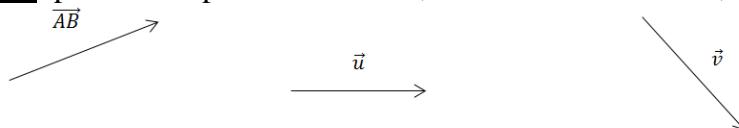


Dinâmica é a parte da Mecânica que estuda as causas dos movimentos dos corpos. Isaac Newton (1643-1727) foi a primeira pessoa a publicar sobre este tema. Físico, astrônomo e matemático inglês, é reconhecido como um dos cientistas mais influentes de todos os tempos e como figura-chave na Revolução Científica. Viveu e trabalhou nos domínios da Inglaterra. Seus trabalhos sobre a formulação das três leis do movimento levaram à lei da gravitação universal. A composição da luz branca conduziu à moderna física óptica. Na matemática ele lançou os fundamentos do cálculo infinitesimal.

Iniciaremos o estudo de dinâmica, recordando vetores.

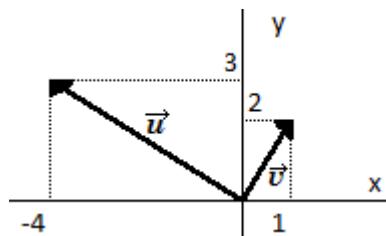
Vetor: (do latim *vector* = condutor) é um símbolo físico-matemático utilizado para representar o módulo, a direção e o sentido de uma grandeza física vetorial. Toda grandeza vetorial, é representada por um vetor, o qual, geometricamente, é um conjunto de segmentos orientados, os quais possuem mesmo comprimento (módulo ou norma), mesma direção e mesmo sentido, a essas três características, chamamos equipolência.

Representação de um vetor: podemos representar vetores, usando \overrightarrow{AB} ou \vec{u} ou \vec{v} , etc., conforme abaixo:



Todo vetor é considerado **livre**, ou seja, pode ser transportado, desde que se respeite a equipolência (módulo, direção e sentido).

Veja abaixo a construção geométrica dos vetores $\vec{u} = (-4, 3)$ e $\vec{v} = (1, 2)$:



Essa maneira de construir vetores, tomando a origem do sistema cartesiano como origem do vetor, nos fornece o módulo (tamanho), direção e sentido do vetor, o qual depois de construído pode ser transportado, respeitando a equipolência.

Operações com Vetores

Quando executamos uma operação com vetores, podemos chamar o valor final obtido de resultante \vec{R} . Nos exemplos abaixo, vamos considerar os vetores como forças (em Newton), dessa forma teremos uma Força resultante F_r .

Exemplos:

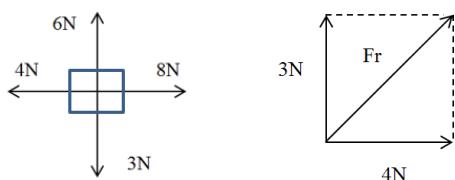
1) **Vetores na mesma direção e sentido** somam-se:

$$-5\text{N} \longrightarrow -4\text{N} \longrightarrow = -9\text{N} \longrightarrow \text{(Força resultante)}$$

2) **Vetores na mesma direção e sentidos opostos** subtraem-se:

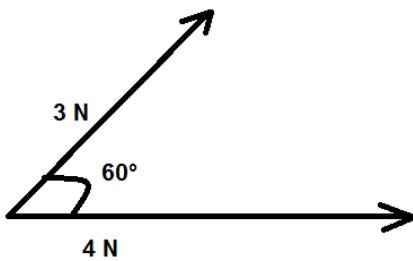
$$-4\text{N} \longrightarrow -5\text{N} \longleftarrow = -1\text{N} \longleftarrow \text{(Força resultante)}$$

3) **Vetores perpendiculares** (formando ângulo de 90°), resolve-se pelo Teorema de Pitágoras ($F_r^2 = a^2 + b^2$).



Resposta: Direção inclinado, sentido do sudoeste para o nordeste, com força resultante $Fr = 5N$ (módulo)

- 4) Vetores formando ângulos diferentes de 90° , resolve-se pela lei dos cossenos, alterando o sinal de $-$ para $+$ ($Fr^2 = a^2 + b^2 + 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos\alpha$)



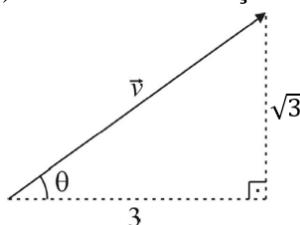
$$Fr^2 = 3^2 + 4^2 + 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \cos 60^\circ$$

$$Fr^2 = 9 + 16 + 24 \cdot \frac{1}{2}$$

$$Fr^2 = 37$$

$$Fr = \sqrt{37} \text{ N}$$

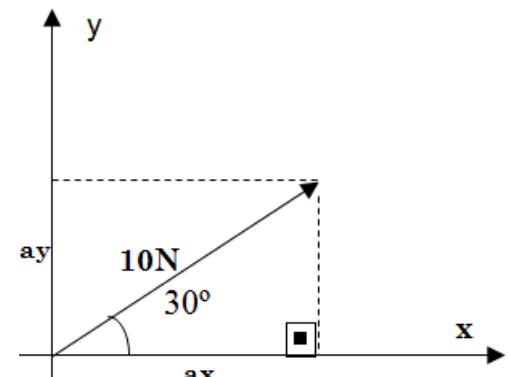
- 5) Determine a direção do vetor \vec{v} caracterizada pelo ângulo θ (teta):



$$\tan \theta = \frac{\sqrt{3}}{3}, \text{ logo, } \theta = 30^\circ$$

- 6) Calcule o módulo das componentes horizontal (a_x) e vertical (a_y) da força resultante \vec{a} de módulo 10 N.

Respostas: $a_x = 5\sqrt{3}$ e $a_y = 5$



Após recordarmos o estudo de vetores, vamos iniciar o estudo de dinâmica, onde é importante definirmos:

Força (F): são interações entre corpos, que causam variações no seu estado de movimento ou uma deformação no corpo. É caracterizada por uma intensidade (módulo), uma direção e um sentido, sendo assim uma grandeza vetorial. A unidade de medida de força no S.I. é o newton: N.

Força resultante (Fr): é a força (única) que substitui todas as forças aplicadas sobre um corpo e produz sobre esse corpo o mesmo efeito de todas as outras forças. Pode ser representada pela soma vetorial de todas as forças que atuam sobre um corpo.

Inércia: é a tendência que os corpos tem em permanecer no seu estado de movimento, ou seja: se o corpo está em repouso, ele tende a permanecer em repouso e se está em movimento, ele tende a permanecer em movimento.

Massa (m): a massa de um corpo é a quantidade de inércia que ele possui. Está diretamente associada à quantidade de matéria (átomos) que o corpo possui. Quanto mais matéria, maior a inércia do corpo.

AS TRÊS LEIS DE NEWTON

As leis de Newton são conhecidas como princípios basilares da mecânica clássica (também conhecida como mecânica newtoniana), que aborda o movimento e suas causas. Essas três leis possibilitam e constituem a base primária para compreensão dos comportamentos estático e dinâmico dos corpos materiais. As três Leis de Newton estudam:

- 1^a lei: comportamento de um corpo livre da ação de forças;
- 2^a lei: comportamento de um corpo ao receber a ação de uma força;
- 3^a lei: como os corpos trocam forças entre si.

1^a LEI DE NEWTON (Princípio da Inércia)

A 1^a Lei de Movimento de Newton, aplicada a partículas (pontos materiais), estabelece o comportamento de uma partícula quando estiver livre de forças. A 1^a Lei de Newton pode ser enunciada da seguinte maneira:

Todo corpo permanece em estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar aquele estado por forças que atuem sobre ele.



O menino possui uma determinada massa, logo tem obrigatoriamente uma inércia. Assim, a sua inércia faz com que ele continue a se movimentar, fazendo com que continue a ir para frente, mesmo sem a bicicleta.

Exemplos:

- 1) Um passageiro encontra-se em pé num ônibus em repouso. Quando o ônibus parte do repouso e atinge uma certa velocidade, o passageiro:
 - a) poderá cair para frente por que o ônibus torna-se acelerado.
 - b) paderá cair para trás para tentar manter-se em repouso.
 - c) só cairá para frente se o ônibus atingir uma velocidade muito alta.
 - d) cairá para frente independente de velocidade.
- 2) Ao empurrar um objeto sobre um plano horizontal tão polido que não oferece nenhuma oposição ao movimento, ele se movimenta com uma certa intensidade. No momento em que é solto, o objeto:
 - a) para imediatamente.
 - b) diminui a intensidade da sua velocidade até parar.
 - c) continua se movimentando, mantendo constante a sua velocidade vetorial.
 - d) para após uma repentina diminuição da intensidade de sua velocidade.
- 3) As estatísticas indicam que o uso do cinto de segurança deve ser obrigatório para prevenir lesões mais graves em motoristas e passageiros no caso de acidentes. A função do cinto está relacionada com a 1^a Lei de Newton, pois:
 - a) como explica a lei da inércia, os corpos em movimento tendem a permanecer em movimento. Por este motivo se faz necessária a utilização do cinto de segurança, para que o corpo não seja jogado para frente quando o carro freia bruscamente, mantendo, dessa forma, o corpo preso ao banco do carro.

- b)** a velocidade do passageiro vai diminuindo junto com a velocidade do carro.
c) a velocidade do passageiro independe da velocidade do carro.
d) os corpos em movimento tendem a não permanecer em movimento.

4) Um automóvel viaja com velocidade constante de 72km/h em um trecho retilíneo de estrada. Pode-se afirmar que a resultante das forças que agem sobre o veículo:

- a)** é igual a força de atrito que age sobre o veículo. **b)** é desconhecida, pois há falta de dados.
c) nunca é nula. **d)** é nula.

5) No arremesso de peso, um competidor gira o corpo rapidamente e depois abandona o peso. Desprezando a resistência do ar, a trajetória do corpo após abandonado pelo esportista será:

- a)** reta. **b)** espiral. **c)** circular. **d)** parabólica.

6) Um carro freia bruscamente e o passageiro bate com a cabeça no vidro do para-brisa. Três pessoas dão as seguintes explicações para o fato:

- 1º o carro foi freado, mas o passageiro continuou em movimento.
2º o banco do carro impulsionou a pessoa para frente no instante da freada.
3º o passageiro só continuou em movimento porque a velocidade era alta e o carro freou bruscamente.
Podemos concordar com:

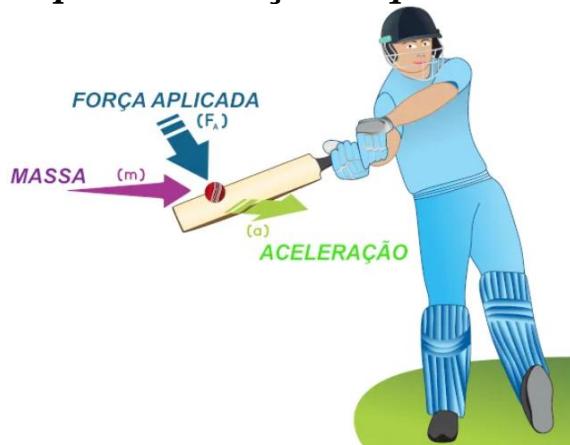
- a)** apenas a 2ª pessoa. **b)** apenas a 1ª pessoa. **c)** a 1ª e a 2ª pessoa. **d)** a 1ª e a 3ª pessoa.

Respostas: 1)b 2)a 3)a 4)d 5)a 6)b

2ª LEI DE NEWTON (Princípio Fundamental da Dinâmica)

A 2ª Lei de Movimento de Newton procura estabelecer o comportamento de uma partícula ao receber uma força. E pode ser enunciada como:

A resultante das forças aplicadas a um corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração adquirida.



É expressa matematicamente por:

$$\mathbf{Fr} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

Onde: **Fr** = força resultante (N);
m = massa da partícula (Kg);
a = aceleração adquirida através da aplicação da força (m/s^2).

Através da Segunda Lei de Newton podemos concluir que uma força, quando aplicada sobre um corpo (em certas situações), pode alterar a velocidade desse corpo. Por exemplo, um corpo parado pode começar a se movimentar ou um corpo que estava em movimento pode parar de se movimentar. Como essa força aplicada

sobre o corpo causa uma variação na sua velocidade, surge uma aceleração que atua sobre o corpo e será diretamente proporcional à massa do corpo.

Exemplos:

1) Um corpo de massa 5kg adquire uma aceleração de 2m/s^2 . A intensidade da força que atua sobre o corpo, em N, vale:

2) Um corpo de massa 5kg sofre a ação de uma força resultante de 10N. A aceleração do corpo, em m/s^2 , vale:

3) Um corpo, sob a ação de uma força resultante de 200N, adquire uma aceleração de 8m/s^2 . A massa desse corpo, em kg, vale:

4) Um corpo de massa 2kg, apoiado sobre um plano horizontal sem atrito, sofre a ação de duas forças horizontais (F_1 e F_2) de intensidade 10N e 4N respectivamente, conforme indica a figura abaixo. Determine a aceleração adquirida pelo corpo.



5) Um bloco de massa 4Kg que desliza sobre um plano horizontal sem atrito está sujeito à ação das forças F_1 e F_2 , conforme a figura abaixo. Sendo a intensidade da força $F_1 = 15\text{N}$ e $F_2 = 5\text{N}$, determine a aceleração do corpo.



6) Um carro de massa 1200Kg desliza sobre um plano horizontal sem atrito, sujeito à ação das forças F_1 e F_2 , conforme a figura abaixo. Sendo a intensidade da força $F_1 = 200\text{N}$ e $F_2 = 2600\text{N}$, determine a aceleração do corpo.



7) Um corpo de massa igual a 4kg se desloca num plano horizontal, sem atrito, sob a ação de uma força constante. Sua velocidade aumenta de 2m/s em 4s. A intensidade da força que atua sobre o corpo, em N, vale:

Respostas: 1)10N 2)2 3)25 4)3 m/s^2 5)2,5 m/s^2 6)2 m/s^2 7)2

Peso (P): o peso de um corpo é uma força de atração gravitacional. Por exemplo, a Terra exerce uma força de atração gravitacional sobre os corpos próximos a ela com aceleração local da gravidade de aproximadamente $9,8\text{ m/s}^2$, mas, vamos considerar esse valor como sendo igual a 10m/s^2 , para facilitar os cálculos. A força peso é expressa matematicamente por:

$$\mathbf{P} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g}$$

Onde: \mathbf{P} = peso do corpo (N);

\mathbf{m} = massa do corpo (Kg);

\mathbf{g} = aceleração local da gravidade (m/s^2).

A Força Peso também pode ser medida em quilograma-força (kgf). Esta unidade é definida pelo peso de um corpo de massa 1 kg em um local de aceleração aproximada da gravidade $g = 9,8\text{ m/s}^2$. Logo:

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

Ou seja, um corpo de massa 1 kg pesa 1 kgf; outro de massa 2 kg pesa 2 kgf e assim por diante.

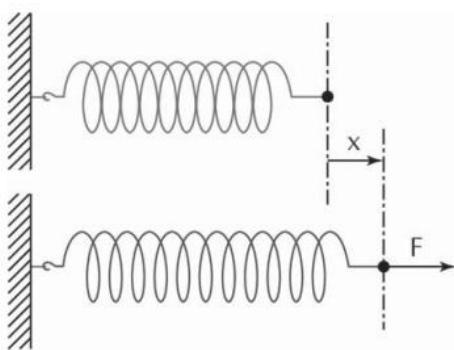
ATENÇÃO: Peso e massa são grandezas diferentes. Massa é uma propriedade exclusiva do corpo, não dependendo do local onde está sendo medida. Peso é uma grandeza que está associada à aceleração da gravidade e, portanto, seu valor dependerá do local onde está sendo medido. A massa é a mesma em qualquer lugar do universo (massa não muda) já o peso varia conforme a aceleração da gravidade existente em cada local. É muito comum dizermos que alguém pesa um determinado valor em quilogramas. Na verdade, esse modo de expressão não é correto, pois o peso é uma grandeza vetorial, uma força. Estará correto se dissermos o valor em quilograma-força (kgf). Quando usamos quilograma, estamos nos referindo a uma grandeza escalar que é a massa, ou seja, a medida quantitativa da resistência à aceleração, a inércia.

Exemplos:

- 1) Determine o peso de um corpo de massa de 70kg, considerando $g = 10\text{m/s}^2$.
- 2) Calcule a massa de um corpo que possui peso de 20.000 N, considerando $g = 10\text{m/s}^2$.
- 3) Calcule o peso, na Terra ($g = 10\text{m/s}^2$), dos seguintes corpos:
 - a) um automóvel de massa 1.000Kg;
 - b) uma moto de massa 150Kg;
 - c) uma carreta carregada, de massa total 50 toneladas.
- 4) Considerando a aceleração da gravidade como 10m/s^2 , e uma força peso de 1000N, determine a massa do corpo.
- 5) Suponha que você esteja em um local onde a aceleração da gravidade tem valor igual a $g = 9,80\text{m/s}^2$. Sendo assim, o peso de um corpo, em unidade kgf, que possui massa igual a 4kg é:
- 6) O primeiro satélite artificial foi lançado no espaço pela exUnião Soviética, em 1957, ele chamava-se Sputnik e sua massa era de 83kg. Considerando a aceleração da gravidade como $9,80\text{m/s}^2$, a força gravitacional exercida pela Terra sobre o satélite quando ele se encontra na superfície da Terra, em newtons, é:
- 7) Um astronauta com o traje completo tem massa de 120kg. Ao ser levado para a Lua, onde a aceleração da gravidade é igual a $1,6\text{m/s}^2$, a sua massa e seu peso serão, respectivamente:

Respostas: 1) 700 N 2) 2.000 kg 3)a) 10.000 b) 1.500 N c) 500.000 N 4) 100N 5) 4kgf 6) $813,4\text{N}$ 7) 120kg e 192N

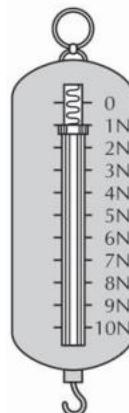
Força Elástica (Fel): também conhecida como força deformadora ou **Lei de Hooke**, em homenagem a Robert Hooke (1635-1705), cientista inglês. Quando aplicamos uma força em um ponto material, o único efeito que observamos é a aceleração. Quando o corpo é extensível, podemos observar outro efeito além da aceleração: a deformação do corpo. Há vários fenômenos nos quais o efeito mais importante é a deformação, como no caso das molas. Robert Hooke experimentou a aplicação de forças em molas e verificou que a deformação sofrida pela mola (diminuição ou aumento de seu comprimento inicial) era diretamente proporcional à força aplicada, até um certo limite. Denomina-se como objeto elástico aqueles que mudam de forma ao aplicarmos uma força sobre eles e que voltam a assumir sua forma original ao cessarmos a ação da força. Um exemplo de corpo elástico é a **mola**. Quanto mais esticamos uma mola, maior deve ser a força às suas extremidades, para lhe causar uma **deformação** x proporcional à força aplicada. Toda mola possui uma constante de proporcionalidade característica da mola ou **constante elástica k** determinada por características como o material de que é feita, espessura, número de espiras, etc. Para certa faixa de forças **Fel** aplicadas, o valor da deformação x é proporcional e expressa matematicamente por:



$$F_{el} = k \cdot x$$

Onde: F_{el} = Força elástica (N);
 k = constante elástica do objeto (N/m);
 x = deformação sofrida (m).

A partir da utilização desses conhecimentos foram construídos aparelhos de laboratório para medir força, chamados dinamômetros.



ATENÇÃO: Se a força exercida sobre a mola for muito grande, pode acontecer dela perder suas propriedades elásticas e não voltar à sua forma original. Nesse caso, dizemos que a mola sofreu uma deformação plástica (sofre uma mudança permanente em sua forma, mesmo após a remoção da carga aplicada) para esse tipo de deformação a Lei de Hooke não é mais válida.

Exemplos:

- 1) Qual é a força aplicada a uma mola que está estendida em 3 cm de seu comprimento original, sabendo-se que a constante da mola é 500 N/m?
- 2) Na mesma mola do exemplo anterior, aplicou-se uma força de compressão de 50 N. Qual foi a deformação (em cm) sofrida pela mola?
- 3) Qual é a constante da mola que será usada em um amortecedor, que pode ser comprimido no máximo 5 cm quando acionado por uma força de 1.500 N?

Respostas: 1)15N 2)10cm 3)30.000n/m

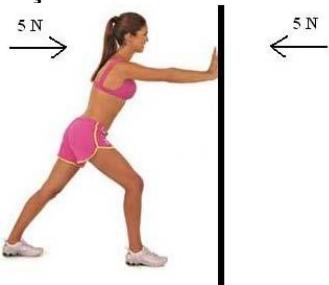
3^a LEI DE NEWTON (Princípio da Ação e Reação)

A 3^a Lei de Newton traduz o comportamento de um corpo interagindo com outros corpos, isto é, trocando forças com outros corpos. Podendo ser enunciada como:

A toda ação corresponde uma reação, com mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário.

As forças de ação e reação estão sempre aplicadas em corpos distintos e, por isso, não podem equilibrar-se. Esse Princípio da Física não só é bem conhecido como é muito importante. Através da sua compreensão é que se torna possível entender muitos fenômenos que ocorrem em nosso cotidiano e que nos parecem fatos extremamente banais e corriqueiros.

ATENÇÃO: ao contrário do que possa parecer, as forças de ação e de reação NUNCA podem se anular (a força resultante entre elas nunca é zero). Isso acontece devido ao fato de que as forças de ação e de reação ATUAM SOBRE CORPOS DIFERENTES.



Para todas as forças de ação, surgem forças de reação com intensidades iguais, mas sentidos opostos. Se uma pessoa empurra uma parede (ação), a parede exerce uma força sobre a pessoa (reação).



Quando caminhamos, fazemos uma força sobre o solo que, por sua vez, faz uma força sobre nosso corpo, impulsionando-o para a frente.

Força Normal (N): representa a reação ao peso que a superfície de apoio oferece ao corpo para evitar que o corpo caia. Assim, vamos sempre considerar que essa força é numericamente igual ao PESO do corpo. Logo:

$$N = m \cdot g$$

Força de Tração (T): ou tensão, é o nome que se dá à força que é exercida sobre um corpo por meio de cordas, cabos ou fios. A força de tração é muito útil quando se deseja que uma força seja transferida para outros corpos distantes ou ainda para alterar a direção de aplicação de uma força.

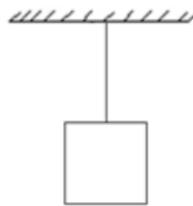
Exemplos:

1) Uma pessoa puxa uma corda num equipamento de ginástica com uma força de intensidade igual a 200N. O valor da força, em newtons, que o equipamento faz sobre a pessoa é de:

- a) 100. b) 200. c) 300. d) 400.

Resposta: Alternativa B. Resolução: Pela terceira lei de Newton, a força que a pessoa exerce sobre o equipamento de ginástica deve ser igual à força que o equipamento exerce sobre a pessoa. Portanto, a intensidade da força é igual a 200N.

2) Na figura temos um bloco de massa igual a 10kg suspenso por uma corda. Adotando a aceleração da gravidade $g = 10 \text{ m/s}^2$, o valor da tração, em N, na corda é de:



- a) 80. b) 90. c) 100. d) 110.

Resposta: Alternativa C. Resolução: O bloco está em equilíbrio, isto é, não desce e nem sobe, portanto, as duas forças que atuam sobre ele são iguais. A força peso é igual à tração. Assim temos:

$$\begin{aligned} T &= m \cdot g \\ T &= 10 \cdot 10 \\ T &= 100\text{N} \end{aligned}$$

Força de atrito (Fat): são forças que surgem devido ao contato entre duas superfícies. São forças chamadas de dissipativas, devido ao fato de que “roubam” parte da energia que os corpos possuem para se movimentar. É graças à ação das forças de atrito que um carro, ou mesmo uma bicicleta, começam a diminuir a sua velocidade (até parar completamente) quando paramos de fornecer energia para que o corpo se movimente.

Em geral, é responsabilidade da força de atrito o desgaste das peças de um carro, dos pneus de um carro, da sola dos nossos calçados, etc. Podemos calcular essa força através da fórmula:

$$F_{\text{at}} = \mu \cdot N$$

Onde: F_{at} = força de atrito (N);
 μ = coeficiente de atrito (não possui unidade de medida);
 N = força Normal (N).

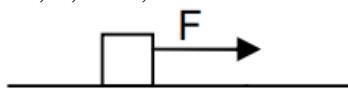
Força de Atrito Estático: é a força de atrito que surge num corpo quando ele encontra-se parado até a iminência de entrar em movimento.

Força de Atrito Dinâmico (ou Cinemático): é a força de atrito que surge quando um corpo já encontra-se em movimento, ou seja, apresenta uma velocidade.

ATENÇÃO: a Força de Atrito Estático será sempre maior do que a Força de Atrito Dinâmico, pois $\mu_e > \mu_d$.

Exemplos:

1) Um bloco de massa $m = 10 \text{ kg}$ encontra-se parado sobre uma mesa horizontal onde os coeficientes de atrito estático e dinâmico valem, respectivamente, 0,4 e 0,3.



Considerando $g = 10 \text{ m/s}^2$, calcule a intensidade da força que deve ser aplicada paralelamente à mesa, capaz de:

a) fazer o bloco entrar em movimento.

Como precisamos da Força Normal, vamos calcular o peso do corpo: $N = P = m \cdot g$.

$$N = P = 100 \text{ N}$$

Como o corpo está parado, na iminência de se movimentar, vamos calcular a F_{at} , usando o coeficiente de atrito estático:

$$F_{\text{at}} = \mu_e \cdot N = 0,4 \cdot 100 = 40 \text{ N}$$

Para fazer o bloco entrar em movimento, a força aplicada deve ser maior do que a força de atrito. Ou seja, $F > 40 \text{ N}$.

b) fazer o bloco se movimentar com velocidade constante (Movimento Uniforme).

Já temos a Força Normal: $N = P = 100 \text{ N}$

Como o corpo está em movimento, vamos calcular a F_{at} , usando o coeficiente de atrito dinâmico:

$$F_{\text{at}} = \mu_d \cdot N = 0,3 \cdot 100 = 30 \text{ N}$$

Como o corpo está em movimento, a intensidade da força aplicada para mantê-lo em Movimento Uniforme é de 30 N, ou seja, $F = 30 \text{ N}$.

ATENÇÃO: se a força aplicada for de 30N, a força resultante que atua sobre o corpo será nula e, assim, podemos afirmar que ele se movimentará com velocidade constante, estando em M.U. (movimento Uniforme).

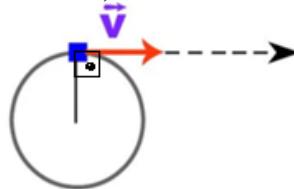
Forças circulares: o movimento circular ocorre quando uma força de módulo constante é aplicada em uma direção perpendicular à velocidade de um móvel, de forma que o módulo dessa velocidade mantenha-se constante, alterando somente sua direção e seu sentido. A **força centrípeta** é a força que age sobre os corpos no movimento circular em determinada trajetória curvilínea. Através dela, é possível mudar a direção da velocidade de um corpo em uma trajetória circular, atraindo-o para o centro. A **força centrífuga**, diferente da força centrípeta, tende a fazer com que o corpo saia da trajetória circular.

Um carro que percorre uma trajetória circular numa estrada possui uma determinada força centrípeta nas rodas para que ele não saia da trajetória circular. Já a força centrífuga pode ser exemplificada pelo mecanismo da máquina de lavar, as roupas na máquina estão em movimento de rotação, como o cilindro da máquina possui pequenos furos, a água sai das roupas por esses furos. Durante o processo de centrifugação, as roupas tendem a permanecer distante do centro, o que explica a atuação da força centrífuga.

A força centrífuga é uma força imaginária que atua em um corpo no sentido oposto à força centrípeta. Considerando-a uma força real, seu conceito é utilizado quando o objetivo é separar alguma mistura rotacionando-a, este processo é muito usado em laboratórios de análises e pesquisas.

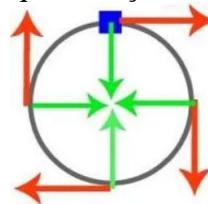
Enquanto a força centrípeta possui o sentido para o centro do movimento circular, a força centrífuga tem sentido para fora do círculo descrito no movimento, a força centrífuga ocorre pela ação da primeira lei de Newton, quando estamos andando de carro e o veículo executa uma curva para a direita, percebemos que o nosso corpo é automaticamente levado para o lado esquerdo, apresentando a tendência de sair da curva feita pelo veículo. Aparentemente, uma força puxa para fora da trajetória, daí vem a ideia de força centrífuga. Todavia, vale dizer que a força centrífuga não existe, o que muitos chamam de força, na verdade, é a inércia. Durante a execução da curva, o corpo de um passageiro tende, por inércia, a manter o movimento na direção anterior e, assim, surge a sensação de ser empurrado para fora da trajetória circular.

Na imagem a seguir, a linha pontilhada mostra a trajetória de um objeto se ele abandonasse o movimento circular exatamente no ponto indicado, ou seja, o objeto sai pela tangente (sai por uma trajetória perpendicular ao raio do círculo, forma 90° com o raio do círculo).



Quando um objeto executa um movimento circular uniforme, o valor de sua velocidade é constante, mas essa grandeza sofre alterações em sua direção e sentido.

Observe na imagem que o vetor velocidade, em laranja, sofre alterações de sentido e direção ao longo da trajetória circular. A grandeza responsável pela mudança na direção e no sentido da velocidade durante a execução de um movimento circular é a aceleração centrípeta, vetor destacado em verde, responsável por manter o corpo na trajetória circular, uma vez que a força resultante aponta para o centro do círculo.



Aceleração Centrípeta (a_{cp}): resulta da razão do quadrado da velocidade (V) de um corpo pelo raio (R) da trajetória circular executada. É expressa matematicamente por:

$$a_{cp} = \frac{V^2}{R}$$

Onde: a_{cp} = aceleração centrípeta (m/s^2);
 V = velocidade (m/s);
 R = raio da trajetória circular (m).

Força Centrípeta (F_{cp}): é definida pela segunda lei de Newton e responsável por manter os corpos presos à trajetória circular, o termo centrípeta significa aquilo que aponta para o centro. É expressa matematicamente por:

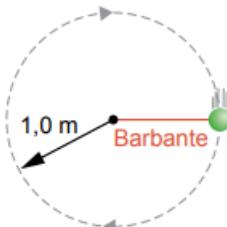
$$F_{cp} = \frac{m \cdot V^2}{R}$$

Onde: m = massa (kg);
 V = velocidade (m/s);
 R = raio da trajetória circular (m).

Assim como a aceleração, a força centrípeta aponta para o centro da trajetória circular.

Exemplos:

- 1) A figura a seguir mostra uma mesa horizontal lisa (vista de cima) sobre a qual uma pequena esfera de massa 0,50 kg, presa a um barbante horizontal, executa movimento uniforme numa trajetória circular de raio igual a 1,0 m. Determine a intensidade da força resultante de tração que o barbante exerce na esfera, considerando que ela se move a 2,0 m/s.

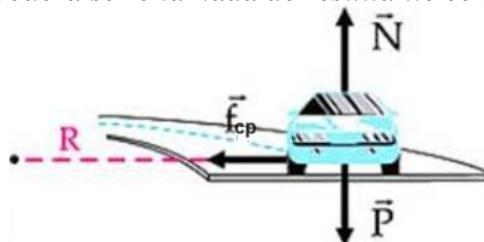


Como o movimento é circular, a força resultante é a centrípeta:

$$F_{cp} = \frac{m \cdot V^2}{R} \rightarrow F_{cp} = \frac{0,5 \cdot 2^2}{1} \rightarrow F_{cp} = 2N$$

- 2) Um carro de massa 1 tonelada, descreve numa pista plana e horizontal, uma curva de raio 100 m. O coeficiente de atrito de escorregamento lateral é $\mu = 0,4$, calcule a máxima velocidade que o veículo pode ter para não sair da pista durante a execução da curva, considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Quando um carro realiza uma curva horizontal atuam sobre ele as forças PESO (P), NORMAL (N) e Força de atrito (F_{at}). Ao se desenhar essas forças verifica-se que a força de atrito é a única que atua na direção do centro e aponta para ele, logo poderá ser chamada de resultante centripeta.

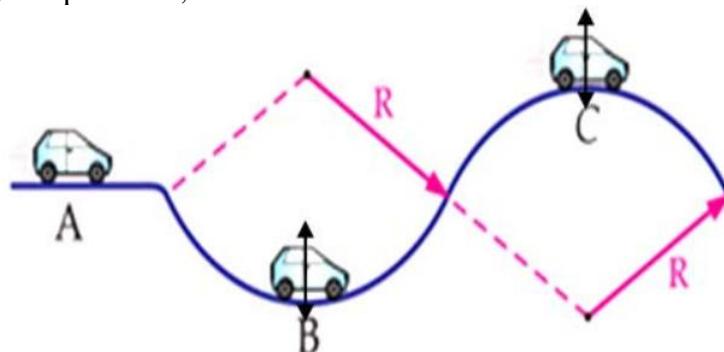


Como a pista é plana e horizontal, P e N tem seus efeitos anulados N = P. Para percorrer a curva a F_{at} deve atuar como força centrípeta:

$$F_{cp} = F_{at} \rightarrow \frac{m \cdot V^2}{R} = \mu \cdot N \rightarrow \frac{1000 \cdot V^2}{100} = 0,4 \cdot 1000 \cdot 10 \rightarrow V = 20 \text{ m/s}$$

Quando um veículo executa uma curva em uma estrada, a força de atrito entre os pneus e o asfalto atua como força centrípeta e mantém o móvel preso à trajetória circular. Pneus carecas e pista molhada diminuem o atrito e aumentam o risco do veículo perder o controle e sair da pista durante a execução de uma curva.

- 3) Um veículo de massa 1000 kg percorre o trecho de uma estrada conforme indica a figura, com velocidade constante de 18 km/h. Dado $g = 10 \text{ m/s}^2$ e $R = 10 \text{ m}$. Determinar a intensidade da força normal que o leito da estrada exerce no veículo, nos pontos A, B e C.



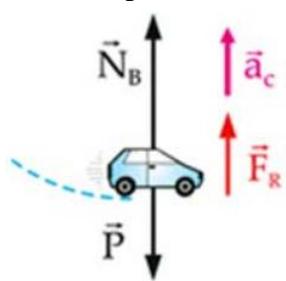
No ponto A: como a pista é plana e horizontal N = P:

$$N = m \cdot g \rightarrow N = 1000 \cdot 10 \rightarrow N = 10.000 \text{ N}$$

Já nos pontos B e C, ao passar por uma depressão (valeta) ou por uma lombada, as forças PESO (P) e NORMAL (N) são diferentes, sendo a maior, aquela que aponta para o centro da trajetória circular. Nesse caso deve-se calcular a resultante centrípeta sem esquecer que a mesma deve ter seu sentido voltado para o centro da curva, logo temos duas situações possíveis.

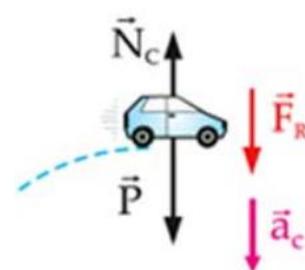
No ponto B:

A força que atua para o centro da trajetória circular é a normal, portanto $N > P$.



No ponto C:

A força que atua para o centro da trajetória circular é o peso, portanto $P > N$.



No ponto B: como a força resultante (F_{cp}) é dirigida para o centro da trajetória circular $N > P$:

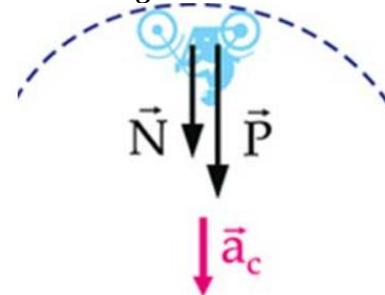
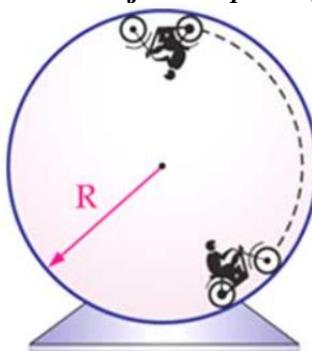
$$N - P = F_{cp} \rightarrow N - 10.000 = \frac{1000 \cdot 5^2}{10} \rightarrow N = 12.500 \text{ N}$$

No ponto C: como a força resultante (F_{cp}) é dirigida para o centro da trajetória circular $P > N$:

$$P - N = F_{cp} \rightarrow 10.000 - N = \frac{1000 \cdot 5^2}{20} \rightarrow N = 7.500 \text{ N}$$

4) Uma atração muito popular nos circos é o “globo da morte”, que consiste numa gaiola de forma esférica no interior da qual se movimenta uma pessoa pilotando uma motocicleta. Considere um globo de raio $R = 3,6 \text{ m}$ e adote $g = 10 \text{ m/s}^2$. Determine o menor valor da velocidade no ponto mais alto para a moto não perder o contato com o globo e cair.

No Globo da Morte a determinação da Resultante Centrípeta depende da posição em que o conjunto moto mais piloto esta. Caso seja no topo do globo temos a situação ilustrada a seguir:



No ponto mais alto, as duas forças P e N atuam na mesma direção e sentido, empurrando a moto para baixo, quando o menor valor de V é atingido, $N = 0$, pois a moto já está na iminência de perder o contato com o globo:

$$F_{cp} = P + N \rightarrow \frac{m \cdot V^2}{R} = P + 0 \rightarrow V = \sqrt{Rg} \rightarrow V = \sqrt{3,6 \cdot 10} \rightarrow V = 6 \text{ m/s}$$