Profa. Dra. Diana Andrade & Prof. Dr. Sergio Pilling

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
São José dos Campos - SP

Parte 2 – Forca e Leis de Newton

Vimos que a Física envolve o estudo dos movimentos dos objetos, como as acelerações, que são variações de velocidade.

O principal interesse da mecânica clássica está no movimento de um objeto particular que, ao interagir com os objetos à sua volta (vizinhança), tem sua velocidade alterada – e uma aceleração produzida. A física também envolve o estudo do que causa a aceleração dos corpos. A causa é sempre uma força, que pode ser definida em termos coloquiais, como um empurrão ou um puxão exercido sobre um objeto. Dizemos que a força age sobre o objeto mudando a sua velocidade.

MECÂNICA NEWTONIANA

A relação que existe entre uma força e a aceleração produzida por ela foi descoberta por Isaac Newton (1642 – 1727), e é assunto desta parte da disciplina. O estudo dessa relação, da forma como foi apresentada por Newton, é chamado de mecânica newtoniana.

A mecânica newtoniana não pode ser aplicada a todas as situações. São restrições:

➔ Movimentos em que as velocidades dos corpos são muito grandes, comparáveis a velocidade da luz – Uso da teoria da relatividade restrita de Einstein.

➔ Se as dimensões dos corpos envolvidos são muito pequenas, da ordem das dimensões atômicas (como os elétrons de um átomo) – Uso da mecânica quântica.

A mecânica newtoniana é um caso particular destas duas teorias mais abrangentes, mesmo assim é um caso particular muito importante. Ela pode ser aplicada ao estudo do movimento dos mais diversos objetos, desde muito pequenos (quase dimensões atômicas) até objetos muito grandes (galáxias e aglomerados de galáxias).

Força é um empurrão ou um puxão ➔ a idéia que temos de um força é que ela é um empurrão ou um puxão. Iremos aperfeiçoar essa idéia mais adiante, mas por agora ela é bastante apropriada.

Uma força representa uma ação sobre um objeto. Forças não existem isoladas dos objetos que as experimentam.

Uma força requer um agente ➔ algo que atua ou exerce poder, isto é, uma força possui causa específica e identificável.

Uma força é um vetor ➔ Se você empurra um objeto pode empurrá-lo suave ou fortemente, para a esquerda ou para a direita, para cima ou para baixo. Para qualificar um empurrão, você precisa especificar um módulo e uma orientação.

Uma força pode ser de contato ➔ Existem dois tipos básicos de força, dependendo se o agente toca ou não o objeto. Forças de contato são aquelas exercidas sobre um corpo através de um ponto de contato com algum ponto do mesmo. O bastão deve tocar a bola a fim de rebatê-la. Uma corda deve ser amarrada a um objeto para puxá-lo. A maioria das forças que abordaremos são de contato.

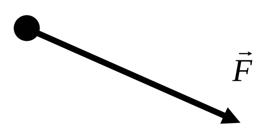
Uma força pode ser de ação à distância ➔ são as forças exercidas sobre um corpo sem contato físico. A força magnética é um exemplo. Sem dúvida você já viu um imã colocado acima de um clipe conseguir erguê-lo. Uma caneta solta de sua mão é puxada para a Terra pela força de ação a distância da gravidade.

Observação: No nosso modelo de partícula, os objetos não podem exercer forças sobre si mesmos. Uma força sobre o objeto terá um agente externo ou uma causa externa ao objeto.

Vetor Força

Podemos usar um diagrama simples para visualizar como as forças externas são exercidas pelos corpos. Uma vez que estamos usando o modelo de partícula, no qual os objetos são considerados como pontos, o processo de desenhar um vetor força é direto. Eis como:

1 - Represente o objeto como uma partícula;



2 – Localize a cauda do vetor força sobre a partícula;

3 – Desenhe o vetor força como uma seta com a orientação apropriada e com um comprimento proporcional à intensidade da força;

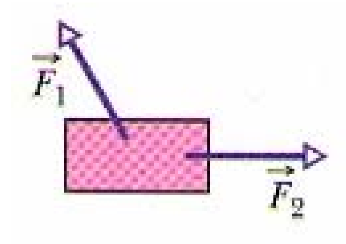
4 – Denote o vetor adequadamente.

COMBINANDO FORÇAS

Imagine uma caixa sendo puxada por duas cordas, cada qual exercendo uma força sobre a caixa. Como a caixa reagirá?

Quando várias forças agem sobre um objeto simultaneamente, elas se combinam para formar uma única força, a **força resultante**, dada pela soma vetorial de todas as forças:

$$\vec{F}_{res} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_N$$



A força resultante também é chamada de força total.

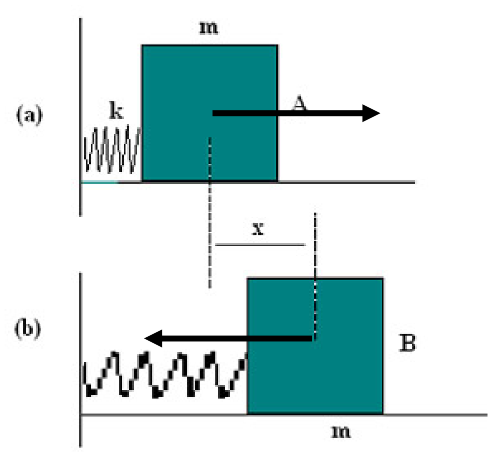
UM CURTO CATÁLOGO DE FORÇAS

Existem muitas forças com as quais trabalharemos repetidas vezes. Aqui introduziremos algumas delas.

GRAVIDADE ➔ Uma pedra em queda é puxada para baixo pela Terra através da força de ação à distância da gravidade. A gravidade – o único tipo de força de ação a distância que encontraremos nesta parte do curso - mantém você sobre uma cadeira, mantém os planetas em suas órbitas em torno do Sol e determina a forma da estrutura de larga escala do universo.

O puxão gravitacional de um planeta sobre um corpo em sua superfície ou próximo dela é chamada de força gravitacional. O agente da força gravitacional é o planeta inteiro, que puxa o objeto. A gravidade é exercida sobre todos os corpos, estejam eles se movendo ou parados. O símbolo para força gravitacional é $\vec{F}_G$. O vetor força gravitacional sempre aponta verticalmente para baixo.

FORÇA ELÁSTICA DE UMA MOLA ➔ As molas exercem uma das forças de contato mais comuns. Uma mola pode empurrar (quando comprimida) ou puxar (quando esticada). O símbolo da força elástica é $\vec{F}_{Elast}$.



Embora você possa estar pensando em uma mola como uma espiral metálica que pode ser esticada ou comprimida, isto é somente um tipo de mola. Existem outros.

FORÇA DE TENSÃO ➔ Quando um barbante, uma corda ou um arame puxa um objeto, ele exerce uma força de contato que chamamos de força de tensão, representada pela letra maiúscula $\vec{T}$. A orientação da força $\vec{T}$ é a mesma do barbante ou da corda.

Se usássemos um microscópio muito poderoso para olhar o interior de uma corda, "veríamos" que ela é formada por átomos mantidos juntos por meio de ligações atômicas. As ligações atômicas não são conexões rígidas entre átomos. Elas se parecem mais com minúsculas molas mantendo os átomos juntos, como na figura abaixo. Puxando-se as extremidades de um barbante ou de uma corda, esticam-se ligeiramente as molas atômicas. A tensão dentro da corda e a força de tensão experimentada por um objeto em contato com uma das extremidades da corda são, de fato, a força resultante exercida por bilhões e bilhões de molas microscópicas.

Esta visão da tensão em escala atômica introduz uma nova idéia: a de um modelo atômico microscópio para a compreensão do comportamento e das propriedades dos objetos macroscópicos. Trata-se de um modelo porque os átomos e ligações atômicas não são realmente pequenas bolas e molas. Estamos usando conceitos macroscópicos – bolas e molas - para entender fenômenos em escala atômica que não podemos ver ou sentir diretamente. Este é um bom modelo para explicar as propriedades elásticas dos materiais, mas não seria necessariamente, um bom modelo para explicar outros fenômenos. Com freqüência usaremos modelos atômicos para obter uma compreensão mais profunda do que observamos.

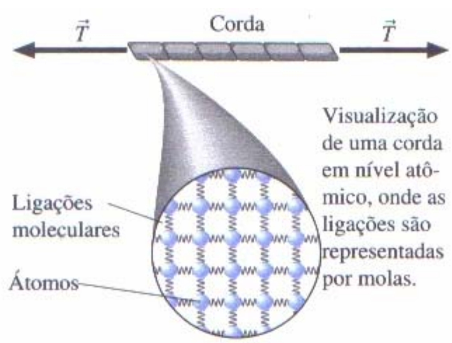


FIGURA 5.6 Um modelo atômico da tensão.

FORÇA NORMAL ➔ Se você sentar num colchão de molas, estas serão comprimidas e, em conseqüência disso, exercerão uma força orientada para cima sobre você. Molas mais duras sofreriam menor compressão, mas ainda exerceriam forças orientadas para cima. Pode ser que a compressão das molas extremamente duras seja mensurável apenas por instrumentos sensíveis. Apesar disso, as molas seriam comprimidas ainda que ligeiramente e exerceriam uma força orientada para cima sobre você.

Imagine um livro sobre o tampo de uma mesa. A mesa pode não flexionar ou encurvar-se visivelmente, mas – da mesma forma como você no colchão de molas - o objeto comprime as molas atômicas da mesa. O tamanho da compressão é muito pequena, mas não é nulo. Como conseqüência, as molas atômicas comprimidas empurram o objeto para cima. Dizemos que a mesa exerce uma força para cima, mas é importante que se compreenda que o empurrão é de fato, realizado pelas molas atômicas. Analogamente, um objeto em repouso sobre o solo comprime as molas atômicas que o mantêm íntegro e, conseqüentemente, o solo empurra o objeto para cima.

Podemos ampliar essa idéia. Suponha que você encoste a sua mão sobre uma parede e a empurre. A parede exercerá uma força sobre a sua mão? Quando você empurra, comprime as molas atômicas da parede e, como conseqüência, elas empurram a sua mão de volta. Logo, a resposta é sim, a parede realmente exerce uma força sobre você.

A força exercida pelo tampo da mesa é vertical; a força que a parede exerce é horizontal. Em todos os casos, a força exercida sobre um objeto que pressiona uma superfície tem direção perpendicular à superfície. Os matemáticos se referem a uma reta perpendicular a uma superfície como sendo normal a esta. Assim, definimos como força normal, a força exercida por uma superfície (agente) contra um objeto que a está pressionando. O símbolo para força normal será $\vec{n}$.

FORÇA DE ATRITO ➔ Certamente você já descobriu que pode deslizar mais sobre uma camada de gelo do que no asfalto. Você também já sabe que a maioria dos objetos ficam parados sobre uma mesa, sem deslizar para fora dela, mesmo se a mesa não estiver perfeitamente nivelada. A força responsável por esse tipo de comportamento é o atrito. O símbolo para o atrito é a letra minúscula $\vec{f}$.

O atrito, como a força normal, é exercido por uma superfície. Mas enquanto a força normal é perpendicular, a força de atrito é tangente à superfície. Ao nível microscópico, o atrito surge quando os átomos do objeto e da superfície movem-se uns em relação aos outros. Quanto mais rugosa for a superfície, mais estes átomos serão forçados a se aproximar e, como resultado, surgirá uma grande força de atrito.

Devemos distinguir entre dois tipos de atrito:

Atrito Cinético, denotado por $\vec{f}_c$, aparece quando um objeto desliza ao longo de uma superfície. É uma força oposta ao movimento, o que significa que o vetor força de atrito, $\vec{f}_c$, tem sentido oposto ao vetor velocidade.

Atrito estático, denotado por $\vec{f}_e$ é a força que mantém o objeto grudado sobre uma superfície e que o impede de se mover. Determinar a orientação de $\vec{f}_e$ é um pouco mais complicado do que encontrar a de $\vec{f}_c$. O atrito estático aponta no sentido oposto àquele em o que o objeto se movimentaria se não existisse o atrito, ou seja, ele tem orientação necessária para impedir a ocorrência do movimento.

FORÇA DE ARRASTE ➔ A força de atrito em uma superfície é um exemplo de força de resistência ou resistiva, uma força que se opõe ou resiste ao movimento. Forças resistivas também são experimentadas por objetos que se movem no interior de um fluido – um gás ou um líquido. A força resistiva de um fluido é chamada de força de arraste e simbolizada por $\vec{D}$ (de drag, que quer dizer arraste). A força de arraste, como o atrito, tem sentido oposto ao movimento.

A resistência do ar é uma força significativa no caso da queda de folhas. Ela aponta em sentido oposto ao do movimento.

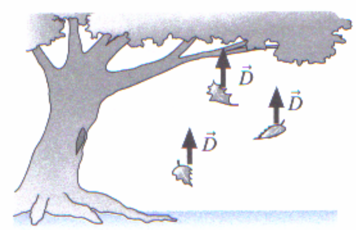


FIGURA 5.11 A resistência do ar é um exemplo de força de arraste.

LEIS DE NEWTON

Antes de Newton formular sua mecânica, a maioria dos filósofos pensava que para a manter um corpo em movimento era necessária a ação de uma determinada influencia ou força. Achavam que quando um corpo estava em repouso, ele estava em seu "estado natural". Para que um corpo se movesse com velocidade constante tinha que ser empurrado ou puxado de alguma forma, caso contrário, pararia "naturalmente".

Essas idéias pareciam razoáveis!

PRIMEIRA LEI DE NEWTON: Se nenhuma força atua sobre um corpo, sua velocidade não pode mudar, ou seja, o corpo não poderá sofrer uma aceleração.

Em outras palavras: se um corpo está em repouso ele permanece em repouso. Se ele está em movimento, continua com a mesma velocidade (mesmo módulo e mesma orientação).

SEGUNDA LEI DE NEWTON: A força resultante que atua sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela sua aceleração.

Em termos matemáticos:

$$\vec{F}_{res} = m\vec{a} \qquad \text{(segunda lei de Newton).} \qquad (5.1)$$

Em unidades do SI, a Eq. 5-1 nos diz que

$$1\ \mathrm{N} = (1\ \mathrm{kg})(1\ \mathrm{m/s^2}) = 1\ \mathrm{kg \cdot m/s^2}.$$

Esta equação é simples, mas devemos usá-la com cautela. Primeiro devemos escolher o corpo ao qual vamos aplicá-la; $\vec{F}_{res}$ deve ser a soma vetorial de todas as forças que atuam sobre o corpo. Somente as forças que atuam nesse corpo devem ser incluídas na soma vetorial, não as forças que agem sobre outros corpos envolvidos na mesma situação. Por exemplo, se você disputa uma bola com vários adversários em um jogo de futebol, a força resultante que age sobre você é a soma vetorial de todos os empurrões e puxões que você recebe. Ela não inclui um empurrão ou puxão que você dá em outro jogador.

Como outras equações vetoriais, a equação 5.1 é equivalente a três equações para as componentes , uma para cada eixo de um sistema de coordenadas xyz:

$$F_{\text{res},x} = ma_x, \quad F_{\text{res},y} = ma_y \quad \text{e} \quad F_{\text{res},z} = ma_z. \tag{5.2}$$

TABELA 5-1

Unidades da Segunda Lei de Newton (Eqs. 5-1 e 5-2)

Sistema	Força	Massa	Aceleração
SI	newton (N)	quilograma (kg)	m/s^2
CGS[a]	dina	grama (g)	cm/s^2

CGS é, uma sigla para **c**entímetro–**g**rama–**s**egundo. É o sistema de unidades físicas primordial que precedeu o Sistema Internacional de Unidades (**SI**).

IMPORTANTE:

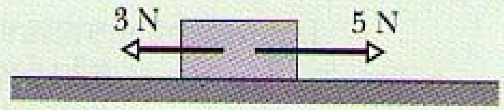
A componente da aceleração em relação a um dado eixo é causada *apenas* pela soma das componentes das forças em relação a *esse* eixo, e não por componentes de forças em relação a qualquer outro eixo.

Para resolver problemas que envolvem a segunda lei de Newton freqüentemente desenhamos um diagrama de corpo livre, no qual o único corpo mostrado é aquele para o qual estamos somando as forças.

As forças que agem sobre o corpo serão representadas por setas com a origem num ponto do corpo escolhido como representativo do corpo.

Um sistema é formado por um ou mais corpos, e qualquer força exercida sobre os corpos do sistema por corpos fora do sistema é chamada de força externa. Se os corpos pertencentes a um sistema estão rigidamente ligados uns aos outros, podemos tratar o sistema como um único corpo, e a força resultante $\vec{F}_{res}$ é a que está submetido este corpo é a soma vetorial das forças externas. Não incluímos as forças internas, ou seja, as forças entre dois corpos pertencentes ao sistema. Assim, por exemplo, uma locomotiva e um vagão formam um sistema. Se, digamos, um reboque puxa a locomotiva, a força exercida pelo reboque age sobre o sistema locomotiva-vagão. Como acontece no caso de um só corpo, podemos relacionar a força resultante externa que age sobre um sistema à aceleração do sistema através da segunda lei de Newton, $\vec{F}_{res} = m.a$, onde m é a massa total do sistema.

TESTE 2 A figura mostra duas forças horizontais atuando em um bloco apoiado em um piso sem atrito. Se uma terceira força horizontal $\vec{F}_3$ também age sobre o bloco, determine o módulo e a orientação de $\vec{F}_3$ se o bloco está (a) em repouso e (b) se movendo para a esquerda com uma velocidade constante de 5 m/s.



Solução: (a) 2N e (b) 2N (a aceleração é zero, o bloco se move com velocidade constante.

Exemplo 5-1:

Nas figuras 5-3a a c, uma ou duas forças agem sobre um disco metálico que se move sobre o gelo sem atrito ao longo do eixo x, em um movimento unidimensional. A massa do disco é m = 0,20 kg. As forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ atuam ao longo do eixo x e têm módulo F_1 = 4,0 N e F_2 = 2,0 N. A força $\vec{F}_3$ faz um ângulo θ = 30^o com o eixo x e tem módulo F_3 = 1,0 N. Qual a aceleração do disco em cada situação?

Solução: Como o movimento se dá apenas na direção do eixo x, podemos simplificá-lo:

$$F_{\text{res},x} = ma_x.$$

Os diagramas de corpo livre para as três situações aparecem nas figuras 5-3 d a f, com o disco representado por um ponto.

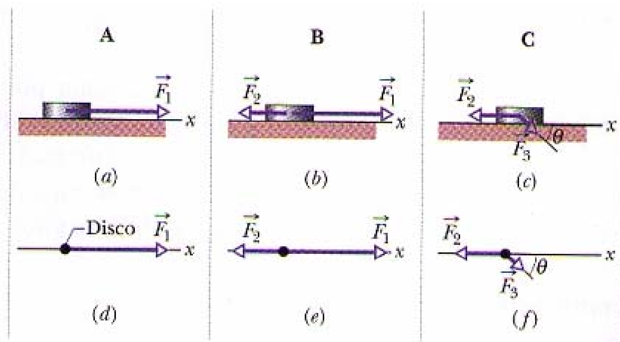


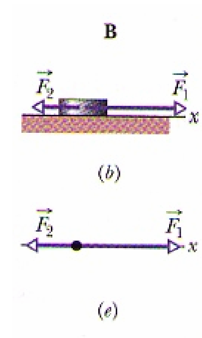
FIG. 5-3 (a)–(c) Em três situações, forças atuam sobre um disco que se move ao longo do eixo x. (d)–(f) Diagramas de corpo livre.

Para a situação da figura 5-3d, existe apenas uma força horizontal:

$$F_1 = m.a_x$$

$$a_x = \frac{F_1}{m} = \frac{4,0\ \text{N}}{0,20\ \text{kg}} = 20\,\text{m/s}^2.$$

Na figura 5-3e duas forças horizontais agem sobre o disco:

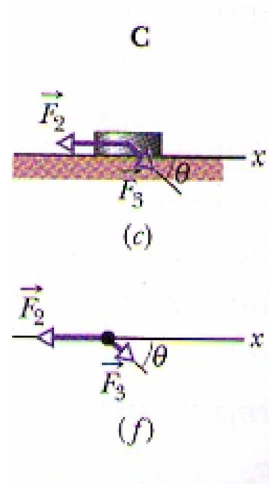


F_1 no sentido positivo de x e F_2 no sentido negativo. Assim,

$F_1 - F_2 = m.a_x$

$$a_x = \frac{F_1 - F_2}{m} = \frac{4{,}0 - 2{,}0}{0{,}20} = 10 m/s^2$$

Assim, a força resultante acelera o disco no sentido negativo do eixo x.



Na terceira situação, não é $\vec{F}_3$ que tem a direção da aceleração do disco, mas sim a componente $F_{3,x}$. A força $\vec{F}_3$ é bidimensional, enquanto o movimento é unidimensional.

$F_{3,x} - F_2 = m.a_x$

De acordo com a figura, $F_{3,x} = F_3 \cos\theta$

E:

$$a_x = \frac{F_{3,x} - F_2}{m} = \frac{F_3 \cos\theta - F_2}{m} = \frac{(1{,}0N)(\cos 30^o) - 2{,}0N}{0{,}20kg} = -5{,}7 m/s^2$$

Assim, a força resultante acelera o disco no sentido negativo do eixo x.

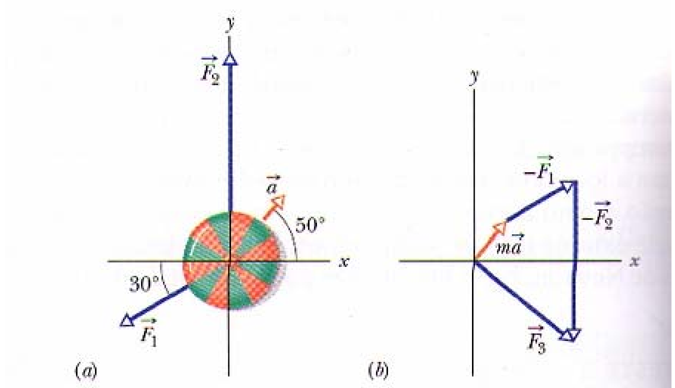


FIG. 5-4 (*a*) Vista superior de duas das três forças que agem sobre uma lata de biscoitos, produzindo uma aceleração $\vec{a} \cdot \vec{F}_3$ não é mostrada. (*b*) Um arranjo de vetores $m\vec{a}$, $-\vec{F}_1$ e $-\vec{F}_2$ para determinar a força $\vec{F}_3$.

Exemplo 5-2

Na vista superior da Fig. 5-4*a*, uma lata de biscoitos de 2,0 kg é acelerada a 3,0 m/s^2 na orientação definida por $\vec{a}$, em uma superfície horizontal sem atrito. A aceleração é causada por três forças horizontais, das quais apenas duas são mostradas: $\vec{F}_1$, de módulo 10 N, e $\vec{F}_2$, de módulo 20 N. Qual é a terceira força, $\vec{F}_3$, em termos dos vetores unitários e na notação módulo-ângulo?

A força resultante que age sobre a lata é a soma vetorial das três forças e está relacionada à aceleração pela segunda lei de Newton. Assim:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = m.\vec{a}$$

o que nos dá:

$$\vec{F}_3 = m.\vec{a} - \vec{F}_1 - \vec{F}_2$$

Como o problema é bidimensional, não podemos determinar $\vec{F}_3$ simplesmente substituindo os módulos das grandezas vetoriais no lado direito da equação. Devemos somar vetorialmente $m\vec{a}$, $-\vec{F}_1$ e $-\vec{F}_2$

Para o eixo x:

$$\vec{F}_{3,x} = m.\vec{a}_x - \vec{F}_{1,x} - \vec{F}_{2,x}$$
$$\vec{F}_{3,x} = m.a.\cos 50^o - F_1 \cos(-150^o) - F_2 \cos 90^o$$

Substituindo os valores conhecidos:

$$\vec{F}_{3,x} = (2kg).(3{,}0m/s^2).\cos 50^o - (10N)\cos(-150^o) - (20N)\cos 90^o = 12{,}5N.$$

Para o eixo y:

$$\vec{F}_{3,y} = m.\vec{a}_y - \vec{F}_{1,y} - \vec{F}_{2,y}$$

$$\vec{F}_{3,x} = m.a.sen50^o - F_1 sen(-150^o) - F_2 sen90^o$$

$$= (2{,}0kg)(3{,}0m/s^2)sen50^o - (10N)sen(-150^o) - (20N)sen90^o = -10{,}4N$$

Em termos de vetores unitários:

$$\vec{F}_3 = F_{3,x}\hat{i} + F_{3,y}\hat{j} = (12{,}5N)\hat{i} - (10{,}4N)\hat{j}$$

O módulo de F_3 será:

$$F_3 = \sqrt{F^2{}_{3,x} + F^2{}_{3,y}} = \sqrt{(12{,}5N)^2 + (10{,}4N)^2} \approx 16N$$

e

$$\theta = \tan^{-1}\frac{F_{3,y}}{F_{3,x}} = -40^o$$