

FORÇAS 6

Gil da Costa Marques

- 6.1 Forças e Interações**
 - 6.1.1 Forças na Mecânica
 - 6.1.2 Forças são grandezas vetoriais
 - 6.1.3 Unidades de Força
- 6.2 Identificando as Forças**
 - 6.2.1 Forças à distância e Forças de contato
 - 6.2.2 O Diagrama de Corpo Livre (DCL)
- 6.3 A Força Gravitacional**
 - 6.3.1 A Força peso
 - 6.3.2 Força Peso de um objeto extenso
- 6.4 As Forças Eletromagnéticas**
 - 6.4.1 Forças Elétricas
 - 6.4.2 Forças Magnéticas
- 6.5 Forças de Contato**
 - 6.5.1 Força Normal
 - 6.5.2 Força de Atrito
 - Atrito Seco
 - 6.5.2.1 Intensidade da Força de Atrito
 - 6.5.3 Força Tensora
 - 6.5.4 Forças Elásticas
- 6.6 Forças sobre um objeto num fluido**
 - 6.6.1 Empuxo
 - 6.6.2 Força Viscosa

6.1 Forças e Interações

Tudo no Universo, desde os objetos pequenos do nosso planeta até os grandes aglomerados de galáxias, está sujeito a transformações ou as experimenta. Algumas delas, como as que ocorrem no interior do Sol, realizam-se de forma contínua, e seus efeitos são observados a grandes distâncias. Outras são bem mais sutis. De qualquer forma, as várias partes do Universo e todos os objetos localizados no nosso mundo interagem entre si. Dessas interações resultam as transformações.

Todas as transformações no Universo derivam de apenas quatro tipos básicos de interação:

- as gravitacionais;
- as eletromagnéticas;
- as fracas e
- as fortes.



Atenção

Salvo raras exceções, tudo o que ocorre no nosso mundo pode ser entendido à luz das duas primeiras interações: as gravitacionais e as eletromagnéticas.

Forças correspondem, a rigor, a dois tipos especiais de interação: aqueles que produzem como resultado final algo que identificamos como deslocamentos dos objetos, ou seja, forças são interações que levam a movimentos de afastamento ou de aproximação dos objetos.

Nem todas as interações deixam os objetos com a sua estrutura íntima inalterada. Por exemplo, sabemos que as interações podem produzir transformações bastante radicais e que, portanto, nada têm a ver com afastamentos e aproximações de partículas. Mesmo as interações eletromagnéticas, que produzem as forças do dia a dia, podem produzir transformações surpreendentes, e podem propiciar o desaparecimento das partículas que interagem entre si. Esse é o caso da aniquilação de pares de partículas. E esse fenômeno está na base de um novo tipo de tomografia: aquela baseada na aniquilação de pósitrons (*PET SCAN*).

Outro exemplo de transformação radical é a transmutação de elementos. O que se tem depois da transformação é diferente daquilo que se tinha originalmente. Assim, os movimentos são as transformações menos radicais entre todas as transformações possíveis.

No movimento, os objetos interagem entre si de forma que mudem apenas de posição, pois a sua constituição permanece inalterada.

Geralmente, as forças alteram o estado de movimento de uma partícula. Estado de movimento refere-se tanto à posição quanto à velocidade da partícula.

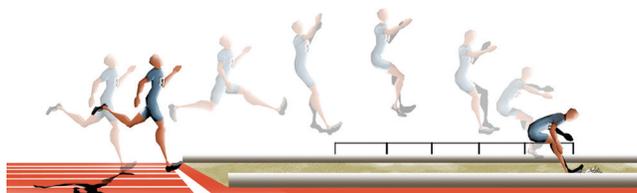


Figura 6.1: O movimento como uma série de transformações.

6.1.1 Forças na Mecânica

Força é um conceito fundamental na mecânica. Imagine um objeto em movimento com uma determinada velocidade.

O que devemos fazer para alterá-la?

Na Física clássica, dizemos que basta aplicar ao objeto uma força para alterar a velocidade desse objeto. Do ponto de vista físico, as forças são os agentes responsáveis pela mudança da velocidade de um objeto. Apesar de esse termo abrigar uma noção quase intuitiva, é importante entender que, do ponto de vista da Física, a noção de força está intimamente relacionada com a alteração do estado de movimento de uma partícula, isto é, a presença de forças entre as partes da matéria se faz sentir através de um movimento de afastamento (forças repulsivas) ou de aproximação (forças atrativas) delas.

A dinâmica é a parte da mecânica que se dedica ao estudo dos movimentos levando em conta as suas causas: as forças. Ela tem como fundamento três leis de Newton: a lei da inércia, a lei que estabelece uma relação muito simples entre força e aceleração e, finalmente, a lei da ação e reação. Essas três leis formam a base da dinâmica e foram propostas por Newton no século XVI.

6.1.2 Forças são grandezas vetoriais

O fato de ser uma grandeza vetorial implica que uma força pode ser analisada a partir de suas componentes. Temos assim que, para caracterizar uma dada força, devemos especificar seu módulo, direção e sentido ou, alternativamente, suas componentes cartesianas:

$$F_x, F_y, F_z$$

6.1

No referencial cartesiano, escrevemos:

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}$$

Enquanto no referencial polar escrevemos:

$$\vec{F} = F_\rho \vec{e}_\rho + F_\varphi \vec{e}_\varphi$$

As coordenadas de força dependem do referencial.

O fato de a força ser uma grandeza vetorial faz com que o efeito da força aplicada dependa da intensidade dela, bem como de sua direção e sentido.

6.1.3 Unidades de Força

Na dinâmica, utilizaremos exclusivamente o Sistema Internacional de Unidade (SI), que tem, como unidade de intensidade de força, o newton, cujo símbolo é N. De acordo com as regras de escrita do SI, a unidade “newton” se escreve com letra minúscula, embora venha do nome próprio “Newton”.

1 newton é a força necessária para acelerar um corpo de massa 1 kg de tal forma que sua aceleração seja de 1 m/s².

Por razões históricas, às vezes aparece outra unidade de força que não pertence ao SI: é o caso da unidade “quilograma-força” ou “quilograma-peso”, cujo símbolo é kgf.

No sistema cgs, a unidade de força é a dina.

1 dina = força necessária para acelerar uma partícula de massa 1 g de forma que sua aceleração seja de 1 cm/s².

6.2 Identificando as Forças

Ao nos depararmos com problemas que envolvam o movimento de um corpo devemos identificar todas as forças que atuam sobre ele. Esse passo deve ser o primeiro e é fundamental. Por isso, vamos analisar as principais forças com as quais lidamos no dia a dia. As forças são divididas em duas categorias: forças à distância (aquelas resultantes das interações fundamentais) e as que delas derivam.

Existem quatro interações fundamentais: a gravitacional, a eletromagnética, a forte e a fraca. As duas primeiras produzem as forças à distância com as quais lidamos no dia a dia. As demais forças da natureza são derivadas delas. Em geral, elas só acontecem quando os objetos do dia a dia estão muito próximos. Em particular, algumas forças surgem apenas quando os objetos estão em contato entre si; por exemplo, as moléculas que se formam quando os átomos se aproximam.

De fundamental importância para entender as forças que surgem no cotidiano, destacamos as forças interatômicas e intermoleculares, isto é, forças que surgem entre os átomos ou moléculas que compõem a matéria. A força interatômica é um exemplo de força não fundamental, pois ela pode ser entendida como uma força elétrica. O mesmo vale para a força intermolecular.

6.2.1 Forças à distância e Forças de contato

Podemos ainda dividir as forças em duas categorias: Forças à distância e Forças de contato.

As forças de contato são aquelas que resultam do contato físico entre, por exemplo, duas superfícies ou o contato de um objeto com um fluido. Como exemplo típico de tais forças temos um objeto que está tão próximo de outro, de tal modo que essa proximidade propicie a interação entre átomos pertencentes a corpos distintos. Forças de contato são, portanto, forças derivadas.

Para que haja interação entre os objetos, não há necessidade de que eles estejam próximos. Podem surgir forças entre objetos mesmo que eles estejam muito longe uns dos outros. São forças cuja ação se dá à distância. Nessa categoria estão algumas das forças fundamentais da natureza. É como se existisse algo que faz a ligação entre os objetos: um campo de forças. A noção de campo traz a possibilidade de tratar teoricamente, de forma adequada, as interações fundamentais. Por exemplo, para descrever a ação da atração gravitacional, diz-se que existe, numa região do espaço, um campo gravitacional. A força gravitacional está relacionada teoricamente a esse campo. Outro exemplo bastante familiar é o campo magnético. Todos já viram o

efeito do campo magnético da Terra sobre as agulhas das bússolas. É como se a Terra fosse um enorme ímã, cujo campo magnético agisse sobre outros ímãs existentes. Os campos, como o elétrico e o magnético, assim como as forças, são grandezas vetoriais.

6.2.2 O Diagrama de Corpo Livre (DCL)

A resolução de problemas de mecânica exige duas providências.

A primeira delas é identificarmos todas as forças que agem sobre um corpo. Para tanto, muito ajuda a elaboração do Diagrama de Corpo Livre (DCL). Nele apresentamos de forma esquemática todas as forças que agem sobre o corpo. No caso em que consideramos um conjunto de corpos interagindo entre si, devemos desenhar um DCL para cada corpo.

Num DCL devemos esquematizar cada uma das forças, indicando, sempre que possível, a direção e o sentido de cada força. A força gravitacional é presença obrigatória, tem sempre a direção de uma reta que passa pelo ponto onde está o móvel e o centro da Terra. O sentido é sempre do ponto até o centro.

Por exemplo: considere o caso de um livro apoiado sobre uma mesa. Nesse caso, pode ser útil elaborar os DCLs tanto do livro quanto da mesa. Veja a **Figura 6.2**:

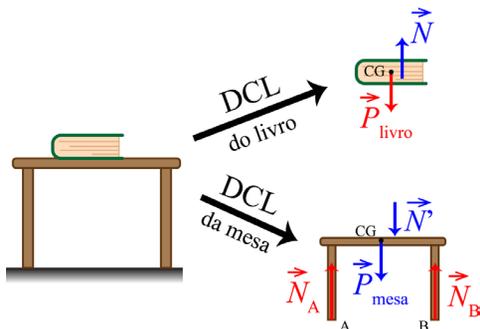


Figura 6.2: DCL de dois corpos em interação mútua.

DCL do livro

\vec{P}_{livro} = força peso agindo sobre o livro
 \vec{N} = reação normal da mesa sobre o livro

DCL da mesa

\vec{P}_{mesa} = força peso agindo sobre ela
 \vec{N}' = força normal, de reação do livro
 \vec{N}_A = reação normal do piso sobre o pé A
 \vec{N}_B = reação normal do piso sobre o pé B

Um DCL mais completo, e muito relevante na estática, envolve também a identificação de “torques” externos, ou seja, ações que envolvem a rotação de um objeto; por exemplo, mediante o uso de uma chave de fenda para fixar um parafuso.

Como se pode observar pelo exemplo acima, o DCL leva em conta todas as forças que atuam no objeto em estudo. Esse conhecimento é fundamental, por exemplo, para a análise do estado de equilíbrio, ou não, de um objeto.



Exemplos

• EXEMPLO 01:

Um bloco A, encostado em B, é empurrado por uma força horizontal de intensidade F . Ambos estão sobre uma mesa horizontal, conforme esquematizado na **Figura 6.3**. Nessas circunstâncias, desenhar o DCL de cada bloco.

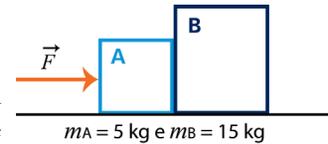


Figura 6.3: Blocos sendo empurrados por uma força externa a eles.

→ RESOLUÇÃO

Os blocos A e B interagem com a Terra (por meio da força peso) e com a mesa (forças normais e de atrito). Neste exemplo, os blocos A e B também interagem entre si, pois têm superfícies em contato. O bloco A é empurrado para a direita pela força \vec{F} e, por isso, o bloco A empurra o bloco B no mesmo sentido por meio de uma “força normal” $\vec{N}_{A/B}$. O bloco B reage a essa ação de A, nele exercendo uma força normal de reação $\vec{N}_{B/A}$. Importante lembrar: $\vec{N}_{A/B}$ é uma força aplicada em B, horizontal para a direita; enquanto $\vec{N}_{B/A}$ é uma força de reação aplicada em A. Essas forças têm intensidades iguais, sentidos opostos e suas direções repousam sobre uma mesma linha reta horizontal.

Levando-se em conta esses dados, obtemos os DCLs dos corpos A e B de acordo com as **Figuras 6.4a** e **6.4b**, respectivamente. As forças de atrito nos blocos atuam no sentido oposto ao movimento ou tendência de movimento. Por isso, elas são esquematizadas, em cada bloco, para a esquerda.

A segunda providência consiste em escolher um referencial cartesiano. Nesse referencial cartesiano, devemos agora determinar as componentes das forças.

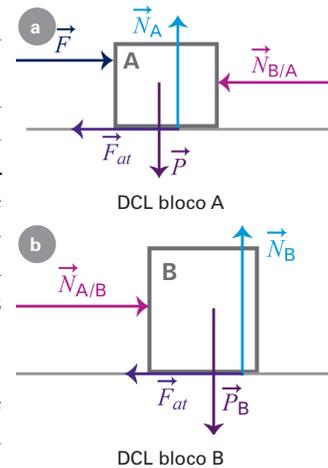


Figura 6.4: Diagramas de corpo livre dos blocos A e B.



6.3 A Força Gravitacional

O exemplo mais simples de força à distância, uma vez que faz parte do nosso cotidiano, é a força gravitacional. A queda dos objetos em direção à superfície terrestre ocorre devido à força gravitacional. Outro exemplo é o movimento de translação da Terra. A Terra mantém-se numa órbita elíptica em torno do Sol como resultado da

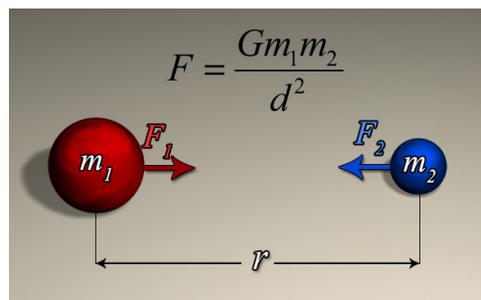


Figura 6.5: A Força gravitacional ocorre entre objetos dotados do atributo massa.

força gravitacional exercida pelo Sol sobre ela. A lei que rege o comportamento da interação gravitacional foi proposta por Newton. A interação gravitacional ocorre devido às massas dos objetos. Se dois objetos de massa m_1 e m_2 estiverem a uma distância d , surge entre eles uma força de atração (a força gravitacional) de tal forma que seu módulo é dado pela expressão:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{d^2} \quad 6.2$$

ou seja, a força gravitacional é diretamente proporcional às massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância. A constante G é conhecida como constante da gravitação universal e seu valor é:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \left(\frac{\text{m}}{\text{kg}} \right)^2 \quad 6.3$$

6.3.1 A Força peso

A força peso é o resultado da atração gravitacional exercida pela Terra não somente sobre os objetos localizados próximo à sua superfície, mas atuando também a longas distâncias. Trata-se de um exemplo, no cotidiano, de forças de ação à distância. O fato de os objetos caírem sobre a superfície terrestre é a consequência mais perceptível da força peso. Em geral, escreve-se a força peso sob a forma:

$$\vec{P} = m\vec{g} \quad 6.4$$

onde \vec{g} é o vetor aceleração da gravidade. Da expressão 6.2, segue-se que esta é dada, em módulo, pela expressão:

$$g = \frac{M_T}{R_T^2} G \quad 6.5$$

onde M_T e R_T são, respectivamente, a massa da Terra e o raio da Terra. Pode-se verificar experimentalmente que, em São Paulo, o valor aproximado de g é:

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad 6.6$$

Deve-se sempre levar em conta a presença da força peso. Geralmente, representamos a superfície da Terra como se fosse plana (o raio da Terra é tão grande que é assim que a percebemos). A força peso tem sempre o sentido apontado para o centro da Terra.

O valor de g em um ponto depende da distância desse ponto ao centro da Terra. Divulga-se que numa estação espacial praticamente não existe gravidade, mas, na verdade, ela existe; caso contrário, a estação não permaneceria em órbita. A aceleração da gravidade depende do inverso do quadrado da distância entre o ponto considerado e o centro da Terra.

○○○○

• EXEMPLO 02:

Qual o peso de um objeto com massa $m = 3,6$ kg localizado em um ponto na superfície da Terra?

→ RESOLUÇÃO

$$\text{Peso do objeto} = m \cdot g = (3,6 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2) = 35,28 \text{ newtons ou } 35,28 \text{ N}$$

Podemos ainda utilizar a unidade kgf.

$$\text{Peso} = 3,6 \text{ quilogramas-força (quilogramas-peso)} = 3,6 \text{ kgf}$$

Quando utilizamos o quilograma-força, basta considerar o valor numérico da massa e acrescentar a unidade kgf, ou seja, o peso de uma massa de 40 kg é $p = 40$ kgf. E assim por diante. A relação entre as duas unidades, para objetos na superfície terrestre, é:

$$1 \text{ kgf} \cong 9,8 \text{ newtons}$$

○○○○

6.3.2 Força Peso de um objeto extenso

Quando fazemos o Diagrama de Corpo Livre de um objeto extenso, em que ponto dele devemos colocar a força peso?

A resposta diz que o efeito da força gravitacional sobre um objeto extenso pode ser inteiramente caracterizado mediante a análise de um ponto nele localizado e denominado Centro de Gravidade.

Tudo se passa como se todo o Peso do corpo estivesse agindo sobre o Centro de Gravidade. Determiná-lo, no entanto, nem sempre é muito fácil.

Em objetos de formatos regulares e com distribuição de massa uniforme, o CG coincide com o centro geométrico. Caso contrário, o CG localiza-se em regiões do objeto que concentram mais massa.



• EXEMPLO 03:

A massa de um astronauta, com seus equipamentos, é $m = 200$ kg. Calcular o peso do astronauta:

- na superfície da Terra;
- na órbita da Estação Espacial Internacional.

→ RESOLUÇÃO

- Na superfície da Terra $\rightarrow g_0 = 9,8$ m/s². Logo,
 $p_0 = m \cdot g_0 = 200$ kg \cdot 9,8 m/s² = 1.960 newtons
 ou, simplesmente, 200 kgf.
- A Estação Espacial Internacional (ISS) tem órbita aproximadamente circular situada à altura $h \cong 400$ km. Logo, a distância até o centro da Terra de qualquer ponto desta órbita é $d = R + h \cong 6800$ km. Sendo $d = 6.800$ km = $6,8 \times 10^6$ m; $M_{\text{Terra}} = 6 \times 10^{24}$ kg e $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²/kg² tem-se:

$$g_d = \left[G \frac{M_{\text{Terra}}}{d^2} \right] \cdot g = \left[G \frac{M}{d^2} \right] = 8,65 \text{ m/s}^2$$

Assim, na órbita da Estação Espacial Internacional:

$$p_{(d=6800 \text{ km})} = 200 \text{ kg} \times 8,65 \text{ m/s}^2 = 1.730 \text{ newton}$$

O astronauta pesa 230 newtons menos do que na superfície terrestre:

$$\Delta p = p_{(d=6800 \text{ km})} - p_{(\text{superf. Terra})} = -230 \text{ newtons.}$$

A massa do astronauta e sem apetrechos é, ainda, 200 kg.

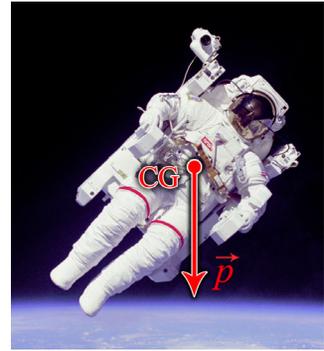


Figura 6.6: O peso pode ser considerado como uma força resultante aplicada no centro de gravidade CG do corpo.



6.4 As Forças Eletromagnéticas

Exceção feita à força gravitacional, que promove a atração dos objetos em direção ao centro da Terra, todas as demais forças relevantes no nosso mundo são forças de origem eletromagnética.

As forças elétricas e magnéticas são igualmente forças fundamentais. Conquanto não estejamos em condições ainda de nos darmos conta disso, o fato é que essas forças estão também presentes no cotidiano das pessoas e isso porque forças de atrito e reações normais às superfícies são forças que derivam das forças eletromagnéticas. porque são as forças entre os átomos (forças

interatômicas) que dão origem a algumas forças com as quais já estamos bastante familiarizados. No entanto, as forças entre os átomos e moléculas são forças elétricas. Dizemos que as forças interatômicas e intermoleculares derivam das forças eletromagnéticas.

6.4.1 Forças Elétricas

A força elétrica surge entre objetos dotados de carga elétrica. Se um corpo possui carga Q_1 e outro possui carga Q_2 , então surge uma força entre eles, cujo módulo é dado pela lei de Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{d^2} \quad 6.7$$

isto é, a força é diretamente proporcional às cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância. A constante de proporcionalidade é dada por:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \left(\frac{\text{m}}{\text{C}} \right)^2 \quad 6.8$$

A força elétrica tanto pode ser atrativa (se as cargas forem de sinais opostos) quanto repulsiva (cargas de mesmo sinal). A direção da força é a da reta que une as duas cargas.

No caso em que a partícula se move numa região na qual existe um campo elétrico \vec{E} , a força elétrica sobre uma partícula de carga Q é:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad 6.9$$

6.4.2 Forças Magnéticas

Uma partícula de carga q e dotada de velocidade \vec{v} , quando numa região onde existe um campo magnético \vec{B} , experimenta uma força \vec{F} , dita magnética, dada pela expressão:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad 6.10$$

O módulo dessa força, para uma carga positiva, é:

$$|\vec{F}| = q|\vec{v}||\vec{B}|\text{sen}\theta \quad 6.11$$

Em 6.11, θ é o ângulo formado entre \vec{v} e \vec{B} . A direção da força magnética é perpendicular ao plano formado pelos vetores velocidade e campo magnético. O sentido depende da carga elétrica. Se a carga q for positiva, o sentido é o mostrado na figura que ilustra a regra do saca-rolha (vide **Figura 6.7**). Se q for negativo, então a direção da força é a mesma e o sentido, oposto ao caso anterior.

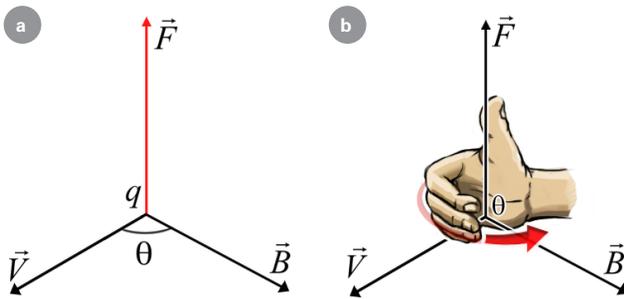


Figura 6.7: (a) Produto vetorial $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ para q positiva; (b) A maneira prática de se determinar o sentido de \vec{F} é por meio da “regra da mão direita”: com o dedos da mão direita procure levar o vetor \vec{v} até \vec{B} ; o sentido do vetor $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ (com $q > 0$) é dado pelo polegar da mão direita. Observação: sendo $q < 0$, o sentido de \vec{F} será o oposto da figura.

Se uma partícula estiver sujeita à ação de campos elétricos e magnéticos, podemos escrever para a força eletromagnética, utilizando a representação vetorial:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad 6.12$$

A força acima recebe o nome de força de Lorentz.

6.5 Forças de Contato

As forças entre os constituintes levam a diversos fenômenos, os quais nem sempre identificamos como simples movimentos. Por exemplo, no processo de transição entre o estado gasoso e o estado líquido, surgem forças entre as moléculas, provocando uma maior aproximação entre elas. Ao fazê-lo, promovem a formação de um aglomerado coeso de moléculas. A esse aglomerado

mais compacto damos o nome de líquido. Sabemos que as forças referidas acima, denominadas forças de Van der Waals, são forças derivadas das forças eletromagnéticas.

Vemos assim que as interações eletromagnéticas entre os constituintes da matéria dão origem a um número muito grande de forças. As ligações químicas, interpretadas como um tipo de força, têm uma origem eletromagnética.

Num curso básico de mecânica consideramos apenas algumas dessas forças derivadas. A seguir discutiremos algumas delas.

A **força de atrito**, muitas vezes, não é levada em conta nos problemas de mecânica. Trata-se de uma questão de simplificação dos problemas. Esta é uma força derivada da eletromagnética.

Em alguns casos, devemos levar em conta a **força elástica**.

Quando os corpos estão interligados por fios ou cordas, devemos considerar a **força tensora**. Ambas são forças derivadas.

Quando dois corpos estão repousando um sobre o outro, devemos nos lembrar da **força normal**. Ela é, igualmente, de origem eletromagnética. Seu entendimento apela para argumentos da Teoria Quântica.



Atenção

Quando dois objetos estão em “contato”, podemos prever forças resultantes desse contato. Entre elas, destacamos as forças elásticas, as forças de atrito, as forças normais e as forças aplicadas por fios e cordas. Estudaremos essas forças a seguir. Para o entendimento do surgimento dessas forças e de algumas das suas características, devemos recorrer às forças interatômicas e intermoleculares.

6.5.1 Força Normal

Um livro repousa sobre uma mesa. Isso ocorre porque a mesa exerce uma força sobre o livro. Essa força é perpendicular à mesa (tem a direção da reta perpendicular à superfície) e equilibra a força da gravidade (impedindo que o livro caia no chão). Esse tipo de força, que impede o movimento na direção perpendicular às superfícies, tem sempre essa direção. Como perpendicular, nesse caso, é sinônimo de normal, essa força tem o nome de força normal. Por isso, ela será indicada com a letra N .

Quais são as forças sobre um livro apoiado numa mesa?

De acordo com a **Figura 6.8**, as seguintes forças agem sobre ele:

\vec{P} = força peso (interação gravitacional)

\vec{N}' = força normal (força de contato que a mesa exerce no livro).

\vec{N} = força normal (força de contato que o livro exerce na mesa)

A força normal é a forma de a mesa (ou qualquer outra superfície) reagir (força de reação) a deformações ditas elásticas, provocadas por objetos colocados sobre ela. Sua origem é de natureza elétrica: as forças interatômicas.

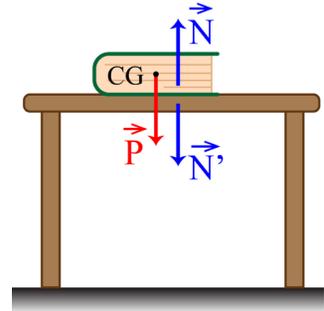


Figura 6.8: Forças atuando sobre o livro.

A força normal é interpretada como resultado da impenetrabilidade da matéria. Ela impõe, portanto, limites à compressão da matéria, pois atua como uma força de repulsão dos átomos.

6.5.2 Força de Atrito

Força de atrito designa um tipo de força cuja ação é resistir aos movimentos relativos que envolvem deslocamentos tangenciais de superfícies sólidas, camadas de um fluido ou corpos materiais em contato.

Distinguem-se dois tipos de atrito:

- **Atrito seco** é aquele associado à resistência ao movimento tangencial de duas superfícies sólidas em contato.
- **Atrito viscoso** está associado ao deslizamento de uma camada de fluido (ar ou líquido) sobre outra.

Atrito Seco

Podemos perceber a existência da força de atrito e entender algumas de suas características por meio de uma experiência muito simples. Tomemos uma caixa bem grande, colocada no solo, contendo madeira.

À medida que se retirar madeira do interior da caixa e, portanto, à medida que ela ficar mais leve, atinge-se uma condição limite, na qual a caixa começa a deslizar sobre o solo.



Caixa pesada (com muita madeira)
Mais difícil de ser deslizada

Caixa mais leve (com pouca madeira)
Mais fácil de ser deslizada

Figura 6.9: Exemplos da atuação da força de atrito.

A dificuldade de mover caixas ou arrastar objetos localizados no solo deve ser creditada ao surgimento de uma força – a força de atrito (\vec{F}_{at}) –, que atua no sentido de impedir ou dificultar o deslizamento da caixa sobre o solo.

A intensidade da força de atrito depende da intensidade da força normal \vec{N} que comprime a superfície da caixa contra o solo; por isso, é mais fácil mover a caixa com menos madeira no seu interior. O DCL da caixa identifica as forças que nela atuam:

DCL da caixa no qual destacamos as forças:

\vec{F} = força da mão sobre a caixa

\vec{P} = força peso

\vec{N} = força normal (do solo sobre a caixa)

\vec{F}_{at} = força de atrito seco (do solo sobre a caixa) \vec{F}_{at}

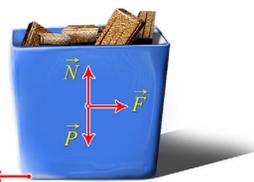


Figura 6.10: A força \vec{F} (aplicada pela pessoa) tende a deslizar a caixa para a direita; a força de atrito \vec{F}_{at} na caixa atua no sentido de impedir o deslizamento.

O atrito seco, ou simplesmente atrito, pode ser subdividido ainda em:

- **Atrito estático:** aquele que vigora entre duas superfícies secas, antes do início do deslizamento relativo entre elas.
- **Atrito dinâmico:** aquele que vigora durante o deslizamento relativo entre duas superfícies secas em contato.

6.5.2.1 Intensidade da Força de Atrito

Sobre o módulo da força de atrito, cabem aqui alguns comentários, pois tudo depende de estarmos falando do atrito estático ou dinâmico. Eles são separados por uma situação que denominamos iminência de deslizamento entre as superfícies. No exemplo anterior, ela ocorre quando a caixa está a ponto de iniciar o deslizamento.

Enquanto a força aplicada F for pequena, a caixa permanece parada; nessa condição, a força de atrito recebe o nome de “**força de atrito estático**”, cujo módulo $F_{\text{at estático}} = F$. Se F crescer, a $F_{\text{at estático}}$ crescerá na mesma proporção; porém, o crescimento da $F_{\text{at estático}}$ tem um limite superior que é atingido quando a caixa estiver na “iminência de deslizar”. Esse valor limite é a **força de atrito estático máxima**, símbolo: $F_{\text{at max}}$.

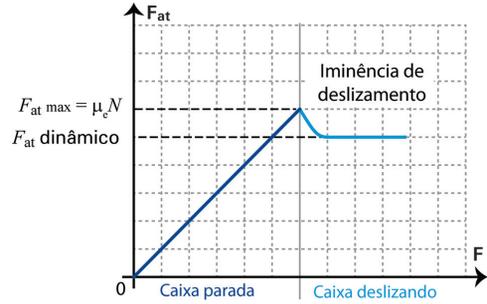


Gráfico 6.1: Comportamento típico da força de atrito.

A força de atrito estático varia desde o valor 0 (quando $F = 0$) até o valor máximo, ou seja, $0 \leq F_{\text{at estático}} \leq F_{\text{at max}}$. A experiência mostra que a $F_{\text{at max}}$ depende da força normal N que comprime as superfícies. Assim:

$$F_{\text{at max}} = \mu_e N$$

6.13

O coeficiente μ_e é conhecido como **coeficiente de atrito estático**, que depende dos materiais das superfícies em contato. Uma vez iniciado o deslizamento, a força de atrito sobre a caixa apresenta uma pequena queda e mantém-se praticamente constante, passando a ser denominada **força de atrito dinâmico**, assim expressa:

$$F_{\text{at din}} = \mu_d N$$

6.14

onde μ_d = coeficiente de atrito dinâmico. Em geral, os dois coeficientes não são iguais e a seguinte desigualdade se aplica:

$$\mu_e \geq \mu_d$$

6.15

refletindo o fato de que a força de atrito é ligeiramente maior quando o corpo está na iminência de deslizar do que quando ela está em movimento (atrito cinemático ou dinâmico). Não há uma explicação para esse fato.



• EXEMPLO 04:

A **Figura 6.11** ilustra uma pessoa parada em cima de uma rampa cujo piso é de cimento áspero. Desenhar o DCL da pessoa.

→ RESOLUÇÃO

Sobre a referida pessoa atuam três forças:

- I. A força peso \vec{P} (vertical para baixo).
- II. As forças de contato entre o sapato (ou os pés) e a rampa, ou seja, a força normal \vec{N} e a força de atrito \vec{F}_{at} (tangencial às superfícies em contato e oposto à tendência de deslizamento).

Confira essas forças no DCL da **Figura 6.12**.

As forças \vec{N} e \vec{F}_{at} atuam na sola do sapato ou no pé; as reações a essas forças aplicam-se na rampa em sentido contrário. Como a pessoa se encontra em repouso em cima da rampa, a força de atrito é do tipo “força de atrito estática”.

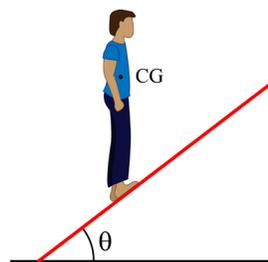


Figura 6.11: Pessoa em repouso sobre um plano inclinado.

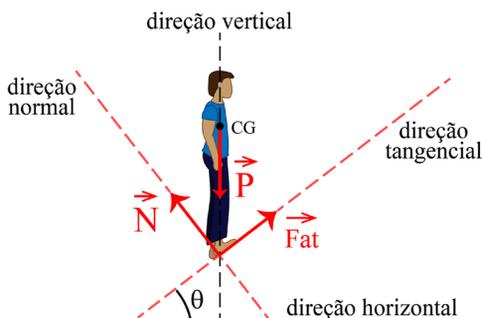


Figura 6.12: DCL: forças externas sobre o corpo da pessoa.



6.5.3 Força Tensora

Fios que interligam ou acoplam os objetos impõem restrições ao seu movimento. Disso resulta uma força, chamada tensora, ao longo do fio. Designaremos essa força tensora abreviadamente por tensão e utilizaremos a letra T para representá-la. A tensão T (a força tensora) tem a direção do fio. Ela é de origem eletromagnética. Ao puxarmos uma corda tendemos a afastar os elementos dos quais ela é constituída, os átomos.



• EXEMPLO 05:

A **Figura 6.13** ilustra um bloco B, suspenso por um fio que o liga a outro bloco A, apoiado num plano horizontal. O fio passa por uma polia leve e sem atrito no mancal. O sistema encontra-se em repouso. Esquematizar os DCLs de cada bloco e da polia.

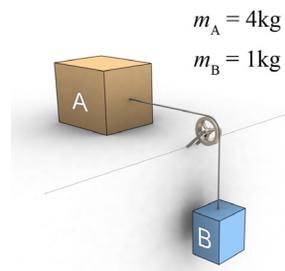


Figura 6.13: Dois blocos em contato por meio de um fio.

→ RESOLUÇÃO

A força tensora no fio tem intensidade T . Assim, o bloco A é puxado pelo fio horizontalmente para a direita com força tensora $T_A = T$ (por isso, o bloco tende a deslizar para a direita). O bloco B é puxado verticalmente para cima por meio da força tensora $T_B = T$.

DCL dos blocos:

O bloco A está sujeito a quatro forças: a força tensora $T_A \equiv T$; a força peso P_A ; a força normal N e a força de atrito F_{at} (para a esquerda, pois o bloco tende a deslizar para a direita).

O bloco B está sujeito a duas forças: o peso P_B (vertical para baixo) e a força tensora $T_B = T$ (vertical para cima).

O resultado é apresentado na **Figura 6.14**.

DCL da polia:

Admitindo-se que a polia seja leve (adotamos a polia considerada sem massa) e sem atrito no eixo, ela não altera a intensidade da força tensora. Mudando a direção do fio, ela apenas muda a sua direção da força tensora. No ramo horizontal do fio, próximo à polia, a força tensora é horizontal para a esquerda; no ramo vertical, a força tensora é vertical para baixo. Essas duas forças acionam a polia para baixo e para a esquerda, o eixo (que é fixo no suporte) reage exercendo sobre a polia a força \vec{F} . Vide **Figura 6.15**.

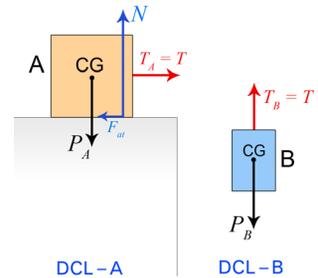


Figura 6.14: DCL dos Blocos.

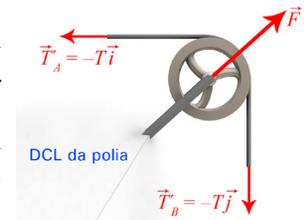


Figura 6.15: DCL da polia.

6.5.4 Forças Elásticas

A força elástica resulta de pequenos deslocamentos (aproximando ou afastando) dos átomos das posições de equilíbrio (posições nas quais as forças experimentadas pelos átomos se anulam).

A relação entre a quantidade de deformação produzida num objeto e a intensidade da força aplicada a ele é descrita pela lei de Hooke (Robert Hooke, cientista experimental inglês, 1635-1703), que, observando o comportamento mecânico de uma mola, descobriu que as deformações elásticas obedecem a uma lei muito simples: “A intensidade da força deformante (que produz a deformação) é proporcional à deformação produzida”. Vamos aplicar essa lei a uma mola helicoidal. Nesse caso, o efeito pode ser de tração ou de compressão, como ocorre com os amortecedores de carros.

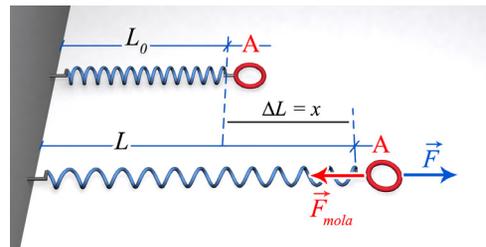


Figura 6.16: Atuação da força deformante.

O anel preso à extremidade livre da mola é tracionado pela força \vec{F} (força deformante); como consequência, a deformação produzida é

$$x = \Delta L = L - L_0 \quad 6.16$$

onde L = comprimento final e L_0 = comprimento natural da mola.

A força deformante, segundo Hooke, é diretamente proporcional à deformação $\Delta L = x$ produzida na mola. Assim sendo,

$$F = k \cdot x \text{ (força deformante).}$$

A constante k – chamada constante da mola – é um atributo da mola. Conhecidos F e x , a constante da mola é assim determinada: $k = F/x$. A unidade de k depende das unidades com as quais F e x são medidos. No SI, a unidade de (k) = newton/metro = N/m.

E a força exercida pela mola?

Como o anel é puxado para a direita, a mola reage puxando-o para a esquerda com força \vec{F}_{mola} .

Essa expressão traduz que a força da mola é sempre oposta à deformação x .

Por isso, costuma-se expressar a força da mola em sua forma vetorial. De acordo com o referencial da **Figura 6.17**, escrevemos:

$$\vec{F}_{\text{mola}} = -kx \cdot \vec{i} \quad 6.17$$

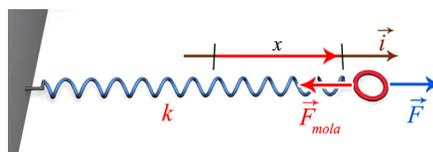


Figura 6.17: Exemplo de força deformante.

○○○○

• EXEMPLO 06:

Uma mola pende de um anteparo. Em sua extremidade livre, pendura-se um objeto de massa $m = 6$ kg. Nessa circunstância, ela se alonga 2 cm, atingindo o ponto de equilíbrio.

- a. Qual é a constante elástica da mola?
- b. Num segundo estágio, puxa-se a massa para baixo até que a deformação da mola seja $x = 3,2$ cm. Nesse caso, calcule a força com que a massa foi puxada.

→ RESOLUÇÃO

- a. A força que alonga a mola é o peso do objeto. Adotando $g = 10 \text{ N/kg}$, o peso do objeto é $p = mg = 6 \times 10 = 60 \text{ N}$. Logo,

$$F = k \cdot x \rightarrow k = F/x \rightarrow k = (mg)/x = 60 \text{ N}/2 \text{ cm} = 30 \text{ N/cm} \text{ ou } k = 3000 \text{ N/m}.$$

- b. A força necessária para produzir na mola uma deformação $x' = 3,2 \text{ cm}$ é

$$F' = kx' = 30(\text{N/cm})(3,2 \text{ cm}) = 96 \text{ N}.$$

Para compor essa força, a força gravitacional sobre a massa contribui com $p = 60 \text{ N}$. Logo, é necessário puxar a massa com força de intensidade $F'' = 96 - 60 = 36 \text{ N}$.

○○○○

6.6 Forças sobre um objeto num fluido

Fluido é a denominação que se dá para substâncias que têm a qualidade de fluir. Assim, todos os gases e todos os líquidos são genericamente denominados fluidos.

Os fluidos não têm uma forma bem definida. Amoldam-se aos seus continentes. Deformam-se facilmente.

6.6.1 Empuxo

Um objeto imerso num fluido experimentará a ação de uma força exercida sobre ele como resultado das diferenças de pressão dentro do fluido. Essa força recebe o nome de empuxo e sua descoberta se deve a Arquimedes.

Como já percebera Arquimedes, o empuxo é igual ao peso do líquido deslocado. Verificou ele que uma coroa pesa mais no ar do que quando imersa em um líquido.

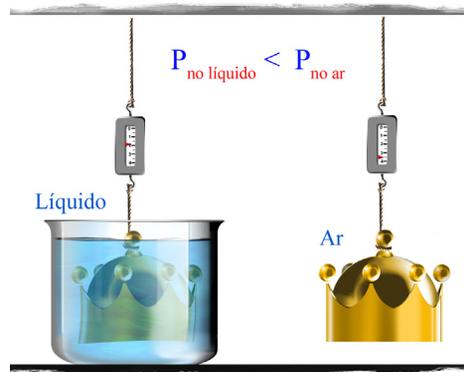


Figura 6.18: Experimentos de Arquimedes.

$$\Delta P = P_{(\text{no ar})} - P_{(\text{no líquido})}$$

6.18

O empuxo é uma força que age sobre uma peça imersa em um fluido qualquer, e tem a mesma direção que a força peso, portanto, direção vertical, mas sentido contrário ao do peso.

O módulo do empuxo é obtido pelo peso do volume do líquido deslocado:

$$E_m = \rho_f V_d \cdot g$$

6.19

onde E_m = peso do volume do fluido deslocado = $m \cdot g = \rho_f V_d \cdot g$ e ρ_f é a densidade ou massa específica do fluido (expressa em kg/m^3); V_d = volume do fluido deslocado (em m^3) e g é a aceleração da gravidade (em N/kg).

O método descoberto por Arquimedes, baseado na diferença de pesos aparentes, aplica-se a objetos com formas geométricas irregulares e permite obter a densidade através do seu peso aparente imerso em água, e do peso quando imerso em ar.

○○○○○

• EXEMPLO 07:

A **Figura 6.19** ilustra um sólido pendurado em um fio e imerso (totalmente) numa cuba de água.

- Desenhar o DCL do sólido.
- O volume do sólido é $V = 100 \text{ cm}^3 = 10^{-4} \text{ m}^3$, a densidade da água é $\rho_{\text{água}} = 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ e a aceleração da gravidade é $g \cong 10 \text{ N}/\text{kg}$. Calcular o empuxo da água sobre a peça imersa.
- Qual é o peso aparente do sólido quando imerso na água, se sua massa é $m = 0,27 \text{ kg}$?

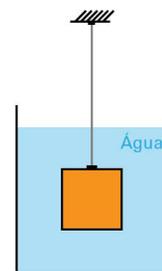


Figura 6.19: Um objeto sólido imerso na água.

→ RESOLUÇÃO

- Sobre o sólido atuam as seguintes forças: a força peso \vec{P} ; a tração do fio \vec{T} e o empuxo da água \vec{E}_m .

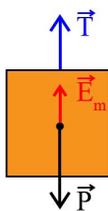


Figura 6.20: DCL do sólido.

- $E_m = \rho_f V_d \cdot g = (10^3 \text{ kg}/\text{m}^3)(10^{-4} \text{ m}^3)(10 \text{ N}/\text{kg}) = 1 \text{ newton}$.

Essa força corresponde ao peso do volume de água deslocada pela imersão do sólido e age verticalmente para cima.

- O peso aparente na água é dado por:

$$P_{\text{no líquido}} = m \cdot g - E_m = (0,27 \text{ kg}) \times (10 \text{ N}/\text{kg}) - 1 \text{ newton} = 1,7 \text{ newton}.$$

O sólido, cujo peso é 2,7 newtons (no ar), aparenta ter apenas 1,7 newtons de peso quando imerso na água. Isso ocorre porque a resultante das forças exercidas pela água nas superfícies do sólido (Empuxo) é vertical para cima com módulo $E_m = 1$ newton.



6.6.2 Força Viscosa

Um objeto, ao se movimentar em um líquido viscoso, experimenta a ação de uma força que se opõe ao movimento. Essa força tem a característica de depender da velocidade da partícula. Quanto maior a velocidade da partícula, tanto maior será a intensidade da força exercida pelo fluido viscoso.

No caso de uma esfera de raio a , Stokes demonstrou que, dentro de uma boa aproximação, podemos escrever em módulo:

$$F = -6\pi\eta a v \quad 6.20$$

onde η é o coeficiente de viscosidade do líquido e v , a velocidade da partícula. O sinal negativo indica que o sentido da força é oposto ao da velocidade. A direção da força é a mesma que a da velocidade.

Para objetos com outras formas geométricas, a expressão não é tão simples. Ainda assim, dentro de uma boa aproximação, podemos escrever:

$$F = -bv \quad 6.21$$

onde b depende da geometria do objeto, da área em contato e do coeficiente de viscosidade do fluido.

O aparecimento dessas forças pode ser ilustrado por meio de dois exemplos muito simples. O primeiro é o caso de uma esfera em movimento em um líquido viscoso. Nesse caso, uma esfera de raio $R = a$ e massa m é abandonada na superfície de óleo de cozinha contida num cilindro.

Sobre a esfera atuam: a força peso \vec{P} (vertical para baixo); o empuxo \vec{E}_m (vertical e sentido para cima) e a força de atrito viscosa \vec{F} (oposta à velocidade \vec{v} , portanto, nesse caso, vertical para cima).

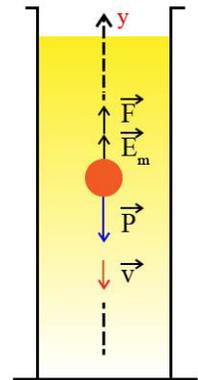


Figura 6.21: Movimento uniforme num líquido viscoso.

Nota-se que uma esfera em queda em um líquido se acelera até certo ponto. A partir de certa distância, a esfera tem velocidade constante v porque a força viscosa mais o empuxo equilibram a força peso. Nessas condições, tem-se para suas componentes verticais:

$$F + E_m = P$$

ou seja:

$$6\pi\eta_{\text{óleo}}av + \rho_{\text{óleo}}V_{\text{óleo}} \cdot g = m \cdot g$$

6.22



O outro é o movimento de um paraquedas.

O ar é também um fluido. O paraquedista, a partir de certo tempo, cai com velocidade constante. Quando a sua queda for com $v = \text{constante}$, o peso é equilibrado pela força viscosa cujo módulo é $F = b \cdot v$ e nessas condições:

$$mg = bv$$

Figura 6.22: Por causa da resistência do ar, um paraquedas desce com velocidade constante.

○○○○



Agora é sua vez...

Accesse o Ambiente Virtual de Aprendizagem e realize a(s) atividade(s) proposta(s).