

# Leis de Newton

## Lições de Mecânica

J. M. B. Lopes dos Santos\*

29 de Setembro de 2021

Departamento de Física e Astronomia,  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
4169-007 Porto

Os três mandamentos da Mecânica Newtoniana.

## 1 Um livro muito importante

Em 1687, Isaac Newton, professor de matemática da Universidade de Cambridge, na cátedra ocupada por Stephen Hawking até à sua recente morte, publicou o que muitos consideram o mais importante livro científico da história da Humanidade: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, ou, como é universalmente conhecido, os *Principia*.

Neste livro, escrito em latim (a primeira tradução para inglês data de 1729), Newton apresentou os resultados da sua investigação sobre movimento, na forma de três leis de aplicação universal a qualquer tipo de movimento, quer na Terra quer no Céu.

Quais são, então, as três leis de Newton? Só é precisa meia página para as escrever.

### Primeira Lei

Na ausência de forças exteriores, um corpo em repouso mantém-se em repouso, e um corpo em movimento mantém o seu estado de movimento, com velocidade constante em direcção, sentido e módulo.

---

\*jlsantos@fc.up.pt

## Segunda Lei

Um corpo actuado por uma força externa,  $\mathbf{F}$ , tem uma aceleração,  $\mathbf{a}$ , na mesma direcção e sentido da força, de módulo proporcional ao módulo da força. A constante de proporcionalidade é a massa do corpo (uma grandeza sempre positiva). Isto é,

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1)$$

## Terceira Lei

Para toda a acção (força) de um corpo  $A$  sobre um corpo  $B$ , existe uma reacção (força) de  $B$  sobre  $A$  oposta (mesmo módulo, mesma direcção e sentido contrário).

Galileu já tinha formulado a primeira lei chamando-lhe **lei da inércia**:

Um corpo não altera o seu estado de movimento a não ser que seja actuado por causas exteriores.

▷ Lei da inércia

Galileu chamou inércia a esta resistência de um corpo à alteração do seu estado de movimento. De acordo com a segunda lei, quanto maior é a massa,  $m$ , mais difícil é alterar o estado de movimento: maior tem que ser a força para a mesma aceleração. A massa Newtoniana quantifica o conceito de inércia de Galileu.

Por que é que estas leis são tão importantes? Porque, complementadas pelo conhecimento das forças que os corpos exercem uns sobre os outros, permitem o cálculo de **qualquer** tipo de movimento.

Os *Principia* incluem também a formulação da lei que rege uma das forças fundamentais da Natureza, a Gravitação Universal. Newton mostrou como as órbitas dos planetas ou dos cometas se podiam deduzir matematicamente das suas três leis de movimento e da lei da Gravitação; explicou as variações da órbita da Lua devido à atracção do Sol; a precessão (variação de orientação) do eixo de rotação da Terra; a periodicidade e variações das marés.

Um dos sucessos mais espectaculares da teoria Newtoniana foi a descoberta do planeta Neptuno em 1846. A órbita de Urano mostrava desvios relativamente aos cálculos da teoria Newtoniana. John Adams e Urbain Le Verrier, de modo independente e quase simultâneo, propuseram que esses desvios se deviam à existência de um planeta até então desconhecido, cuja atracção gravítica causava os desvios da órbita de Urano. Usando a teoria Newtoniana, determinaram a órbita desse planeta. Le Verrier passou os seus cálculos ao director do Observatório de Berlim que, em menos de uma hora, observou pela primeira vez o planeta Neptuno ao telescópio.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

▷ Lei da Gravitação Universal.

### 1.1 Como se demonstram as leis de Newton?

No passado, em tempos em que a ciência gozava de maior prestígio entre os jovens, um “facto cientificamente provado” era considerado irrefutável. Invocar esta qualidade para um facto em disputa era um modo garantido de “matar” uma discussão.



Figura 1: Urbain Le Verrier (1811-1877) e John C. Adams (1819-1892) previram teoricamente a existência do planeta Neptuno, a partir dos desvios da órbita de Urano relativamente às previsões da teoria Newtoniana. O astrónomo George Airy, do Observatório de Greenwich, ignorou as previsões de Adams. Le Galle, em Berlim, seguiu as indicações de Le Verrier e foi o primeiro a observar Neptuno ao telescópio. [?].

Na verdade, não existe nenhuma demonstração ou prova, no sentido matemático, das leis de Newton ou de qualquer outra lei física. Newton não deduziu as suas leis de qualquer observação.

O trabalho científico tem alguma semelhança com o trabalho de um detective. Newton encontrou pistas nas observações astronómicas, nos trabalhos de Galileu e nas suas próprias observações sobre o movimento. Com estas pistas intuiu a forma da leis de movimento e explorou as suas consequências. Por cada previsão confirmada, a sua confiança nas leis que formulou cresceu. Este processo continuou por várias gerações. As leis de Newton são hoje usadas para planificar as viagens das sondas espaciais, para fazer previsões metereológicas, para descrever os movimentos de fluidos, para compreender o comportamento mecânico dos materiais, para prever os movimentos das pontes e outras estruturas, para explicar a forma e movimentos das galáxias, incluindo colisões entre elas, para calcular o movimento das cargas do vento solar no campo magnético da Terra, *etc., etc., etc.*. A lista é interminável: no trabalho em ciência e tecnologia as leis de Newton estão sempre por perto.

Como podemos nós compreender as leis de Newton? Do mesmo modo que o próprio Newton e as várias gerações de físicos que se lhe seguiram: aplicando-as na análise de situações concretas. Esta é a única maneira possível de compreender a mecânica Newtoniana. Aprender Física é como aprender a andar de bicicleta. Só se aprende fazendo. Do mesmo modo que ninguém aprende a andar de bicicleta assistindo a aulas sobre a posição correcta a adoptar e a maneira de dar aos pedais, ninguém aprende mecânica Newtoniana decorando com muito cuidado as suas leis fundamentais. Compreender as leis é saber aplicá-las em situações concretas.

As leis de Newton são também importantes para compreender situações da vida corrente, não apenas as situações controladas de um laboratório. Frequentemente, as nossas intuições imediatas sobre forças e movimentos não estão de acordo com as leis da mecânica Newtoniana. Não vemos corpos manterem-se em movimento inde-

■ Isaac Newton ■



Isaac Newton (1643-1727)

Nascido em 1643, em Woolsthorpe, Inglaterra, Isaac Newton é um dos dois mais sérios candidatos ao título de físico mais influente da história da humanidade. O segundo é Albert Einstein.

Na sua obra mais importante, os *Principia*, Newton não se limitou a apresentar um conjunto completo de leis aplicáveis a qualquer tipo de movimento, terrestre ou celeste. Também deu consistência e conteúdo a uma visão de um Universo regido por leis matemáticas, evoluindo de uma maneira determinada, à semelhança de um mecanismo perfeito.

Embora as ideias de Newton tenham sido modificadas pela Teorias da Relatividade e Gravitação de Einstein e, de um modo mais radical, pela Mecânica Quântica, a gama de fenómenos que podem ser abordados nos termos da teoria Newtoniana é tão vasta, que ela faz parte permanente do corpo de conhecimentos científicos. Ainda hoje, qualquer estudo sério de Física começa, invariavelmente, pela mecânica de Newton.

Além dos trabalhos publicados nos *Principia*, Newton deu contribuições fundamentais em óptica e matemática, sendo considerado, com Leibniz, inventor do cálculo infinitesimal. Descobriu a composição espectral da luz branca e inventou o telescópio reflector.

A sua vida foi marcada por disputas acrimoniosas sobre prioridade nas suas descobertas, com Hooke, Huygens e Leibniz, nas quais alguns procedimentos de Newton foram altamente criticáveis.<sup>a</sup> Faleceu em 1727 e o seu epitáfio dizia:

*Aquele, que por vigor de mente quase divina, primeiro demonstrou os movimentos e figuras dos planetas, os caminhos dos cometas e as marés dos oceanos.*

---

<sup>a</sup>Na disputa com Leibniz, sobre a invenção do Cálculo Infinitesimal, Newton, como Presidente da Royal Society, nomeou uma comissão independente. O próprio Newton (anonimamente) redigiu o respectivo relatório e *um artigo de apreciação crítica sobre o relatório!*

Figura 2: Isaac Newton

finidamente (primeira lei); quem já enfrentou um matulão com o dobro do tamanho tem dificuldade em acreditar que a força que pode exercer sobre nós não é maior que a que podemos exercer sobre ele (terceira lei).

A verdade é que a experiência imediata dos nossos sentidos é muito limitada. Vivemos amarrados pelo peso à superfície da Terra, não sobrevivemos fora de um meio gasoso e os nossos sentidos estão limitados a janelas temporais e espaciais muito estreitas: se olharmos para um relógio, não detectamos o movimento do ponteiro da horas (ou mesmo dos minutos) e qualquer objecto de dimensões inferiores a cerca de 0,1 mm é invisível à vista desarmada. Contudo, mesmo neste contexto limitado, uma observação cuidadosa e uma reflexão crítica sobre o conjunto da nossa experiência quotidiana só encontra uma explicação consistente e coerente no âmbito da mecânica Newtoniana.

## 2 Comentário às Leis de Newton

Se pensarmos que as leis de Newton são o primeiro conjunto de leis universais, aplicáveis ao movimento de todos os corpos, na história da Física, a sua formulação levanta imediatamente várias questões.

Elas falam de massa, força e aceleração. Aceleração sabemos o que é. Depende de valores de distâncias e tempos que sabemos medir com réguas e relógios. Fixado um referencial, podemos, pelo menos em princípio, medir qualquer aceleração. Mas o que é a massa? O que é uma força? Como podemos medi-las de modo independente para que possamos verificar se as leis de Newton são realmente obedecidas no movimento dos corpos?

Por outro lado a primeira lei coloca imediatamente outro problema. Imaginemos por um momento que podemos garantir que um corpo está livre de forças de outros corpos. A primeira lei diz que o seu movimento tem velocidade constante, mas *isso não pode valer em qualquer referencial!* Em que referenciais é que se aplica?

Vamos abordar estas questões brevemente, uma a uma começando pelo conceito de massa.

### 2.1 Conceito de massa Newtoniana

O próprio Newton deu uma definição de massa:

*Massa é a quantidade de matéria que constitui o corpo.*

Esta definição deixa-nos perplexos pela sua aparente circularidade. O que é a quantidade de matéria? Contudo, apesar de parecer à primeira vista apenas um jogo de palavras, a definição de Newton tem algum conteúdo. No mínimo identifica massa como uma grandeza extensiva. Ou seja, a quantidade de matéria de dois tijolos idênticos deve ser o dobro da quantidade de matéria de cada um deles. A respectiva massa dever ser o dobro da massa de cada um.

Deste modo não é difícil comparar massas de corpos da mesma substância. Mas como comparar a massa de uma esfera de ferro com outra de alumínio? O mesmo volume é a mesma quantidade de matéria?

A resposta a esta pergunta vamos encontrá-la na terceira lei de Newton. Se a força de  $A$  em  $B$  é oposta da força de  $B$  sobre  $A$ , de acordo com a terceira lei, e a aceleração é a força sobre a massa, numa situação em que estes dois corpos não interagem com terceiros, as suas acelerações serão opostas *se as suas massas forem iguais!* De um modo geral, para dois corpos em interação mútua e livres da influência de terceiros, podemos dizer

$$\frac{|\mathbf{a}_A|}{|\mathbf{a}_B|} = \frac{|\mathbf{F}_A|/m_A}{|\mathbf{F}_B|/m_B} = \frac{m_B}{m_A}$$

O primeiro membro pode ser medido com réguas e relógios e daí podemos tirar, em princípio, a razão das massas de dois corpos medindo a razão das suas acelerações.

Mas não será isto usar as leis para as provar? Não estaremos a *definir* massa de modo a que a segunda e terceira leis se verifiquem? Para responder a esta pergunta suponhamos que usávamos este procedimento para mostrar que  $m_A = m_B$  e  $m_B = m_C$  pondo  $A$  e  $B$  em interação mútua e depois fazendo o mesmo com  $B$  e  $C$ . Agora podemos fazer uma previsão. Pondo  $A$  e  $C$  em interação as suas acelerações devem ser opostas. Repare-se que *não tinha de ser assim*. Com isto pretende-se afirmar que  $A$  e  $C$  terem acelerações opostas não é uma consequência *lógica* de os pares  $A$  e  $B$  e  $B$  e  $C$ , em interação mútuas, terem acelerações opostas. Por exemplo, (exemplo tolo, bem sei) podia acontecer que  $A$  e  $C$  fossem opacos e  $B$  transparente e a aceleração mútua dependesse de os corpos terem propriedades óticas iguais ( $A$  e  $C$ ) ou distintas ( $A$  e  $B$  e  $B$  e  $C$ ). São as leis de Newton, e não um silogismo, que permitem prever das experiências com  $A$  e  $B$  e  $B$  e  $C$ , o resultado da experiência com  $A$  e  $C$  e introduzir, consistentemente, esta maneira de medir massa.

Este exemplo mostra a natureza da validação empírica das leis da Física. As leis implicam determinadas consequências. Mas da observação das consequências não podemos deduzir as leis. Leis distintas poderiam dar origem às mesmas consequências em experiências que já fizemos e consequências diferentes para situações que ainda não experimentámos. As leis não se *provam*. Mas, à medida que confirmamos as suas previsões, numa gama cada vez mais vasta de fenómenos, aumenta a nossa confiança nessas leis. Ao ponto em que, como acontece com as Leis de Newton, sabemos que mesmo que essas leis sejam suplantadas (e foram!), as novas leis terão que reproduzir os seus resultados, ou seja, reduzir-se a elas, nas gamas de fenómenos em que já as validámos.

Podemos então usar as Leis de Newton para definir massa, um conceito que aparece pela primeira vez na formulação dessas leis. A Natureza encarregar-se-ia de no-lo mostrar, se por acaso essa definição não fosse consistente as observações empíricas.

Em conclusão, dados dois corpos em interação mútua a razão das suas acelerações é a razão inversa das suas massas,

$$\frac{|\mathbf{a}_A|}{|\mathbf{a}_B|} = \frac{m_B}{m_A}$$

Escolhendo um corpo como tendo a unidade de massa, podemos, em princípio pelo menos, determinar a massa de qualquer corpo. A massa assim definida é conhecida pelo nome de *massa inercial*<sup>1</sup>.

## 2.2 O conceito de força

As três leis de movimento de Newton mencionam o conceito de força. A Lei da Gravitação Universal é uma lei de força.

Há dois aspectos fundamentais no conceito de força da teoria Newtoniana:

1. O movimento dos corpos é influenciado pela presença de outros corpos, e esta influência manifesta-se na forma de forças: isto é, uma força é sempre exercida **sobre** um corpo e é sempre exercida por outro corpo.

Se, acidentalmente, correremos contra um poste, fazemos uma verificação dolorosa desta afirmação: o poste exerce a força, esta é exercida sobre o nosso corpo e o nosso movimento é claramente afectado. Na linguagem da Física estas influências mútuas de corpos nos respectivos movimentos chamam-se **interacções**:

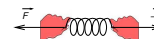
- a) a atracção entre cargas de sinais opostos, ou a repulsão entre cargas do mesmo sinal, é uma **interacção eléctrica**.
- b) a atracção gravítica entre o Sol e a Terra é uma **interacção gravítica**.

Na teoria Newtoniana as interacções são definidas pelas forças a que dão origem.

2. Forças são vectores, isto é, têm direcção sentido e módulo e somam-se como vectores.

Quando atiramos uma pedra, podemos fazê-lo em qualquer direcção ou sentido; podemos também variar a intensidade com que o fazemos, projectando a pedra a maior ou menor distância. Por outras palavras, podemos variar a direcção, o sentido e a intensidade da força que aplicamos à pedra. Mas ao dizer que as forças são vectores estamos também a afirmar que se somam como vectores.

O seguinte exemplo é útil para esclarecer este ponto. Suponhamos que pegamos numa mola com as mãos e a distendemos. Nas extremidades da mola estão aplicadas duas forças com a mesma direcção e sentidos opostos. Para que a mola não se desloque, nem para a esquerda nem para a direita, as duas forças têm que ter a mesma intensidade. Se as representarmos por vectores, estes terão uma soma vectorial nula: o efeito das duas forças no movimento global (de translação) da mola é o mesmo que o da sua soma vectorial: nenhum. A soma vectorial das várias forças que actuam num corpo, designa-se por **resultante**<sup>2</sup>.



<sup>1</sup>Note-se que esta definição não envolve a interacção gravítica de todo!

<sup>2</sup>Nem todos os efeitos de um conjunto de forças são equivalentes ao da força resultante. Neste exemplo, a resultante é nula mas a mola deforma-se por acção das forças aplicadas. Se não houver forças aplicadas à mola, ela mantém o seu comprimento de equilíbrio.

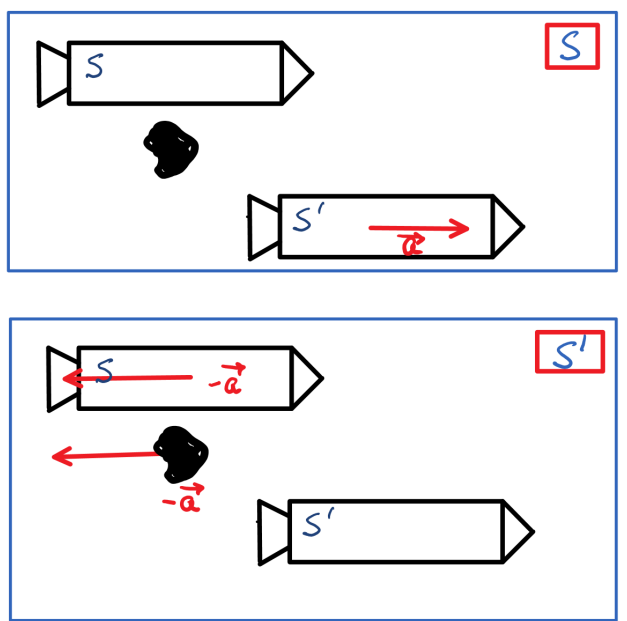


Figura 3: Qual dos referenciais,  $S$  ou  $S'$  é inercial?

A segunda lei de Newton contém, no seu primeiro membro, a **resultante** de todas as forças aplicadas a um corpo e no segundo membro a massa e a aceleração desse corpo.

Em resumo:

- as forças têm origem nas interações entre corpos;
- as forças são vectores;
- a soma vectorial das forças que actuam num corpo chama-se **resultante**. A força a que se refere a segunda lei é a resultante das forças que actuam no corpo.

### 2.3 Referenciais inerciais

Imaginemos um asteróide atirado por alguma colisão para o espaço interestelar, longe de qualquer astro ou corpo que possa influenciar o seu movimento, isto é livre de interações, de forças exercidas por outros corpos. A primeira lei diz-nos que a sua velocidade deve ser constante. Mas para quem? Para medir uma velocidade precisamos de um referencial e há muitos referenciais em que esse corpo está acelerado.

Suponhamos que o nosso asteróide está parado em relação à nave  $S$ . Uma segunda nave,  $S'$  nave move-se em relação a  $S$  com aceleração  $a$ . Claramente o nosso asteróide, tal como  $S$ , tem uma aceleração  $-a$  em relação a  $S'$ . Em que referencial se verifica a primeira lei?



Na perspectiva Newtoniana, todas as forças são devidas a interações entre corpos. Isto é se há uma força há um corpo “culpado” de a exercer. Se conhecêssemos todas as leis que governam essas interações (um grande se!) poderíamos em princípio concordar que um determinado corpo está livre de qualquer influência externa. Então só observaríamos a primeira lei numa classe restrita de referenciais, precisamente aqueles em que o referido corpo tivesse movimento uniforme. Na Física Newtoniana esses referenciais são designados por *inerciais*.

Na realidade, não é nada fácil estabelecer que um dado corpo está livre de forças. Por essa razão não é nada fácil determinar entre dois referenciais mutuamente acelerados, qual é o inercial. Mas esta discussão tem de ser adiada até termos uma melhor compreensão das Leis de Newton. Para agora ficamos apenas com a noção que existe uma classe de referenciais em que as leis de Newton são válidas: aqueles em que um corpo livre de forças tem movimento uniforme.