontraram-se e acoplaram com estágios não-tripulados em órbita da Terra e sete realizaram atividades extraveiculares.

O lançamento de homens à Lua requeria veículos de lançamento bem maiores do que os existentes. Para conseguir esse objetivo, os Estados Unidos desenvolveram o foguete Saturno. A cápsula da *Apollo*, ou módulo de comando, permitia uma tripulação

de três astronautas. A cápsula levou os astronautas à órbita ao redor da Lua onde dois astronautas foram transferidos a um módulo lunar e desceram à superfície da Lua. Depois de completar sua missão, a parte superior do módulo lunar voltou à órbita e encontrou-se com a cápsula da *Apollo*. Os astronautas vindos da Lua retornaram novamente ao módulo de comando e um módulo de serviço, com um motor, fez com que voltassem para a Terra. Depois de quatro missões tripuladas, o astronauta da *Apollo 11*, Neil Armstrong tornou-se o primeiro homem a pisar na Lua. Os Estados Unidos voltaram à superfície da Lua mais cinco vezes antes que o programa fosse encerrado. Depois do programa lunar, o programa *Apollo* e o foguete Saturno lançaram o *Skylab*, a primeira estação espacial norte-americana. Uma versão menor do veículo lançador Saturno transportou a tripulação para o primeiro encontro espacial entre os Estados Unidos e a União Soviética, a missão *Apollo-Soyuz*.



Uma visão de lente olho-de-peixe do foguete Saturno 5 no momento exatamente após a ignição.

Durante esse programa lunar tripulado, veículos de lançamento não-tripulados lançaram muitos satélites para investigar nosso planeta,

fazer previsão do tempo e para comunicar-se instantaneamente com lugares diferentes do mundo. Além disso, cientistas começaram a explorar outros planetas. O *Mariner 2* voou com sucesso por Vênus em 1962, tornando-se a primeira sonda a voar por perto de um outro planeta. O programa espacial interplanetário norte-americano decolou, então, com uma fabulosa série de lançamentos bem-sucedidos. O programa já visitou todos os planetas, menos Plutão.

Depois do programa *Apollo*, os Estados Unidos começaram a concentrar-se no desenvolvimento de um sistema de lançamento reutilizável, o Ônibus Espacial. Aceleradores sólidos e três motores principais na nave lançam o Ônibus Espacial. Os foguetes reutilizáveis permanecem no voo pouco mais do que dois minutos e soltam-se em direção ao Oceano Atlântico onde caem segurados por pára-quedas e são resgatados por dois navios. O Ônibus e o tanque externo continuam subindo. Quando os motores principais param de funcionar, o tanque externo se solta do Ônibus, eventualmente, desintegrando-se na atmosfera. Um pequeno acionamento dos dois sistemas de manobras orbitais muda a trajetória para orbitar numa altitude entre 185 e 402 km da Terra. O Ônibus Espacial tem uma capacidade de carga de aproximadamente 25.000 quilogramas, para que os membros da tripulação possam realizar experimentos no ambiente de microgravidade. Os impulsadores do sistema de manobra são acionados para diminuir a velocidade da nave na hora de entrar novamente na atmosfera, o que aquece o escudo de proteção térmica do Ônibus para cerca de 816°C. Na descida final do Ônibus Espacial, ele volta à Terra planando como um avião.

Desde os primórdios do seu descobrimento e experimentação, os foguetes evoluíram de simples dispositivos a pólvora para veículos gigantes capazes de viajar para o espaço, levando astronautas à Lua, lançando satélites para explorar nosso universo e capacitando-nos para realizar experiências científicas a bordo do Ônibus Espacial. Sem dúvida os foguetes abriram o universo à exploração direta pela humanidade. Qual será o papel dos foguetes no futuro?

O objetivo do programa espacial dos Estados Unidos é expandir nossos horizontes com relação ao espaço, e depois abrir as fron-

teiras do espaço para a expansão humana internacional e desenvolvimento comercial. Para que isso aconteça, os foguetes precisam ficar mais viáveis em termos de custo e mais confiáveis como meio de transporte para o espaço.

Equipamentos caros não podem ser jogados fora toda vez que vamos ao espaço. É preciso continuar o esforço para uma maior reutilização, o qual começou durante o programa do Ônibus Espacial. Pode ser que a NASA desenvolva aviões espaciais que decolem de pistas, voem para a órbita e voltem aterrissando nessas mesmas pistas, com operação semelhante à dos aviões.

Para conseguir esse objetivo, estão atualmente em desenvolvimento dois programas. Os programas X-33 e X-34 desenvolverão veículos reutilizáveis, os quais irão diminuir muito os

custos de se ir à órbita. O X-33 será um veículo tripulado capaz de levar carga semelhante à do Ônibus Espacial. O X-34 será um pequeno veículo de lançamento não-tripulado capaz de lançar 905 quilogramas ao espaço e reduzir o custo de lançamento para dois terços do custo atual.

O primeiro passo para a construção de veículos totalmente reutilizáveis já aconteceu. Um projeto chamado Delta Clipper está em fase de teste. O Delta Clipper é um veículo de decolagem vertical e aterrissagem suave. Ele demonstrou capacidade para flutuar no espaço e manobrar sobre a Terra utilizando o mesmo equipamento. O programa usa a tecnologia existente e minimiza os custos operacionais. Foguetes confiáveis e baratos são o segredo para a capacitação de homens e mulheres para realmente lançarem-se ao espaço.



Três conceitos de veículos espaciais reutilizáveis do futuro sendo estudados pela NASA.

Conhecimentos Básicos sobre Foguetes

Um foguete é a forma mais simples de uma câmara contendo um gás sob pressão em seu interior. Uma pequena abertura em uma das extremidades da câmara permite que o gás escape, e, fazendo isso, fornece um empuxo que propulciona o foguete na direção oposta. Um bom exemplo para isso é uma bexiga. O ar dentro da bexiga está comprimido pelas paredes de borracha da bexiga. O ar tende a ir para trás de modo que as forças de dentro e de fora se equilibram. Quando se solta a abertura, o ar escapa por ela e a bexiga é impulsionada em sentido oposto ao do ar.

Quando pensamos em foguetes, raramente pensamos em bexigas. Ao contrário, nossa atenção é desviada para os grandes veículos que carregam satélites para a órbita e naves espaciais à Lua e a outros planetas. Entretanto,

há uma forte semelhança entre eles. A única diferença significativa é o modo como o gás pressurizado é produzido. No caso de foguetes espaciais, o gás é produzido pela queima de combustíveis que podem ser sólidos ou líquidos ou uma combinação dos dois.

Um fato interessante sobre o desenvolvimento histórico dos foguetes é que enquanto foguetes e dispositivos impulsionados por foguetes vêm sendo usados há mais de dois mil anos, somente nos últimos trezentos anos é que os experimentos com foguetes receberam uma fundamentação científica para que se entendesse como

funcionam.

A ciência da construção de foguetes teve início com a publicação de um livro em 1687 do grande cientista inglês Sir Isaac Newton. Seu livro, intitulado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, descrevia os princípios físicos da natureza. Hoje, o trabalho de Newton é conhecido apenas como Principia.

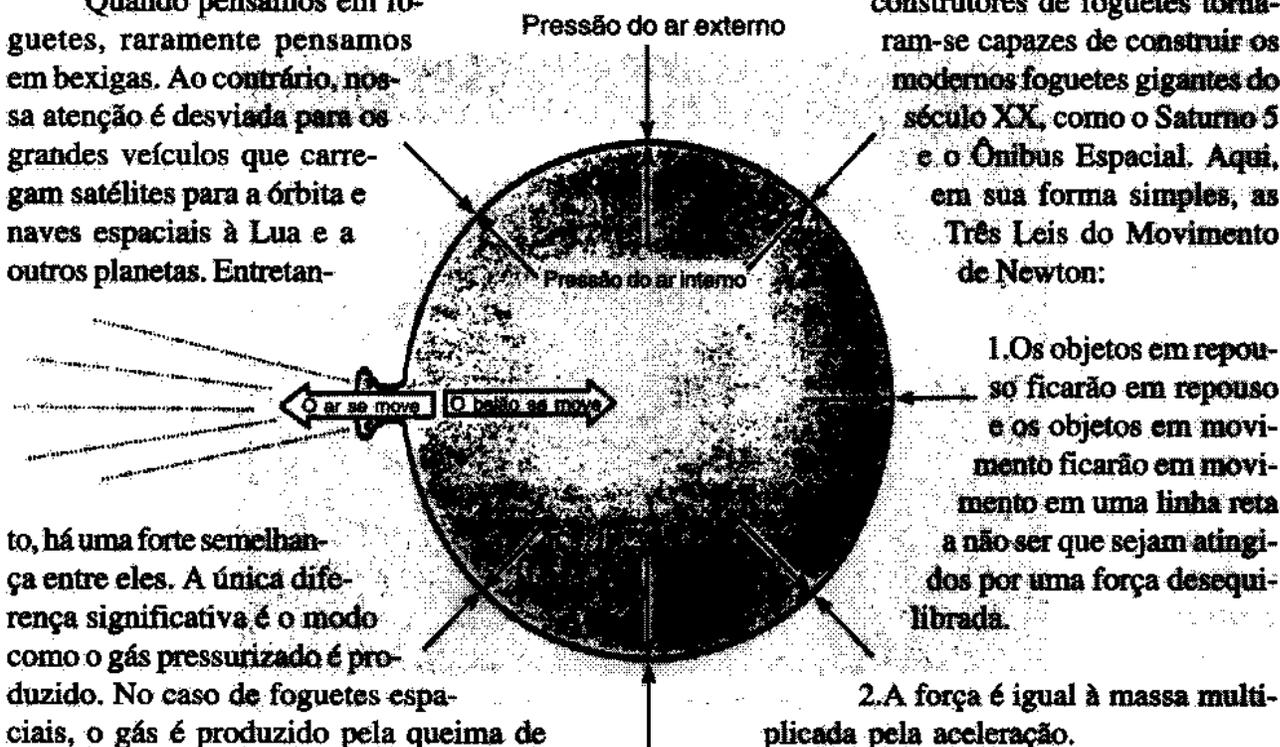
No Principia, Newton estabeleceu três importantes princípios científicos que governam o movimento de todos os objetos, na Terra ou no espaço. Sabendo esses princípios, agora chamados de Leis do Movimento de Newton, os construtores de foguetes tornaram-se capazes de construir os modernos foguetes gigantes do século XX, como o Saturno 5 e o Ônibus Espacial. Aqui, em sua forma simples, as Três Leis do Movimento de Newton:

1. Os objetos em repouso ficarão em repouso e os objetos em movimento ficarão em movimento em uma linha reta a não ser que sejam atingidos por uma força desequilibrada.

2. A força é igual à massa multiplicada pela aceleração.

3. Para qualquer ação sempre há uma reação na mesma direção e em sentido oposto.

Como explicaremos brevemente, as três leis são afirmações realmente simples sobre como as coisas se movem. Mas, com elas, podemos fazer determinações precisas do desempenho de foguetes.



A Primeira Lei de Newton

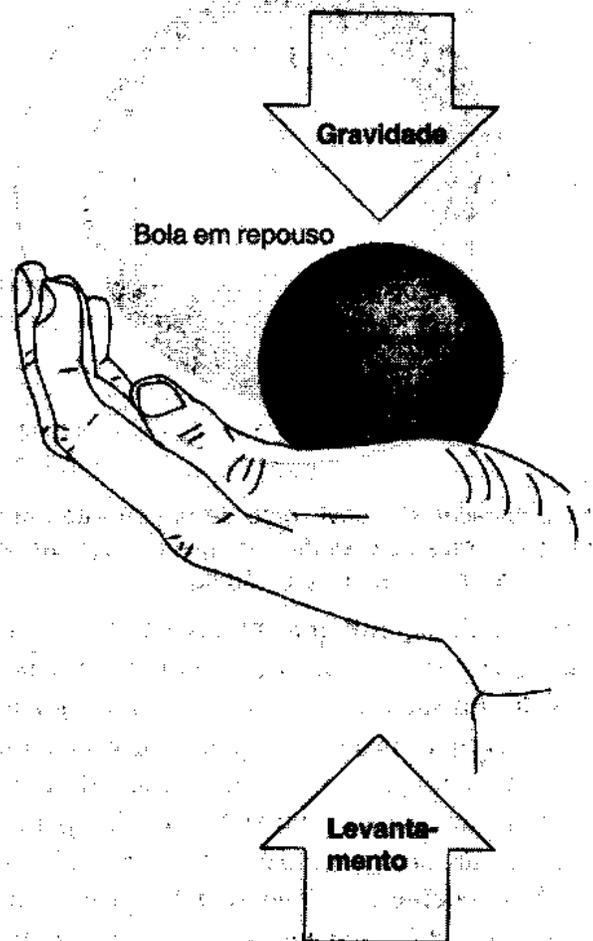
Essa lei do movimento é uma coisa óbvia, mas para saber o que ela significa é preciso entender os termos *repouso*, *movimento* e *força desequilibrada*.

O repouso e o movimento podem ser entendidos como opostos entre si. O repouso é o estado de um objeto quando ele não está mudando de posição em relação aos objetos em sua volta. Se você estiver sentado em uma cadeira, podemos dizer que você está em repouso. Esse termo, entretanto, é relativo. A cadeira em que você está sentado pode ser um dos muitos assentos de um avião que voa a alta velocidade. O importante é lembrar sempre que você não está se movendo *em relação ao que está perto de você*. Se definíssemos repouso como a total ausência de movimento, ele não existiria na natureza. Mesmo sentado em sua cadeira em casa, você ainda estaria em movimento, porque sua cadeira, na realidade, está sobre a superfície de um planeta que está girando na órbita de uma estrela. A estrela está movendo-se em uma galáxia em rotação que, por sua vez, está se movendo pelo universo. Embora sentado "parado" você está se movendo a uma velocidade de centenas de quilômetros por segundo.

O movimento também é um termo relativo. Toda a matéria no universo está em movimento o tempo todo, mas, na primeira lei, movimento significa a mudança de posição em relação aos objetos próximos. Uma bola está em repouso se estiver no gramado parada. A bola está em movimento se estiver rolando. Uma bola rolando muda de posição em relação ao que está em sua volta. Quando você está sentado em uma cadeira num avião, está em repouso, mas se levantar e andar no corredor estará em movimento. Um foguete subindo no lançamento sai de um estado de repouso para um estado de movimento.

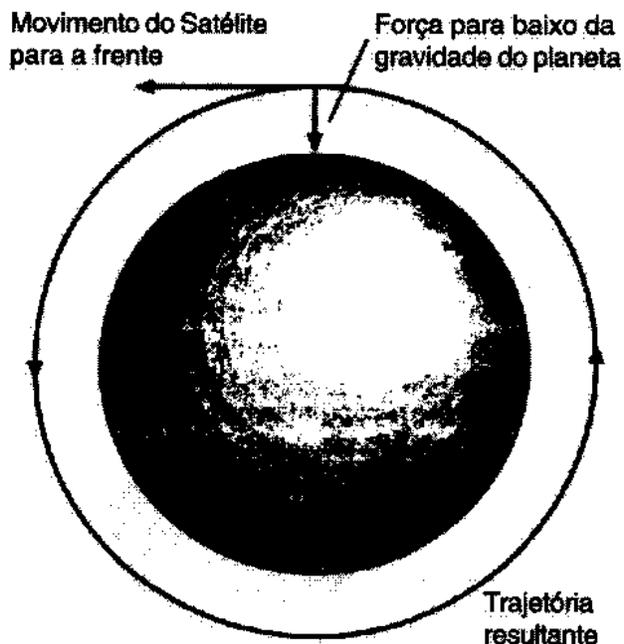
O terceiro termo importante para entender essa lei é a força desequilibrada. Se você segurar uma bola em sua mão e a mantiver parada, a bola estará em repouso. Todo o tempo em que a bola estiver lá ela recebe forças. A força da gravidade está tentando puxá-la para o chão, enquanto que, ao mesmo tempo, sua mão está fazendo força para cima para manter a bola no mesmo lugar. As forças agindo na bola estão

equilibradas. Se deixar a bola cair, ou mover sua mão para cima, as forças ficarão desequilibradas. A bola sai, então, de um estado de repouso para um estado de movimento.



No vôo do foguete, as forças tornam-se equilibradas e desequilibradas todo o tempo. Um foguete na base de lançamento está equilibrado. A superfície da base o puxa para cima enquanto a gravidade o puxa para baixo. Quando os motores são ligados, a força de empuxo do foguete desequilibra as forças e o foguete vai para cima. Mais tarde, quando o foguete ficar sem combustível, a sua velocidade vai diminuindo, ele pára no ponto mais alto de sua trajetória e cai de volta para a Terra.

Objetos no espaço também reagem a forças. Uma nave espacial viajando através do sistema solar está em movimento constante. A nave viajará em linha reta se as forças agindo sobre ela estiverem equilibradas. Isso acontece somente quando a nave está bem longe das forças da gravidade da Terra ou de outros planetas e suas luas. Se a nave se aproximar de um corpo muito grande no espaço, a gravidade desse



A combinação do movimento de um satélite para frente e a força da gravidade do planeta desviam o satélite e o colocam em uma órbita.

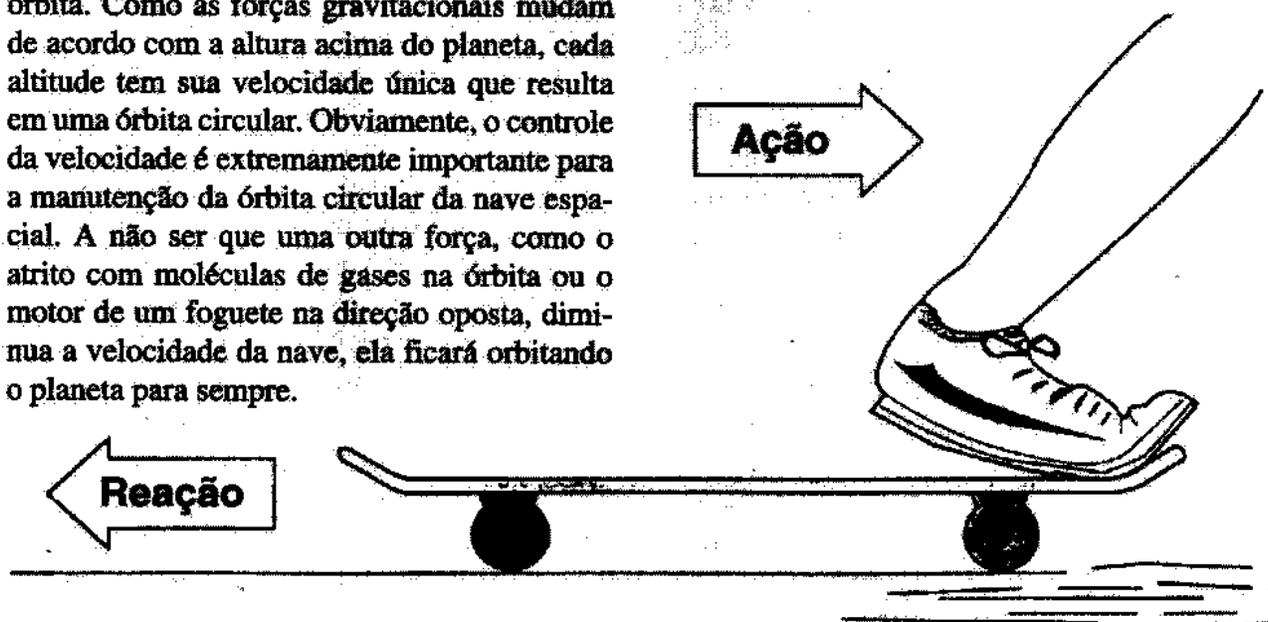
corpo irá desequilibrar as forças e curvar a trajetória da nave. Isso acontece, particularmente, quando um satélite é enviado por um foguete em uma trajetória que é tangente à órbita de um planeta. A força gravitacional desequilibrada faz com que o satélite mude de trajetória para a forma de um arco. O arco é uma combinação da queda do satélite para dentro em direção ao centro do planeta e seu movimento para frente. Quando essas forças chegam a um certo acordo, o formato da trajetória do satélite fica exatamente igual à forma do corpo ao redor do qual está viajando. Conseqüentemente, produz-se uma órbita. Como as forças gravitacionais mudam de acordo com a altura acima do planeta, cada altitude tem sua velocidade única que resulta em uma órbita circular. Obviamente, o controle da velocidade é extremamente importante para a manutenção da órbita circular da nave espacial. A não ser que uma outra força, como o atrito com moléculas de gases na órbita ou o motor de um foguete na direção oposta, diminua a velocidade da nave, ela ficará orbitando o planeta para sempre.

Agora que os três termos principais dessa primeira lei foram explicados, é possível reescrevê-la. Se um objeto, como um foguete, estiver em repouso, será necessária uma força desequilibrada para fazer com que se mova. Se o objeto já estiver em movimento, será necessária uma força para pará-lo ou mudar sua direção de uma trajetória reta, ou mudar sua velocidade.

A Terceira lei de Newton

Por enquanto, deixaremos de lado a segunda lei de Newton e iremos diretamente para a terceira. Essa lei afirma que toda ação tem uma reação na mesma direção e em sentido oposto. Se você alguma vez entrou em um pequeno barco que não tenha sido adequadamente preso no píer, saberá exatamente o que isso significa.

Um foguete pode subir de uma base de lançamento somente quando solta o gás de seu motor. O foguete empurra o gás, e o gás, por sua vez, empurra o foguete. O processo todo é muito semelhante com andar de skate. Imagine que o skate e o skatista estão em repouso (não movimento). O skatista pula para fora do skate. Na terceira lei, esse pulo é chamado de *ação*. O skate responde a essa ação andando uma certa distância no sentido oposto. O movimento oposto do skate é chamado de *reação*. Quando a distância percorrida pelo skatista e o skate for comparadas, parecerá que o skate teve uma reação muito maior do que a ação do skatista. Não é o caso.



A razão pela qual o skate andou mais é que ele tem uma massa menor do que a do skatista. Esse conceito será explicado mais tarde na discussão da Segunda Lei.

Com foguetes, a ação é a liberação do gás para fora do motor. A reação é o movimento do foguete na direção oposta. Para que um foguete possa sair da base de lançamento, a ação, ou empuxo do motor, tem de ser maior do que o peso do foguete. Enquanto está na base, o peso do foguete está equilibrado pela força do chão que o puxa contra ele. Pequena quantidade de empuxo resulta em menos força do chão para mantê-lo em equilíbrio. Somente quando o empuxo é maior do que o peso do foguete é que a força se torna desequilibrada e o foguete levanta. No espaço, quando a força desequilibrada é usada para manter a órbita, mesmo pequenos empuxos causam uma mudança na força desequilibrada e fazem o foguete mudar de velocidade ou de direção.

Uma das perguntas mais comuns sobre foguetes é como eles funcionam no espaço, onde não há ar contra o qual eles possam fazer força. A resposta a essa questão vem da Terceira Lei. Imagine o skate novamente. No chão, o único papel do ar no movimento do skatista e do skate é diminuir sua velocidade. O movimento no ar causa atrito, ou, como os cientistas falam, causa *arrasto*. O ar ao redor impede a ação-reação.

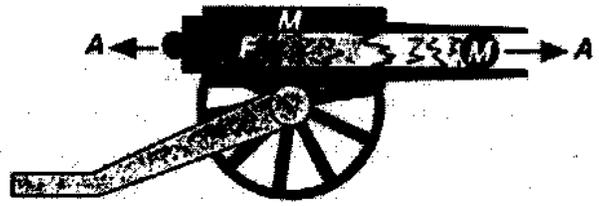
Como resultado, os foguetes, na verdade, funcionam melhor no espaço do que no ar. À medida que o gás de exaustão sai do motor do foguete, ele tem de empurrar o ar que está em volta; isso gasta um pouco da energia do foguete. No espaço, os gases de exaustão podem escapar livremente.

A Segunda Lei de Newton

Essa lei do movimento é essencialmente a afirmação de uma equação matemática. As três partes da equação são massa (m), aceleração (a) e força (f). Usando as letras para simbolizar cada parte, a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$f = ma$$

Lê-se a equação assim: a força é igual à massa vezes a aceleração. Para explicar essa lei, usaremos o velho exemplo do canhão.



Quando um canhão é disparado, uma explosão impulsiona a bala para fora da abertura. Ela voa um ou dois quilômetros até seu alvo. Ao mesmo tempo, o canhão é empurrado para trás cerca de um ou dois metros. Isso é a ação e a reação funcionando (Terceira Lei). A força que age no canhão e na bala é a mesma. O que acontece ao canhão e à bala é determinado pela Segunda Lei. Veja as duas equações abaixo:

$$f = m_{(\text{canhão})} a_{(\text{canhão})}$$

$$f = m_{(\text{bala})} a_{(\text{bala})}$$

A primeira equação se refere ao canhão e a segunda, à bala. Na primeira equação, a massa é o próprio canhão e a aceleração é o movimento do canhão. Na segunda equação, a massa é a bala do canhão e a aceleração é seu movimento. Como a força (pólvora que explode) é a mesma para as duas equações, as equações podem ser combinadas e reescritas da seguinte forma:

$$m_{(\text{canhão})} a_{(\text{canhão})} = m_{(\text{bala})} a_{(\text{bala})}$$

Para manter os dois lados da equação iguais, as acelerações variam de acordo com a massa. Em outras palavras, o canhão tem uma massa maior e uma aceleração menor. A bala do canhão tem uma massa menor e uma aceleração maior.

Aplique esse princípio a um foguete. Substitua a massa da bala de canhão pela massa dos gases que estão sendo expelidos do motor do foguete. Substitua a massa do canhão pela massa do foguete que se move na direção oposta. A força é a pressão criada pela explosão contro-



lada que acontece dentro dos motores do foguete. Essa pressão acelera o gás para um lado e o foguete para o outro.

Acontecem algumas coisas interessantes com os foguetes que não acontecem com o canhão e a bala neste exemplo. Com o canhão e a bala, o empuxo dura apenas um pequeno instante. O empuxo para o foguete continua enquanto os motores estiverem funcionando. Além disso, a massa do foguete muda durante o voo. Sua massa é a soma de todas as suas partes. As partes do foguete incluem motor, tanques de combustíveis, propulsores, carga, sistema de controle e aceleradores. Sem sombra de dúvida, a maior parte da massa é composta pelos combustíveis propulsores. Mas, essa quantidade de massa sempre muda à medida que o motor queima combustível. Isso significa que a massa do foguete está sempre diminuindo durante o voo. Para que o lado esquerdo de nossa equação continue equilibrado com o lado direito, a aceleração do foguete tem de aumentar à medida que sua massa diminui. Por isso é que o foguete inicia sua trajetória mais devagar e depois começa a acelerar mais quando está a caminho do espaço.

A Segunda Lei do Movimento de Newton é especialmente útil quando se projetam foguetes eficientes. Para possibilitar a um foguete a subida para a órbita da Terra, é necessário conseguir uma velocidade em excesso de 28.000

km/hora. Uma velocidade acima de 40.250 km/hora, chamada de velocidade de escape, permite a um foguete deixar a Terra e viajar para o espaço sideral. Manter as velocidades de voo requer que o motor do foguete alcance a maior força de ação possível no menor intervalo de tempo. Em outras palavras, o motor precisa queimar uma grande massa de combustível e empurrar o gás resultante para fora do motor o mais rapidamente possível. As maneiras como se faz isso serão discutidas no próximo capítulo.

A Segunda Lei do Movimento de Newton pode ser reescrita da seguinte forma: quanto maior a massa de combustível do foguete queimada, e quanto maior a velocidade de escape do gás produzido, maior será o empuxo do foguete.

Juntando as Leis do Movimento de Newton

Deve ser exercida uma força desequilibrada para que um foguete suba de uma plataforma de lançamento ou para que uma nave, no espaço, mude de velocidade ou de direção (Primeira Lei). A quantidade de empuxo (força) produzida por um motor de foguete será determinada pela razão pela qual a massa do combustível do foguete queima e a velocidade do gás que escapa do foguete (Segunda Lei). A reação, ou movimento, do foguete é igual e no sentido oposto à ação, ou empuxo, do motor (Terceira Lei).