

# Projecto Faraday

Textos de Apoio

## Colisões

10º Ano de Escolaridade



**casa das ciências**

Porto, Outubro de 2009

# Ficha Técnica

## Projecto Faraday

Projecto de intervenção no ensino da Física no secundário.

### Financiamento

Fundação Calouste Gulbenkian.

### Execução

Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

### Escolas Participantes

- ES Filipa de Vilhena
- ES Fontes Pereira de Melo
- ES Garcia de Orta
- ES da Maia
- ES de Santa Maria da Feira

### Coordenação

- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques

## **Portal**

URL: <http://www.fc.up.pt/faraday>

## **Texto do 10<sup>o</sup> Ano**

### **Redactor Principal**

J. M. B. Lopes dos Santos

### **Colaboração e revisão**

- Elisa Arieiro
- Carlos M. Carvalho
- Manuel Joaquim Marques

## **Actividades**

### **Autores**

- Carlos M. Carvalho
- Elisa Arieiro
- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques
- Nuno Alexandre Vaz
- Nuno Nunes

### **Colaboração**

- Joaquim Agostinho Moreira



Parte I

# ENERGIA E MOVIMENTO



# Conteúdo

Ficha Técnica . . . . .	i
<b>I ENERGIA E MOVIMENTO</b>	<b>1</b>
<b>3 Colisões</b>	<b>7</b>
3.1 Colisões em Física . . . . .	7
3.1.1 O que é uma colisão? . . . . .	8
3.2 Conservação de energia em colisões . . . . .	10
3.2.1 Movimento da molécula de $O_2$ . . . . .	12
3.2.1.1 Centro de massa . . . . .	12
3.2.2 Energia cinética de translação e centro de massa . . . . .	14
3.2.3 O modelo de partícula material . . . . .	14
3.2.4 Coeficiente de restituição . . . . .	15
3.2.4.1 Colisão com um objecto fixo . . . . .	17
3.3 Actividades, questões e problemas . . . . .	18
3.3.1 Actividades . . . . .	18
3.3.2 Problemas e questões . . . . .	19





# Lista de Figuras

3.1	Fotografia aérea do CERN, junto ao lago Genebra. Estão marcados na foto alguns dos anéis aceleradores deste laboratório. O maior ocupa um túnel de 27 km de perímetro [1]. . . . .	7
3.2	Exemplo de um evento registado no CERN. As trajectórias das partículas são reconstruídas por computadores a partir de sinais electrónicos nos detectores[1].	8
3.3	Os magnetos impedem os carros de se aproximarem demasiado. . . . .	10
3.4	(a) Numa translação, os dois átomos de oxigénio têm o mesmo deslocamento e a mesma velocidade; (b) num movimento mais geral têm velocidades diferentes. . . . .	12
3.5	A molécula de $O_2$ , após a colisão, tem movimentos de rotação e de vibração, sobrepostos ao de translação. . . . .	13



## Capítulo 3

# Colisões

### 3.1 Colisões em Física

Na fronteira entre a França e a Suíça, junto ao Lago Genebra, existe um túnel de 27 km de comprimento. Não serve para apressados motoristas atravessarem complicadas passagens de montanha com mais rapidez. Se o percorremos integralmente, voltaremos ao lugar de partida: é um anel. Faz parte do maior laboratório de Física de partículas do mundo, o CERN.



Figura 3.1: Fotografia aérea do CERN, junto ao lago Genebra. Estão marcados na foto alguns dos anéis aceleradores deste laboratório. O maior ocupa um túnel de 27 km de perímetro [1].

O túnel está repleto de material científico, magnetos, câmaras de radio-frequência, detectores. No interior de um tubo de alto vácuo,

circularam<sup>1</sup> os únicos viajantes deste túnel, electrões e positrões, guiados e acelerados até velocidades próximas da luz, por uma combinação judiciosa de campos eléctricos e magnéticos. Para quê?

Os electrões (carga negativa) e os positrões (carga positiva) eram acelerados no túnel em sentidos opostos. Em alturas determinadas, os dois feixes colidiam em zonas do anel equipadas com detectores de partículas. As enormes quantidades de energia dos feixes materializavam-se em partículas que emergiam da zona da colisão, para serem detectadas e medidas nos detectores. Foram conseguidas, por este processo, várias descobertas muito importantes, sobre a constituição mais fundamental da matéria.



Figura 3.2: Exemplo de um evento registado no CERN. As trajectórias das partículas são reconstruídas por computadores a partir de sinais electrónicos nos detectores[1].

O uso de colisões para estudar a constituição da matéria e as interacções entre os seus constituintes é, contudo, muito anterior à construção de aceleradores de partículas como os do CERN. Em 1911, Ernest Rutherford, um físico neo-zelandês, a trabalhar em Inglaterra, descobriu a existência do núcleo atómico, estudando o modo como as partículas  $\alpha$  eram desviadas em colisões com átomos de uma folha de ouro.

Há uma enorme quantidade de conceitos de física envolvidos na análise das colisões do CERN, ou mesmo nas mais modestas colisões estudadas por Rutherford. Neste capítulo, far-se-á apenas uma muito breve introdução a conceitos relacionados com a conservação de energia em colisões.

### 3.1.1 O que é uma colisão?

O que é uma colisão entre duas bolas de bilhar? As bolas aproximam-se uma da outra, cada uma movendo-se como se a outra não existisse, até se tocarem. Depois afastam-se com velocidades modificadas. A interacção entre elas parece ser instantânea, ou, pelo menos, ter uma duração tão curta, que dela não nos apercebemos. A colisão de uma bola de basquetebol com o solo é semelhante.

Estes exemplos poderiam levar-nos a associar a noção de colisão a uma interacção de contacto muito breve. Mas, o conceito de “contacto” não existe ao nível atómico. O tamanho de um átomo, cerca de  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ , é essencialmente determinado pela distância a que os electrões se movem em torno do núcleo; o átomo é,

<sup>1</sup>Neste momento não correm experiências, porque este túnel está a ser modificado para instalar um novo acelerador de partículas, o LHC, Large Hadron Collider, previsto para entrar em funcionamento em 2007.

### ■ Equação de Einstein ■

Além do princípio de conservação de energia, que temos discutido, existe um outro, descoberto há mais tempo, que é a lei de conservação de massa, de Lavoisier. Se as partículas que constituem a matéria (elétron, próton, neutrão, etc) existissem para sempre, a lei de conservação de massa seria uma consequência de o número destas partículas ser constante. Sabemos, hoje, que é possível criar e destruir partículas, transformá-las em outras partículas ou em radiação.

Einstein descobriu que não havia duas leis de conservação separadas, massa e energia, mas apenas uma. Aos termos de energia que já conhecemos, associados a movimento, ou interações, juntou um termo, para cada partícula de massa  $m$ , chamado a energia em repouso e dada pela mais célebre fórmula da Física:

$$E = mc^2,$$

em que  $c$  é a velocidade da luz.

A massa não é conservada (as partículas podem ser destruídas e criadas) mas a energia total é, se incluirmos os termos de energia em repouso.

Nas colisões electrão-positrão dos aceleradores do CERN, as energias cinéticas do electrão e do positrão são tão elevadas (velocidades próximas da luz), que é possível criar um grande número de partículas, de massa muito mais elevada que as do electrão ou do positrão. Se a massa total das partículas emergentes da colisão for  $M$ , a conservação de energia implica que

$$2m_e c^2 + E_c = M c^2 + E'_c,$$

em que  $E_c$  é a energia cinética total do electrão e positrão que colidem e  $E'_c$  é a energia cinética total das partículas que resultam da colisão, mais a energia da radiação.

Como explicar, então, a lei de Lavoisier? As partículas mais leves que se conhecem são os electrões e positrões. Para criar um par (não é possível criar um electrão sem criar um positrão), é necessário dispor de uma energia de:

$$2m_e c^2 = 2 \times 9,1 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2 = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J} = 10^6 \text{ eV}.$$

Nas reacções químicas entre duas moléculas são libertadas energias da ordem de 1 eV. Nunca há energia suficiente para criar, sequer, a partícula mais leve. Daí que a massa seja conservada. Mas se a energia for suficientemente elevada, ou se juntarmos uma partícula com a sua anti-partícula, como nos aceleradores do CERN, isso deixa de ser verdade.

Caixa 3.1: Relação de Einstein e conservação de energia.

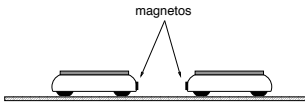


Figura 3.3: Os magnetos impedem os carros de se aproximarem demasiado.

sobretudo, espaço vazio. As forças que os átomos (neutros) exercem uns sobre os outros são muito fracas, quando as distâncias são grandes comparadas com o tamanho atómico, mas tornam-se muito fortes, e repulsivas, quando a distância é da ordem, ou menor, que o tamanho atómico. Por isso nos parece que objectos como bolas de bilhar só interagem quando se tocam.

No outro extremo, os astrofísicos estudam colisões entre galáxias, em que as distâncias entre as estrelas que as compõem são da ordem do tamanho de uma galáxia e a colisão pode durar 100 milhões de anos.

Na actividade 3.2, observam-se colisões entre carros, numa calha de alumínio, sem que estes realmente se toquem. Na extremidade de cada carro existem dois magnetos. Quando os carros se aproximam demasiado, as forças repulsivas entre os magnetos tornam-se elevadas e, num curto intervalo de tempo, o movimento dos carros é alterado. Se os carros não se tocam, será que deveremos chamar a isto uma colisão?

Quando se reflecte um pouco em todos estes exemplos, chegamos à conclusão que, o que importa, realmente, neste tipo de interacção, é que existe um tempo durante o qual os objectos se movem independentemente um do outro, sem forças mútuas; depois interagem durante um intervalo de tempo limitado e finalmente emergem da interacção (eventualmente modificados), de novo livres de interacções mútuas.

Em resumo, o que caracteriza uma colisão, é que há um *antes* e um *depois* em que o movimento é fácil de descrever porque não há interacções.

#### ▷ Actividade 3.1

Por esta razão, princípios de conservação, como o da energia, são muito importantes na análise e discussão de colisões. O que acontece durante a colisão, pode ser complexo e extremamente difícil, ou impossível, de descrever. Mas as grandezas conservadas, como a energia, não podem mudar e permitem-nos relacionar os estados inicial e final do sistema.

## 3.2 Conservação de energia em colisões

Para ser concreto, tomemos uma colisão entre dois carros como os da Actividade 3.2. Quando os carros estão afastados, não interagem. A respectiva energia potencial é constante, pois não há forças mútuas que possam realizar trabalho. Como vimos atrás,

#### ▷ Actividade 3.2

podemos tomar essa constante como zero. A energia dos carros antes da colisão é cinética:

$$E = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2.$$

$m_1$  e  $m_2$  são as massas dos dois carros e  $v_1$  e  $v_2$  as respectivas velocidades antes da colisão.

Se as velocidades *depois* da colisão forem  $v'_1$  e  $v'_2$ , a energia será:

$$E' = \frac{1}{2}m_1v'^2_1 + \frac{1}{2}m_2v'^2_2.$$

Havendo conservação de energia, teríamos:

$$E = E'.$$

Na Actividade 3.2 verifica-se que, em geral, isto não acontece. O mais frequente é ter-se  $E' < E$ , embora seja possível preparar situações em que se verifica o contrário<sup>2</sup>. Vejamos exemplos:

- a) Se dois carros idênticos colidem com velocidades de módulo igual e sentidos opostos e ficam juntos (colados), a respectiva velocidade final é nula. Senão, repare-se: dois carros iguais, a mover-se com velocidades de módulo igual, um em direcção ao outro. Colidem e ficam juntos. Por que razão haveriam de se mover num sentido e não no sentido oposto? O único resultado compatível com a simetria da situação é uma velocidade final nula. Neste caso a energia cinética final é zero.
- b) Uma bola de basquete, vôlei, ou ténis, nunca sobe à altura inicial se for deixada cair sobre uma superfície rígida. Isso significa que perdeu energia cinética ao colidir com o solo. Se partiu do repouso, a sua energia inicial era  $E = mgh$ . Se atingir a altura  $h'$ , a sua energia é  $E' = mgh'$  (a velocidade é nula no ponto de altura máxima). A maior parte da energia perdida,  $mg(h - h')$ , é devida à colisão com o solo.

Estas colisões, em que não há conservação de energia cinética, chamam-se inelásticas. As colisões entre objectos macroscópicos, em geral, são inelásticas, em maior ou menor grau. O que acontece à energia? Numa colisão inelástica não há conservação de energia?

---

<sup>2</sup>Eis um exemplo: prepara-se um carrinho com uma mola comprimida na extremidade. Se a mola for libertada na colisão a energia cinética do conjunto pode aumentar.

## ▷ Actividade 3.3

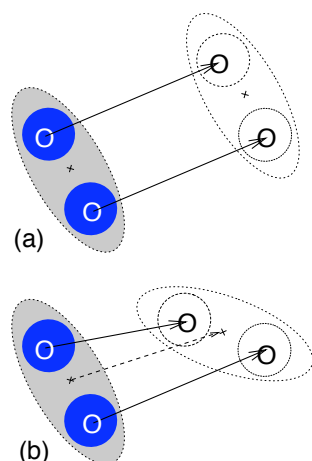


Figura 3.4: (a) Numa translação, os dois átomos de oxigénio têm o mesmo deslocamento e a mesma velocidade; (b) num movimento mais geral têm velocidades diferentes.

3.2.1 Movimento da molécula de  $O_2$ 

Na Actividade 3.3 consideram-se vários exemplos de colisões inelásticas em que se torna evidente que a energia cinética perdida pode ser transferida para outros movimentos, que não o de translação do corpo.

Para compreender melhor esta situação, vamos considerar um corpo muito simples, a molécula de  $O_2$ . Tem dois átomos de oxigénio à distância de  $1,48 \text{ \AA}$ . A massa da molécula é quase exclusivamente devida à massa dos dois núcleos, cujas dimensões são muito inferiores à da própria molécula. Assim, a energia cinética associada ao movimento da molécula é, no essencial, a energia cinética dos dois núcleos<sup>3</sup>:

$$E_{O_2} = \frac{1}{2}m_O v_1^2 + \frac{1}{2}m_O v_2^2. \quad (3.1)$$

Se as velocidades dos dois núcleos forem iguais (em módulo, direcção e sentido), a molécula tem um movimento dito de **translação**. Nesse caso podemos dizer que a velocidade da molécula é  $v = v_1 = v_2$  e

$$E_{O_2} = \frac{1}{2}(2m_O)v^2 = \frac{1}{2}m_{O_2}v^2.$$

Mas, o movimento de translação é uma situação muito especial. Os átomos de oxigénio podem rodar ou oscilar em torno da posição média. As velocidades de cada átomo são, em geral, diferentes e  $v_1 \neq v_2$ . O que é, nesse caso, a **velocidade da molécula**?

## 3.2.1.1 Centro de massa

O ponto médio entre os dois núcleos (sobre o segmento que os une, a distância igual dos dois núcleos) é designado por **centro de massa** da molécula de  $O_2$ . O movimento dos dois núcleos implica que o ponto médio entre eles também se desloque. Podemos tomar a sua velocidade,  $v_{cm}$ , como sendo a velocidade da molécula, como um todo.

A vantagem desta escolha particular é que a energia cinética total da molécula se pode escrever na forma<sup>4</sup>:

$$E_{O_2} = \frac{1}{2}m_{O_2}v_{cm}^2 + E'.$$

<sup>3</sup>A contribuição electrónica para a energia da molécula é importante e uma parte significativa dessa energia é energia cinética dos electrões. Mas essa energia só varia se houver uma mudança de estado electrónica, uma alteração da nuvem electrónica. Em geral, isso não acontece numa colisão entre duas moléculas ou com outros átomos a baixas energias.

<sup>4</sup>A demonstração deste resultado será feita no 11º ano.



O primeiro termo é exactamente o que esperaríamos, se a molécula fosse uma partícula simples, com movimento definido pela posição de um ponto. Isto é, se a molécula fosse uma **partícula material**. O segundo termo é a energia cinética dos núcleos no seu movimento relativo ao centro de massa. Ou seja,

$$E' = \frac{1}{2}m_O v_1'^2 + \frac{1}{2}m_O v_2'^2.$$

As velocidades  $v_1'$  e  $v_2'$  são medidas tomando como origem de coordenadas o centro de massa, ponto médio entre os dois núcleos.

Imaginemos agora uma colisão desta molécula com um átomo de Hélio, por exemplo, conforme se mostra na Fig. 3.5.

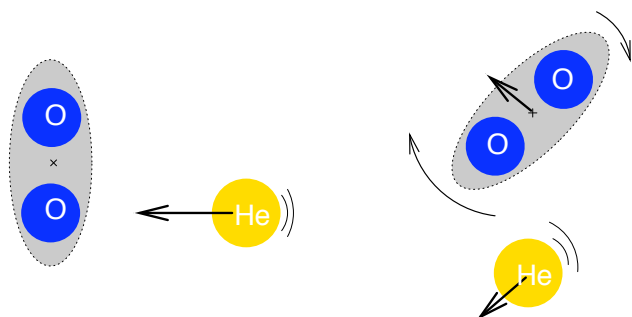


Figura 3.5: A molécula de  $O_2$ , após a colisão, tem movimentos de rotação e de vibração, sobrepostos ao de translação.

Se não olharmos para “dentro” da molécula de  $O_2$ , e seguirmos apenas o movimento do seu centro de massa, usando um modelo de partícula material, será de esperar que se conserve a energia cinética,

$$\frac{1}{2}m_{O_2}v_{cm}^2 + \frac{1}{2}m_{He}v_{He}^2?$$

Na geometria da Fig. 3.5, a molécula de  $O_2$  terá, certamente, um movimento de rotação em torno do seu centro; a sua energia cinética total não será apenas o termo associado ao movimento do centro de massa. Em geral, haverá até uma oscilação dos dois núcleos em torno da posição de equilíbrio e teremos uma contribuição de energia potencial, resultante da interacção entre eles. A equação do balanço da energia terá de incluir *todos os termos que podem variar na interacção*:

$$\frac{1}{2}m_{He}v_{He}^2 + \frac{1}{2}m_{O_2}v_{cm}^2 + E' + E_p = \text{const.}$$

▷ **Partícula material:** um sistema físico numa situação em que o seu movimento pode ser descrito pela posição de um ponto.

Em resumo: não há conservação da soma das energias cinéticas do átomo de hélio e da molécula de  $O_2$ , considerados como partículas materiais. Mas há conservação de energia quando levamos todos os movimentos em consideração.

### 3.2.2 Energia cinética de translação e centro de massa

Veremos no 11<sup>o</sup> ano que o conceito de **centro de massa** é aplicável a qualquer sistema complexo de massas, desde um átomo até uma galáxia. Trata-se de um ponto cuja posição é determinada, em cada instante, pelas posições das massas do sistema e cuja velocidade,  $\vec{v}_{cm}$ , permite a seguinte decomposição da energia cinética total do corpo:

A energia cinética total de um corpo pode escrever-se na forma:

$$E_c = \frac{1}{2}Mv_{cm}^2 + E'$$

em que:

- $M$  é a massa total do corpo;
- $\vec{v}_{cm}$  é a velocidade do centro de massa;
- $E'$  é a energia cinética de movimento relativo ao centro de massa.

Para objectos geometricamente regulares, com distribuição simétrica de massa (esferas, cilindros, cubos), a posição do centro de massa coincide com o centro geométrico do corpo. Não vamos, de todo, considerar situações mais complexas.

O termo de energia cinética associado ao movimento do centro de massa é designado por **energia cinética de translação**.

### 3.2.3 O modelo de partícula material

Mesmo sem o sabermos, usámos, em todo o capítulo 2, um modelo de partícula material para descrever o movimento dos corpos. Ao falarmos na **velocidade de um corpo** estamos a supor que

o seu movimento pode ser descrito pela variação de posição de um ponto. Os corpos macroscópicos podem ter movimentos muito mais complexos. Aquilo a que chamamos energia cinética de um corpo era, realmente, apenas a energia cinética de translação, determinada pelo movimento do centro de massa. Se só esse termo variar num determinado processo, o modelo de partícula material é apropriado.

Por exemplo, no movimento orbital da Terra em torno do Sol, é muito boa aproximação considerar apenas as variações de energia associadas ao movimento de centro de massa da Terra: o modelo de partícula material é aplicável. Já numa colisão de uma molécula de  $O_2$  com um átomo de He, este modelo pode não ser adequado.

Estes exemplos mostram que o modelo de partícula material nada tem a ver com o tamanho ou a complexidade do sistema. Tem apenas a ver com o facto de, em muitas situações, as variações de energia poderem ser caracterizadas em termos do movimento do centro de massa.

A energia cinética de translação,  $Mv_{cm}^2/2$ , é apenas um dos termos associados ao movimento de um corpo. Quando dois corpos interagem, em geral, a soma das respectivas energias cinéticas de translação não se conserva, podendo haver transferência de energia do movimento de translação de cada um dos corpos para outros tipos de movimento. É isto que se passa numa colisão inelástica.

### 3.2.4 Coeficiente de restituição

Numa colisão, que quantidade de energia cinética pode ser transferida para outros modos? Toda? Só uma parte?

Na Actividade 3.2 investigamos colisões entre dois carros de iguais massas,  $m$ . Algumas são colisões fortemente inelásticas: perde-se uma parte substancial (ou mesmo a totalidade) da energia cinética.

Temos duas maneiras de escrever a energia cinética dos dois carros (ver Caixa 3.2) :

a) Como a soma das energias de cada um dos carros:

$$E_c = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2.$$

b) Como a soma da energia cinética de translação do **sistema dos dois carros** com a energia cinética de movimento relativo

■ Cálculos de energia cinética de translação ■

**Exemplo 1:** Se os dois carros se aproximam um do outro com velocidades de sentido oposto e igual módulo,  $v$ , a energia cinética total é

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 = mv^2.$$

O centro de massa (ponto médio entre os dois carros) não se move, porque os carros deslocam-se a mesma distância em tempos iguais. Assim,  $v_{cm} = 0$ . A energia cinética de translação do **sistema** de dois carros é nula. Toda a energia cinética é de movimento relativo:

$$E' = E_c.$$

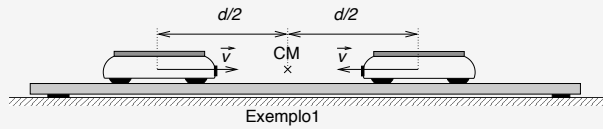
**Exemplo 2:** Se um dos carros está parado e o outro se aproxima com velocidade  $v$ , a energia cinética total é

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2.$$

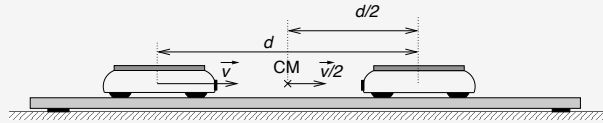
Quando o carro em movimento avança de  $x$ , o ponto médio entre os dois carros avança de  $x/2$ . Logo, a velocidade do centro de massa é  $v/2$ . A energia cinética de translação é

$$E_{tr} = \frac{1}{2}(2m) \left(\frac{v}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}mv^2$$

ou seja, metade da energia cinética total.



Exemplo 1



Exemplo 2

Caixa 3.2: Exemplos de cálculo da energia cinética de translação de um sistema de dois corpos.

ao centro de massa (que é o ponto médio entre os carros, como no caso da molécula de  $O_2$ ):

$$E_c = \frac{1}{2}(2m)v_{cm}^2 + E'$$

É muito importante distinguir a energia de translação do **sistema dos dois carros**, da soma das energias cinéticas de translação de cada carro.

Para dois carros iguais, a posição do centro de massa do sistema é o ponto médio entre os dois carros. A velocidade do centro de massa do sistema é a velocidade desse ponto. Por exemplo, se os carros se aproximarem um do outro com velocidades de módulo igual,  $v$ , o ponto médio entre eles não se desloca:  $\vec{v}_{cm} = 0$  e a energia cinética de translação do **sistema** é nula (ver Caixa 3.2 da página 16). Mas a energia cinética de translação de cada carro é  $mv^2/2$ .

Veremos, no 11º ano, que as leis do movimento de Newton implicam a conservação da **energia cinética de translação de um sistema isolado** (os dois carros no nosso exemplo). *A única parte que pode variar numa colisão é a energia cinética de movimento relativo ao centro de massa,  $E'$ .*

É habitual caracterizar o grau de inelasticidade de uma colisão pelo respectivo **coeficiente de restituição**,  $e$ , definido do seguinte modo. A razão entre as energias cinéticas de movimento relativo depois e antes de uma colisão,  $E'_f$  e  $E'_i$ , é o quadrado de  $e$ :

$$e^2 = \frac{E'_f}{E'_i}.$$

Quando os corpos que colidem ficam juntos após a colisão, a velocidade de cada corpo é também a velocidade do centro de massa: não há movimento relativamente ao centro de massa. Neste caso,  $E'_f = 0$  e  $e = 0$ : a colisão diz-se perfeitamente inelástica.

Se houver conservação de energia cinética,  $E'_f = E'_i$  e  $e = 1$ : a colisão é elástica.

#### 3.2.4.1 Colisão com um objecto fixo

Uma colisão com um objecto fixo, como uma parede, pode ser incluída, da seguinte forma, na discussão anterior.

Um objecto fixo funciona como um corpo de massa infinita (a parede está fixa à casa, que por sua vez está rigidamente ligada ao solo, etc.). Neste caso, o centro de massa do sistema pode ser considerado como sendo o centro de massa do objecto de massa infinita, que permanece imóvel; logo,  $v_{cm} = 0$ . O quadrado do coeficiente de restituição é simplesmente:

$$e^2 = \frac{E_f}{E_i} = \frac{mv_f^2/2}{mv_i^2/2} = \frac{v_f^2}{v_i^2},$$

em que  $m$  é a massa do sistema que colide com a parede e  $v_i$  e  $v_f$  são as suas velocidades, antes e depois da colisão. Sendo assim, o coeficiente de restituição é

$$e = \frac{v_f}{v_i}.$$

### 3.3 Actividades, questões e problemas

#### 3.3.1 Actividades

##### 3.1. Colisão de bola com superfície

Considerar a colisão entre uma bola e uma superfície nas seguintes situações limite:

- i) Uma superfície muito deformável (como uma membrana elástica) e uma bola rígida (como uma bola de bilhar).
- ii) Uma superfície muito rígida (parede) e uma bola (muito) deformável.

Para estes dois casos:

- (a) Fazer uma representação esquemática da configuração dos dois corpos, em função do tempo, incluindo vários instantes durante a colisão.
- (b) Representar, nesses esquemas, as forças que a superfície e o corpo exercem mutuamente.
- (c) Fazer um gráfico qualitativo da energia cinética da bola em função da sua posição relativamente à parede. Relacionar as variações de energia cinética da bola com o trabalho das forças que a parede exerce sobre ela.

##### 3.2. Colisões entre carrinhos

Ver ficha de actividade A7.

**3.3. Colisões inelásticas**

Ver ficha de actividade A8.

**3.4. Ensaio**

Um colega, faz a seguinte afirmação:

“Quando atiro uma bola de plasticina à parede, a energia que imprime à bola perde-se: a energia não é conservada”.

Escrever um texto (máximo de uma página A4) rebatendo essa conclusão, recorrendo a exemplos e a situações análogas à apontada pelo colega.

**3.3.2 Problemas e questões****3.1. Colisão de átomos de hélio**

Dois átomos de hélio, no respectivo estado fundamental, colidem com velocidades de  $100 \text{ m s}^{-1}$ .

- (a) Qual é a energia cinética total em electrões-volt?
- (b) Sabendo que o primeiro estado excitado de um átomo de hélio está quase  $20 \text{ eV}$  acima do fundamental, esta colisão será elástica ou inelástica?

**3.2. Colisões entre automóveis (1)**

Como classificar uma colisão frontal entre dois automóveis?

- (a) Elástica;
- (b) fracamente inelástica ( $e \lesssim 1$ );
- (c) fortemente inelástica ( $e \approx 0$ ).

**3.3. Colisões entre automóveis (1)**

Considerar as seguintes colisões frontais entre automóveis idênticos ( $m = 1000 \text{ kg}$ ):

- i) Um carro a  $45 \text{ km h}^{-1}$  colide com outro parado.
- ii) Dois carros colidem com velocidades de  $30 \text{ km h}^{-1}$  de sentidos opostos.
  - (a) Calcular as energias cinéticas totais iniciais.
  - (b) Calcular as energias cinéticas iniciais de movimento relativo ao centro de massa.
  - (c) Qual destas colisões seria classificada de mais violenta (causadora de maiores danos nos automóveis e seus ocupantes)? Justificar.

**3.4. Bola de basquete**

Uma bola de basquetebol, largada do repouso de uma altura 1 m, só sobe a uma altura de 80 cm.

- (a) Qual é o coeficiente de restituição da colisão com o solo?
- (b) O coeficiente de restituição, em boa aproximação, é independente das velocidades iniciais dos corpos que colidem. A que altura subirá a bola de basquete no segundo ressalto do solo?

**3.5. Sucesso do CERN**

Um dos objectivos dos aceleradores de partículas é obter a máxima energia possível para permitir a criação de partículas de massa mais elevada. Por que é que uma configuração de dois feixes a viajar em sentidos opostos é mais eficaz do que uma colisão de um feixe com um alvo estacionário?



# Bibliografia

- [1] CERN. URL: [www.cern.ch](http://www.cern.ch).