



Sumário

3	Momento linear	2
3.1	Atrito	2
3.2	Inércia	3
3.3	Origem da Inércia	6
3.4	Sistemas	6
3.5	Quantidade de movimento ou momento linear	10
3.6	Conservação do momento	10
3.7	Outras questões de revisão	14
3.8	Problemas	15



3. Momento linear

No capítulo anterior desenvolvemos uma abordagem matemática para descrever o movimento ao longo de uma trajetória retilínea. Neste capítulo, vamos continuar o estudo do movimento analisando a inércia, uma propriedade dos objetos que afeta o movimento. Os experimentos que vamos discutir ao estudar a inércia nos leva a descobrir uma das leis mais fundamentais da física: a conservação de momento linear.

Referências para leitura: Mazur (capítulo 4), Feynman (cap. 10), Berkeley vol. 1 (cap. 6), Nussenzveig (cap. 8), Halliday (seções 5.1, 6.1, 9.2-9.5) e Bauer (seções 4.7, 7.1-7.3).

CONCEITOS

3.1 Atrito

A Figura 3.1 mostra o movimento de um bloco de madeira deslizando sobre três superfícies diferentes. A diminuição da velocidade é devido ao **atrito** - a resistência ao movimento que uma superfície ou um objeto encontra ao tentar se mover sobre outra. Note que a forma como a velocidade do bloco diminui quando este desliza sobre o gelo é bem diferente do que quando o bloco desliza sobre o concreto. O efeito do atrito é trazer o bloco ao repouso. Quanto menos atrito há entre o bloco e a superfície, mais tempo vai demorar para o bloco parar. **Na ausência de atrito, objetos que se movem ao longo de uma trajetória horizontal continuam se movendo sem diminuir sua velocidade.**

Na realidade, não há nenhuma superfície totalmente livre de atrito na qual objetos podem deslizar para sempre, mas há formas de minimizar o atrito.

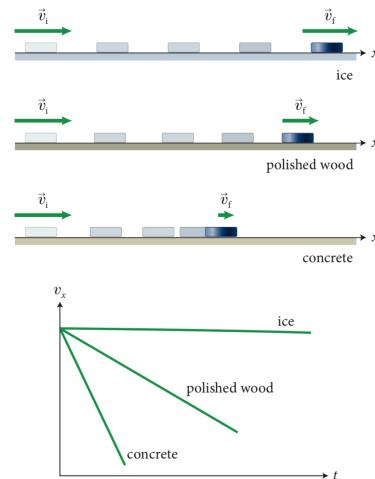


Figura 3.1: Velocidade em função do tempo para um bloco de madeira deslizando sobre 3 superfícies diferentes: gelo, madeira polida e concreto.

Questão 3.1 As acelerações dos movimentos mostrados na Figura 3.1 são constantes? Para qual superfície a aceleração tem o maior módulo?

3.2 Inércia

Podemos descobrir um dos princípios mais fundamentais da física estudando como as velocidades de dois carros com pouco atrito mudam quando os carros colidem. Vamos primeiro analisar o que acontece com dois carros idênticos, quando colocamos eles num trilho de ar (onde o atrito será praticamente nulo). A figura 3.2 ilustra o nosso arranjo experimental. O primeiro carro fica parado; depois, colocamos o segundo carro no trilho há uma certa distância e se movendo em direção ao primeiro carro. Os dois carros colidem, e a colisão altera a velocidade de ambos.



Figura 3.2: Experimento com carros se movendo num trilho de ar.

A colisão faz o carro 1 se mover para a direita, e o carro 2 parar. A figura 3.3(a) mostra as velocidades dos dois carros em diferentes instantes de tempo. A região em cinza mostra o intervalo de tempo no qual a colisão ocorreu. Embora a colisão pareça “instantânea,” dela demora aproximadamente 10 ms para o movimento dos carros se ajustar.

Podemos repetir este experimento várias vezes, dando um empurrão cada vez maior no carro 2. Vamos descobrir que *não importa qual é a velocidade do carro 2*, a colisão sempre troca as duas velocidades.

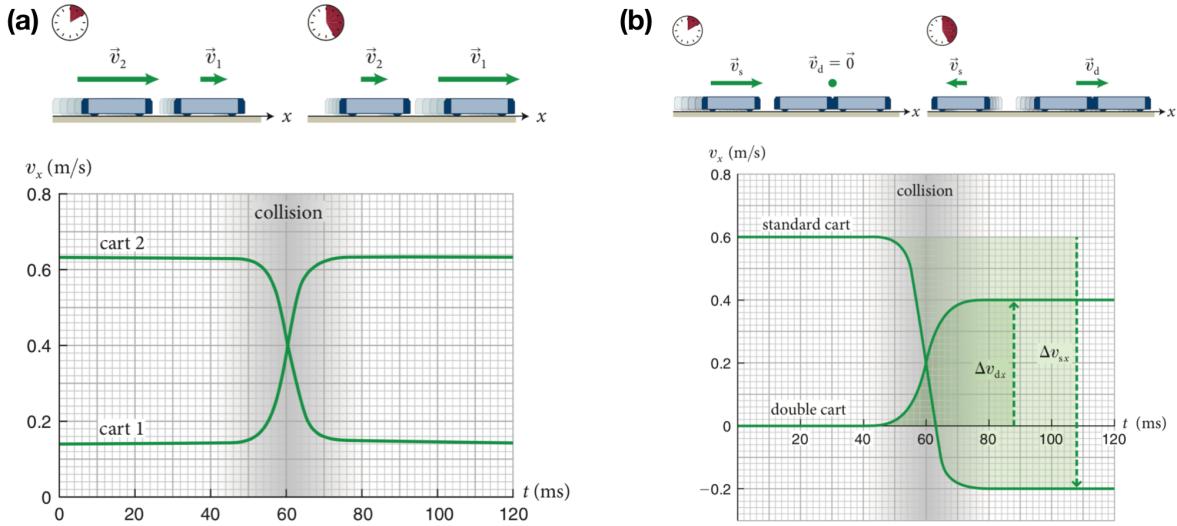


Figura 3.3: Gráfico da velocidade em função do tempo para (a) dois carros idênticos e (b) um carro simples e um carro duplo, antes e depois de uma colisão num trilho de ar (isto é, com atrito desprezível).

Para determinar se a quantidade de matéria afeta o movimento, podemos colar dois carros para ter o carro 1 com o dobro da massa do carro 2. Desta vez o carro 2 não para completamente; a colisão reverte a direção de movimento, de forma que depois da colisão o carro 2 se move para a esquerda, conforme mostra a Figura 3.3(b). Após a colisão, o carro duplo, sendo mais difícil para se colocar o movimento do que um único carro, se move para a direita como anteriormente, mas desta vez com uma velocidade menor. É mais fácil mover uma pedra pequena do que uma pedra grande!

Podemos repetir o mesmo experimento variando as velocidades iniciais e as direções de movimento, e vamos observar que *não importa como os carros se movem (ou nem se movem) inicialmente, a variação da velocidade do carro duplo é sempre metade da velocidade do carro simples*. Além disso, as variações das velocidades são sempre em direções opostas, o que significa que o módulo da velocidade de um carro aumenta enquanto a do outro diminui.

A figura 3.4 mostra o caso em que o carro em repouso agora tem metade da quantidade de material do carro em movimento. Nesse caso, o carro em repouso adquire o dobro da variação da velocidade comparada com o carro padrão, em movimento. A Tabela ??fig:colisao-tabela resume o resultado obtido nas três colisões e estabelece um padrão.

Podemos perceber que é mais difícil mudar o movimento dos objetos mais pesados do que o movimento de objetos mais leves. Objetos mais pesados têm maior resistência quando tentamos mudar a velocidade deles. **Esta tendência de um objeto a resistir a uma mudança na sua velocidade é o que chamamos de inércia.** A inércia de um objeto é determinada pelo tipo de material na qual o objeto é feito e pela quantidade de material contida no objeto.

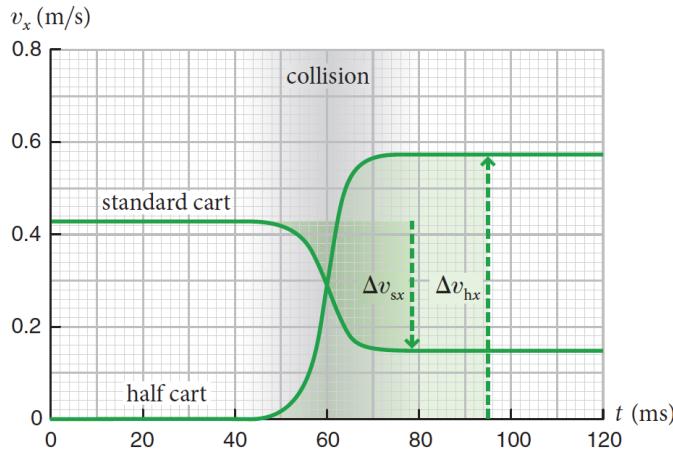


Figura 3.4: Gráfico velocidade versus tempo para carro com metade do material do padrão.

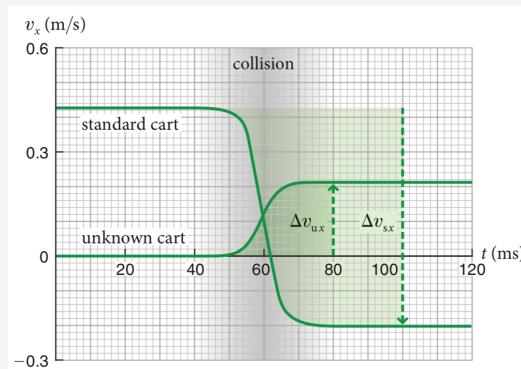
Experiment	Cart 1	Cart 2	$ \Delta v_{1x} : \Delta v_{2x} $
1	standard	standard	1
2	double	standard	0.5
3	half	standard	2

Figura 3.5: Tabela resumindo os resultados das colisões elásticas.

Questão 3.2 Verifique que

$$\frac{|\Delta v_u|}{|\Delta v_s|} \approx \frac{1}{3}$$

para os dois carros na figura abaixo.



Questão 3.3 A inércia do carro desconhecido (*unknown*) é maior ou menor do que a inércia do carro padrão (*standard*)?

3.3 Origem da Inércia

Dois exemplos:

1) Considere dois carros com a mesma quantidade de material (por aqui, entendemos o mesmo volume de material e mesma forma) mas um feito de metal, em repouso, e outro de plástico, em movimento. O resultado da colisão está na figura 3.6. Comparando com a figura 3.3 observamos uma forte dependência do resultado com o tipo de material com o qual os carros são construídos.

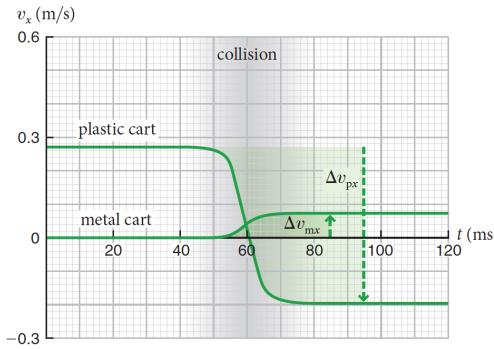


Figura 3.6: Gráfico da elocidade versus tempo para dois carros colidindo feitos com o mesmo volume e forma mas material diferentes.

Considere agora a figura 3.7 onde temos uma colisão na presença de um atrito significativo. Discuta o que podes concluir desse resultado.

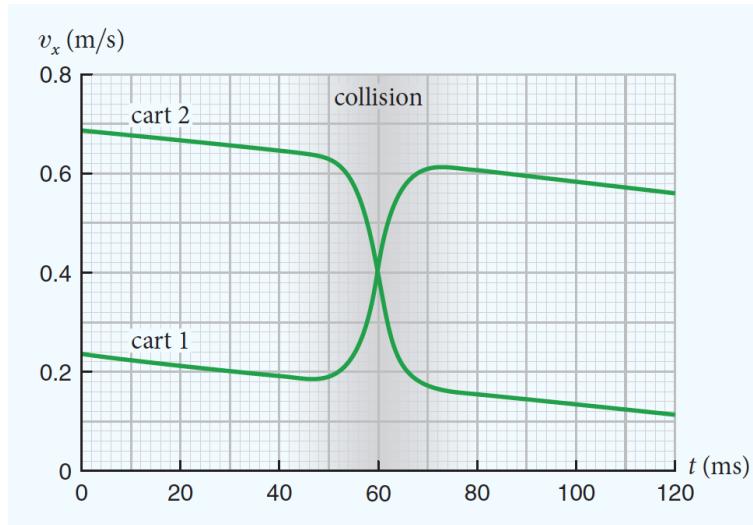


Figura 3.7: Gráfico velocidade versus tempo para colisão elástica na presença de atrito.

3.4 Sistemas

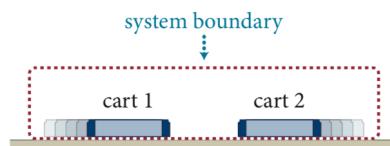
No capítulo 2 analisamos o movimento de um único objeto. Mas a situação da seção anterior coloca uma situação mais realista, onde um número de objetos interagem uns com os ou-

tos. Para analisar estas situações, temos que focar em um ou mais objetos principais - uma pessoa escalando uma montanha, dois carros colidindo, átomos de um gás num recipiente. O primeiro passo de qualquer análise que fizermos é então separar o(s) objeto(s) de interesse (sistema, ou "system" em inglês) do resto do Universo (vizinhança ou "environment" em inglês). **Qualquer objeto, ou grupo de objetos, que podemos separar, na nossa cabeça, de todo o resto que está ao redor é um sistema.**

Por exemplo, quando consideramos uma colisão entre dois carros, podemos considerar ambos os carros como o nosso sistema. Quando alguém joga uma bola e nós estamos interessados somente no movimento da bola, a escolha lógica de sistema é a bola; todo o resto - o lançador, o ar ao redor da bola, a Terra - está fora do sistema e constitui a vizinhança.

Ao analisar qualquer problema, a escolha do sistema deve ser bastante clara. Há sempre mais de uma forma de separar um sistema. Para os dois carros colidindo numa trilha, como ilustrado na Figura 3.8, podemos definir nosso sistema contendo ambos os carros (como fizemos) ou apenas um carro. Decidir o que incluir no sistema vai quase sempre ser definido pela informação que você quer aprender. Geralmente a escolha é óbvia; algumas vezes você vai precisar de experiência para fazer a decisão. Mais importante: uma vez definido o sistema, este deve permanecer o mesmo durante toda a sua análise. Falhar ao fazer uma escolha consistente de sistema é uma fonte frequente de erro.

(a) Choice 1: system consists of both carts



(b) Choice 2: system consists of one cart

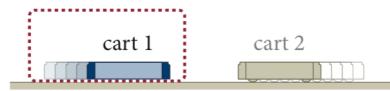
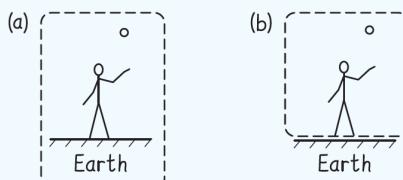


Figura 3.8: Duas escolhas para sistema de carros colidindo numa trilha.

Definição 3.1 Considere a figura abaixo. Há duas escolhas para o sistema de estudo. Analise e discuta as diferenças.



Em qual caso o sistema não possui **nenhuma interação externa**?

*Um sistema para o qual não há nenhuma interação externa é chamado de **sistema isolado**.*

Em particular, estamos interessados em **quantidades extensivas**, cujo valor é proporcional ao tamanho do sistema. De forma mais específica, se dividirmos o sistema em partes menores, então a soma de uma quantidade extensiva para todas as partes separadas é igual ao valor da quantidade para todo o sistema. O número de árvores num parque, por exemplo, é uma grandeza extensiva. O preço por litro de gasolina não é uma quantidade extensiva: se dividirmos o tanque do carro em duas partes e adicionarmos o preço do litro para as duas partes, vamos obter o dobro do preço por litro do tanque inteiro. Quantidades que não dependem do tamanho do sistema, como o preço de gasolina por litro, são chamadas de **quantidades intensivas**.

Questão 3.4 As seguintes quantidades são extensivas ou intensivas: (a) inércia, (b) velocidade, (c) o produto da inércia com a velocidade?

Apenas quatro processos podem alterar o valor de uma quantidade extensiva: entrada, saída, criação e destruição. Para entender isso, considere a Figura 3.9, que representa esquematicamente as condições inicial e final de um parque durante um certo intervalo de tempo. No parque, o número de árvores pode mudar ao longo do tempo porque novas árvores crescem (criação), árvores velhas morrem ou são desmatadas (destruição). Alternativamente, novas árvores podem ser trazidas para o parque (entrada) enquanto outras árvores são retiradas do parque (saída). Desta forma,

$$\text{variação} = \text{entrada} - \text{saída} + \text{criação} - \text{destruição}.$$

Sob certas circunstâncias nós podemos excluir os processos de criação ou destruição. Qualquer quantidade extensiva que não pode ser criada ou destruída é chamada de **conservada**. O valor de uma quantidade conservada só pode mudar através da transferência da quantidade para dentro/frente do sistema (Figura 3.10).

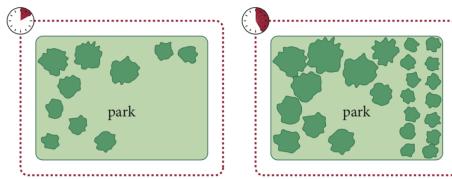


Figura 3.9: Diagrama de um parque como sistema. O número de árvores no parque é uma quantidade extensiva.

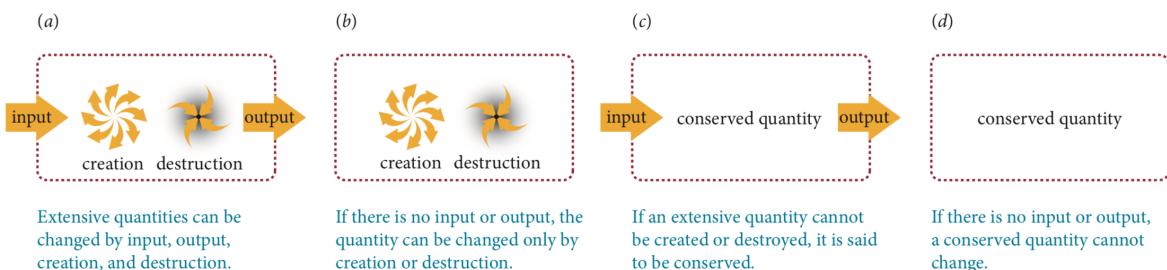
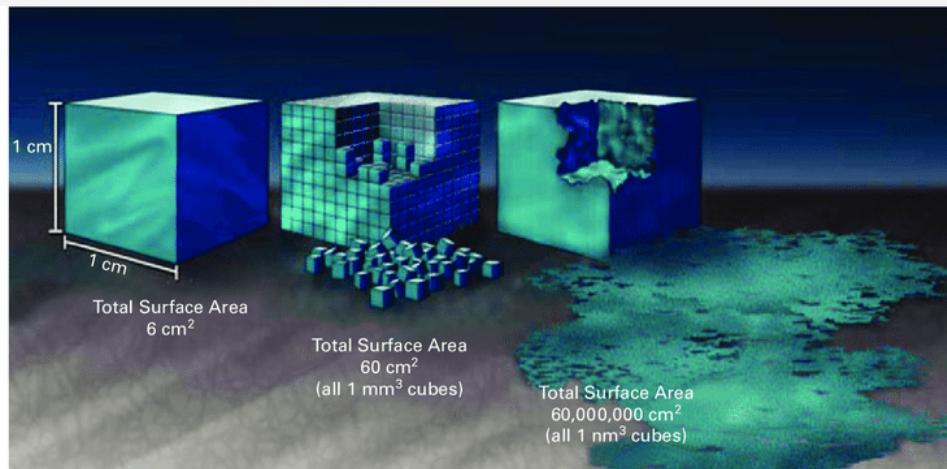


Figura 3.10: Os efeitos de entrada, saída, criação e destruição sobre as quantidades extensivas de um sistema.

Para uma quantidade conservada num sistema no qual não há a possibilidade de transferência, as coisas são ainda mais simples: o valor da quantidade não pode mudar. Quantidades conservadas têm um papel importante na física porque sua contagem é muito simplificada. Nos sistemas nos quais não há transferência de uma quantidade conservada, a quantidade não muda *independente dos processos que ocorrem dentro ou fora do sistema*.

Questão 3.5 Vamos examinar um caso simples de conservação. Considere uma folha de papel com lados a e b . Sua área é ab enquanto que o perímetro é $2a + 2b$. Dinda a folha de papel primeiro em duas, e depois, sucessivamente considere uma divisão em 148 partes. Discuta a relação entre o perímetro e a área.

No caso acima, desconsideramos a espessura da folha de papel e tratamos o sistema como sendo bidimensional. A mesma situação pode ser pensada em termos de volume e superfície (veja a figura 3.5. Essa é uma das características que tornam as *nanoestruturas* interessantes. Em particular, o que você poderia comentar sobre a aplicação de uma superfície nanoestruturada para aplicações em catálise? Como uma superfície nanoestruturada se relaciona com a superfície? O que pode ser pensado em termos de conservação? Indo um pouco mais longe, o que acontece a nível atômico? Será que há alguma grandeza geométrica rigorosamente conservada?



FERRAMENTAS QUANTITATIVAS

Quantitativamente, a inércia de um objeto é representada pelo símbolo m (m vem de *massa*, uma grandeza escalar que está relacionada com a inércia e que vamos estudar posteriormente). Matematicamente, podemos usar os experimentos de colisões mencionados acima para definir a inércia de qualquer objeto, pois a razão da inércida de dois objetos u e s está relacionada com o inverso da razão da variação do módulo das velocidades dos objetos:

$$\frac{m_u}{m_s} = -\frac{\Delta v_s}{\Delta v_u} \quad (3.1)$$

3.5 Quantidade de movimento ou momento linear

A definição de inércia acima leva à definição de outra quantidade física importante: o *momento* ou quantidade de movimento. Podemos reescrever a equação acima como:

$$m_u \Delta v_u + m_s \Delta v_s = 0 \longrightarrow m_u v_{u,f} - m_u v_{u,i} + m_s v_{s,f} - m_s v_{s,i} = 0.$$

O produto da inércia pela velocidade de um objeto é chamado de **momento**: $p \equiv mv$. A unidade no SI para o momento é $\text{kg}\cdot\text{m/s}$. A partir desta definição, a relação acima pode ser reescrita como:

$$\Delta p_u + \Delta p_s = 0. \quad (3.2)$$

Esta equação significa que, sempre que um objeto colide com outro objeto, as variações nos momentos dos dois objetos se somam para dar zero.

A quantidade de movimento (momento linear) é definida pelo produto da inércia do objeto pela sua velocidade. Como a velocidade é um vetor e a inércia um escalar, o momento linear é também um vetor:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Para movimentos em uma dimensão, que temos considerado aqui, temos simplesmente

$$p_x = mv_x$$

Em unidades do sistema internacional, a unidade do momento linear é $\text{kg}\cdot\text{m/s}$.

A conservação de momento linear, em sua forma vetorial, se expressa como

$$\Delta \vec{p}_u + \Delta \vec{p}_s = 0$$

3.6 Conservação do momento

O momento é uma propriedade extensiva - podemos adicionar o momento de cada objeto num sistema para obter o momento total do sistema. Nos exemplos dos carrinhos, podemos pensar nos dois carros como nosso sistema, de forma que

$$p_{\text{sistema}} \equiv p_u + p_s,$$

e a equação 3.2 pode ser reescrita como:

$$\Delta p_{\text{sistema}} = 0. \quad (3.3)$$

Logo, quando consideramos os dois carros como um sistema, podemos dizer que a colisão não altera o momento do sistema.

Antes de prosseguirmos, vamos analisar um outro tipo de colisão. Considere a figura 3.11, onde os carros são idênticos.. Um carro está inicialmente em repouso enquanto o outro aproxima-se com velocidade $2v$. Após a colisão, os carros ficam colados e movimentam-se como um único objeto. O resultado é um "carro" com inércia $2m$ movimentando-se com velocidade v . Esse tipo de colisão difere completamente das que tínhamos analisado até aqui. Discutiremos em mais detalhe no próximo capítulo, por ora, é suficiente designarmos por **colisões inelásticas**, diferindo das anteriores, que são **colisões elásticas**.

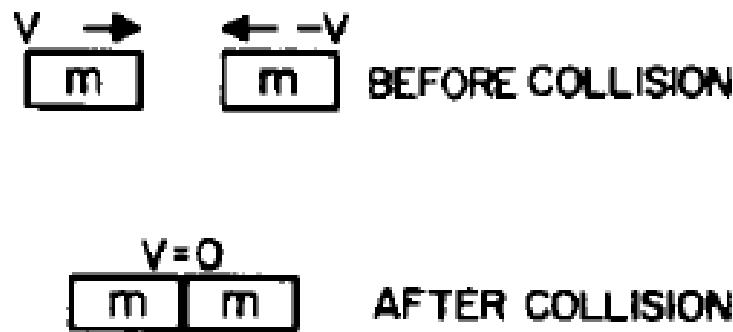


Figura 3.11: Esquema de colisão inelástica entre dois carros com mesma inércia. (Extraído do Feynman, seção 10, vol 1.)

Considere agora a sequência de colisões inelásticas representadas nas figuras 3.12 - 3.15. Observe que em todas elas,

$$\sum_i p_i = \sum_f p_f = \sum_j m_{j,i} v_{j,i} = \sum_j m_{j,f} v_{j,f}$$

onde j enumera os carros enquanto que i e f referem-se a *inicial* e *final*.

Mais importante, observe que a condição de conservação de momento é suficiente para determinarmos a velocidade do carro final.

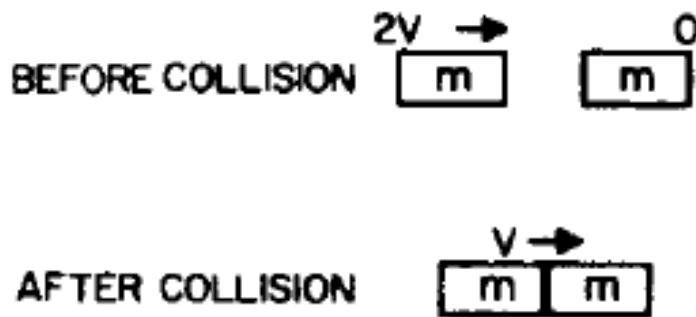


Figura 3.12: Outro exemplo de colisão inelástica entre dois carros com mesma inércia. (Extraído do Feynman, seção 10, vol 1.)

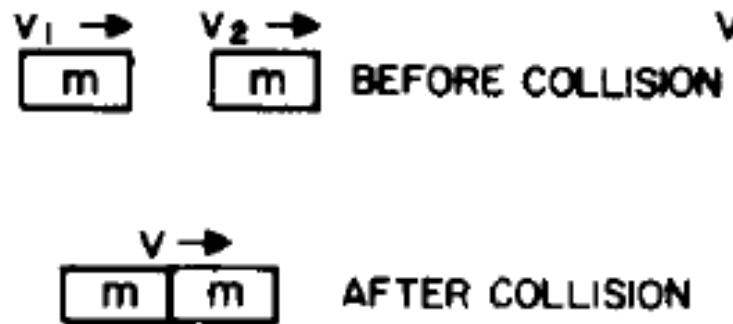


Figura 3.13: Ainda outro exemplo de colisão inelástica entre dois carros com mesma inércia. Encontre v . (Extraído do Feynman, seção 10, vol 1.)

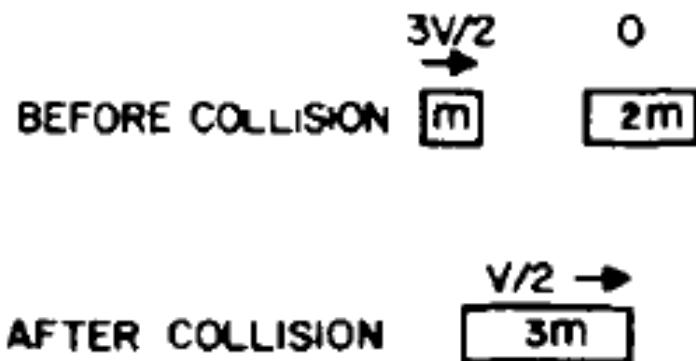


Figura 3.14: Esquema de colisão inelástica entre dois carros com inércias m e $2m$. (Extraído do Feynman, seção 10, vol 1.)

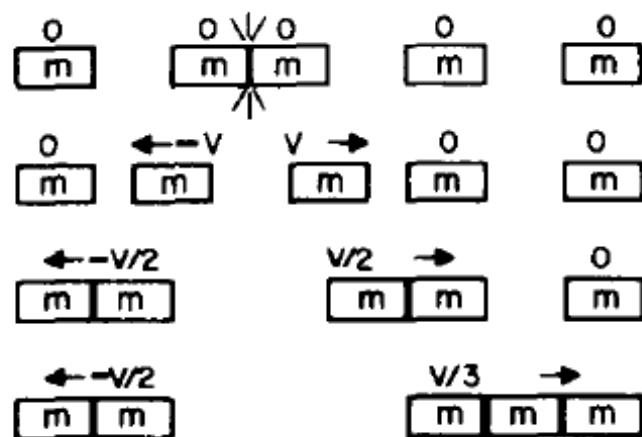


Figura 3.15: Esquema de colisões inelásticas entre vários carros com mesma inércia. (Extraído do Feynman, seção 10, vol 1.)

Observe que nas colisões elásticas que consideramos anteriormente, o momento linear

sempre se conserva. Mas a solução do problema exige outra condição, que distingue os dois tipos de colisão, que discutiremos no próximo capítulo.

Vamos retomar o início da nossa discussão, lembrando que a variação do momento é uma consequência da interação. Para isso, vamos voltar a pensar no movimento do bloco de madeira sobre o piso de concreto da Figura 3.1. Se considerarmos o bloco como nosso sistema, vemos que há uma **interação** entre o sistema (bloco) e o exterior (no caso, o piso). Vamos definir o conceito de interação mais adiante no curso; por ora, por interação queremos dizer dois objetos tocando um ao outro de forma que um deles (ou ambos) é acelerado. As interações entre objetos dentro de um sistema são chamadas de *interações internas*. As interações entre um objeto do sistema e qualquer outro objeto fora do sistema são *interações externas*. No caso do objeto se movendo no piso de concreto, considerando o objeto como nosso sistema, há ao menos uma interação externa.

Definição 3.2 (De volta a definição 3.1 de Sistemas Isolados) Definimos na parte conceitual um **sistema isolado** como aquele no qual não há interações externas. Como consequência, nesses sistemas isolados, não há nada que possa alterar o momento do sistema, de forma que

$$\Delta p_{sistema} = 0 \text{ (sistema isolado).} \quad (3.4)$$

Experimentos mostram que *qualquer* interação entre dois objetos - não apenas colisões - transfere momento de um objeto a outro. Contudo, a soma dos momentos dos objetos interagentes nunca muda. Até hoje, nenhuma interação ou outro fenômeno no qual momento é criado do nada ou destruído foi observado. Podemos com isso concluir que **o momento pode ser transferido de um objeto para outro, ou de um sistema para a vizinhança, mas não pode ser criado ou destruído**. Esta afirmação é um dos princípios mais fundamentais da física, e geralmente é referido como **conservação do momento**. Para qualquer sistema isolado, a conservação do momento significa que $\Delta p_{sistema} = 0$. Para um sistema que não é isolado, temos que

$$\Delta p = J, \quad (3.5)$$

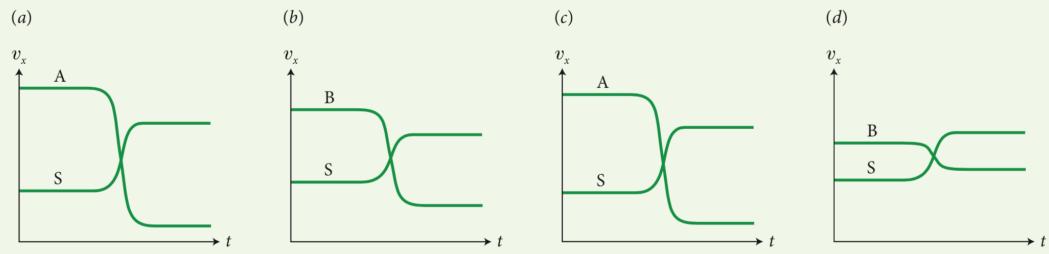
onde J representa a transferência de momento do ambiente externo para dentro do sistema. A quantidade J é chamada de **impulso** entregue ao sistema. Como o momento, o impulso é um vetor (ou seja, tem módulo e direção) e tem unidades de $\text{kg}\cdot\text{m/s}$. Dependendo da direção em relação ao momento, o impulso pode aumentar ou diminuir a quantidade de momento do sistema.

A equação 3.5 é chamada de **lei do momento**, e vamos usa-la extensivamente neste curso. A equação engloba a conservação do momento porque ela nos diz que o momento de um sistema pode mudar somente devido à transferência de momento para o sistema (J). Para um sistema isolado, o impulso é zero ($J = 0$) e a lei do momento toma a forma da equação 3.2.

A lei de conservação do momento é uma das propriedades fundamentais da natureza. A origem dela está na *invariância por translação* das leis físicas do nosso universo. Voltaremos a esse ponto mais tarde.

3.7 Outras questões de revisão

Questão 3.6 Os gráficos abaixo mostram diferentes situações dos efeitos dos carros A e B colidindo com um carro S. Comparando (a) com (b), e depois (c) com (d), liste os carros A, B e S em ordem crescente de inércia.



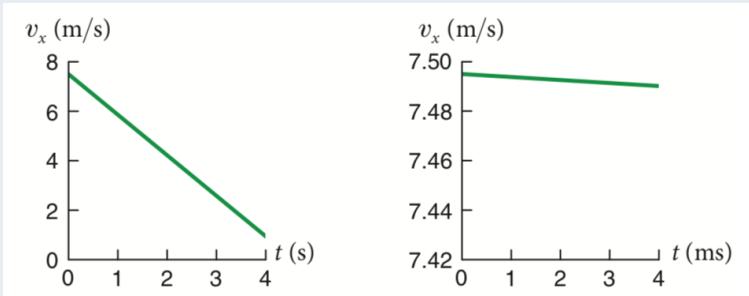
Questão 3.7 Suponha que você esteja contando o número de cabeças de gado numa fazenda. O que você escolhe como seu sistema? Quais são os processos correspondentes à entrada, saída, criação e destruição? É possível ter transferência para dentro/para fora do sistema? A contagem é uma grandeza conservada?

Questão 3.8 Considere as colisões representadas na Figura 3.3. Quanto de momento é transferido em cada uma das colisões? O momento é transferido do carro 1 para o carro 2, ou na direção oposta?

3.8 Problemas

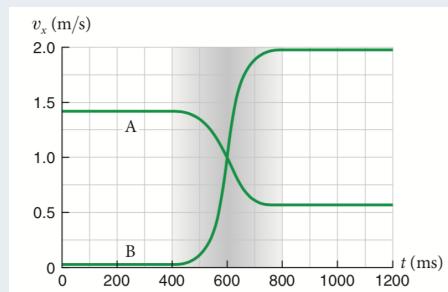
Atividade 3.1 Considere os dois gráficos da velocidade por tempo mostrados abaixo, que descrevem um objeto deslizando livre sobre uma superfície plana.

- Em qual dos dois casos houve uma maior variação do módulo da velocidade?
- Em qual dos dois casos o módulo da aceleração é maior?
- O efeito do atrito no movimento é mais pronunciado em qual dos dois casos?



Atividade 3.2 A figura abaixo representa o gráfico da velocidade por tempo para dois objetos, A e B, antes e após eles colidirem entre si. O objeto B está inicialmente em repouso.

- Estime a variação da velocidade dos objetos A e B.
- Com base na sua resposta para o item anterior, qual objeto deve ter maior inércia?
- Qual é a razão entre as inéncias dos objetos A e B?



Atividade 3.3 Você está andando num ônibus e pensando sobre o número de passageiros dentro do ônibus.

- O número de passageiros se mantém constante?
- O número de passageiros dentro do ônibus é uma quantidade extensiva ou intensiva?
- Em termos de número de passageiros, o ônibus pode ser considerado um sistema isolado?

Atividade 3.4 Um garoto de 65,0 kg e a irmã de 40,0 kg, ambos utilizando patins, estão de frente um para o outro em repouso. A garota empurra o garoto com força, mandando-o para trás com velocidade 2,90 m/s em direção ao oeste. Despreze o atrito.

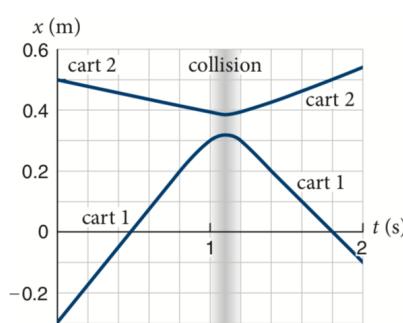
- Descreva o movimento subsequente da garota.

- b) O momento do sistema garoto-garota é conservado no processo de empurrar-afastar-se?
- c) Se sim, explique como isso é possível considerando que não há movimento anterior nem muito movimento posteriormente.
- d) Calcule a velocidade da garota após o empurrão.

Atividade 3.5 Um carro de massa m movendo-se a uma velocidade escalar v_1 colide e se une à traseira de um caminhão de massa $2m$ movendo-se inicialmente na mesma direção que o carro a uma velocidade escalar menor v_2 . Para calcular a velocidade escalar, v_f , dos dois veículos imediatamente após a colisão, siga o seguinte roteiro:

- a) Defina um sistema isolado para tratar o problema.
- b) Calcule o momento linear total do seu sistema imediatamente antes e imediatamente após a colisão.
- c) Calcule v_f .

Exercício 3.1 A figura abaixo mostra a posição em função do tempo para uma colisão entre dois carros numa pista onde o atrito pode ser ignorado. O carro 1 tem uma inércia de 1,0 kg; o carro 2 tem uma inércia de 4,0 kg. (a) Quais são as velocidades iniciais e finais de cada carro? (b) Qual é a variação na velocidade de cada carro? (c) Esboce o gráfico da velocidade em função do tempo para a colisão. (d) O carro 1 tem aceleração diferente de zero? Se sim, quando, e qual é o sinal da aceleração? (e) O carro 2 tem aceleração diferente de zero? Se sim, quando, e qual é o sinal da aceleração? (f) Verifique que a conservação de momento se aplica neste caso.



Exercício 3.2 Uma bala de inércia m_b é atirada horizontalmente com velocidade $v_{b,i}$ contra um bloco de madeira de inércia m_m inicialmente parado numa superfície sem atrito. A bala atravessa o bloco e sai com velocidade $v_{b,f}$. Determine a velocidade final do bloco, $v_{m,f}$, seguindo o seguinte roteiro:

- a) É possível definir um sistema isolado para tratar o problema? Em caso positivo, defina tal sistema.
- b) Calcule o momento linear total do seu sistema imediatamente antes e imediatamente após a interação da bala com o bloco.
- c) Calcule $v_{m,f}$. Deixe sua resposta em termos das quantidades dadas.

Exercício 3.3 Uma bola de futebol de massa $m = 200$ g é chutada em direção a uma vidraça, atingindo-a quando está se deslocando horizontalmente, a uma velocidade de 3 m/s. A bola atravessa a vidraça, diminuindo sua velocidade para 1 m/s. Determine o impulso transferido para a bola pela vidraça através do seguinte roteiro:

- É possível definir um sistema isolado para tratar o problema? Em caso positivo, defina tal sistema.
- Calcule o momento linear total do seu sistema imediatamente antes e imediatamente após a interação da bola com a vidraça.
- Calcule o impulso.

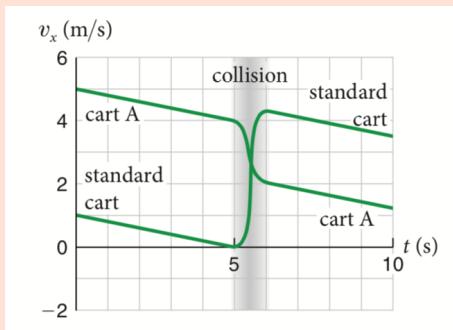
Exercício 3.4 Em um período de seis meses a Terra realiza meia revolução em torno do Sol. A massa da Terra é de $\sim 6 \times 10^{24}$ kg e sua velocidade de translação é de $\sim 10^5$ km/h.

- Calcule a variação do momento linear da Terra nestes seis meses.
- Um sistema isolado pode ser definido como contendo a Terra e o Sol. O momento linear é conservado neste sistema? Justifique.
- Calcule a variação da velocidade do Sol nestes seis meses. A massa do Sol é de $\sim 2 \times 10^{30}$ kg.

Exercício 3.5 Um vagão de trem move-se a uma velocidade v_i em uma linha em direção a três outros vagões parados. Todos os vagões são idênticos, e estão separados a uma certa distância um do outro. O vagão em movimento atinge o primeiro vagão parado, e se acopla a ele. Em seguida os dois vagões atingem o terceiro, acoplando-se a este, e assim sucessivamente. Calcule a velocidade final do comboio de vagões através de duas formas:

- Calculando a velocidade final dos vagões depois de cada colisão, e utilizando seu resultado como condição inicial para a próxima colisão.
- Definindo um sistema isolado que contenha todos os vagões, e aplicando conservação de momento.

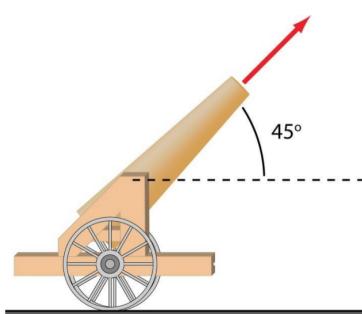
Problema 3.1 Um carro de 1 kg colide com um carro A de inércia desconhecida num trilho. Ambos os carros parecem sofrer atrito significante devido ao movimento das rodinhas porque as velocidades dos carros mudam com o tempo conforme mostrado na figura abaixo. (a) Quais são as velocidades dos carros em $t = 0$, $t = 5,0$ s, $t = 6,0$ s, e $t = 10$ s? (b) Quando os carros não estão colidindo, os carros estão acelerando ou desacelerando? (c) A aceleração/desaceleração de cada carro é a mesma antes e depois da colisão? (d) Qual é a inércia do carro A?



Problema 3.2 Considere uma molécula de um gás monoatômico de inércia m , que está preso numa caixa e se move para frente e para trás com velocidade constante v entre as paredes A e B, opostas uma a outra e distantes l uma da outra. A cada colisão com a parede, a molécula muda a direção do movimento sem mudar seu módulo. Em termos das variáveis do problema, escreva (a) a variação do momento da molécula quando ela colide com a parede B, (b) o intervalo de tempo entre colisões com a parede B, (c) o número de colisões por segundo da molécula com a parede B, e (d) a variação no momento, por segundo, como resultado destas colisões.

Problema 3.3 Um canhão é rigidamente fixado a uma base, que pode se mover ao longo de trilhos horizontais. A massa do canhão e da base é de $M = 5000$ kg. O canhão dispara um projétil de massa $m = 200$ kg a uma velocidade de $v_0 = 125$ m/s fazendo um ângulo de 45° acima da horizontal.

- Considerando somente a dinâmica na direção horizontal, o sistema definido pelo canhão, base e projétil define um sistema isolado? E considerando a dinâmica na direção vertical?
- Encontre a velocidade de recuo do canhão.
- Encontre o impulso exercido no canhão pelo chão.



Lista de problemas escolhidos para aula exploratória:

Exercício 3.1, Exercício 3.2, Exercício 3.4, Problema 3.2 e Problema 3.3

