1. Grandezze scalari e grandezze vettoriali

Tra le grandezze fisiche ve ne sono alcune che sono completamente definite indicandone il valore nell'unità di misura corrispondente. Una grandezza di questo tipo è una **grandezza scalare**.

Che cosè una grandezza scalare?

Grandezza scalare

Una grandezza scalare è una grandezza fisica espressa solamente da un numero, detto modulo o intensità, accompagnato da un'unità di misura.

Esempi di grandezze scalari sono la massa di un oggetto, il volume di un recipiente, la durata di un evento, la densità di un materiale.

Talvolta il solo valore della grandezza non è sufficiente a descrivere una grandezza fisica ed è necessario associare a essa anche la direzione e il verso lungo il quale la grandezza agisce. Ad esempio, supponiamo di essere in una città che non conosciamo e di voler andare in biblioteca. Chiediamo a un passante: «Sa dov'è la biblioteca?» Se il passante risponde «Sì, si trova a mezzo kilometro da qui» non ci è di grande aiuto, perché la biblioteca potrebbe essere in qualsiasi punto di una circonferenza di raggio 0,5 km (fig. 1). Per conoscere esattamente dove è situata la biblioteca, abbiamo bisogno di una risposta del tipo: "Sì, la biblioteca è a mezzo kilometro a nord-ovest da qui".

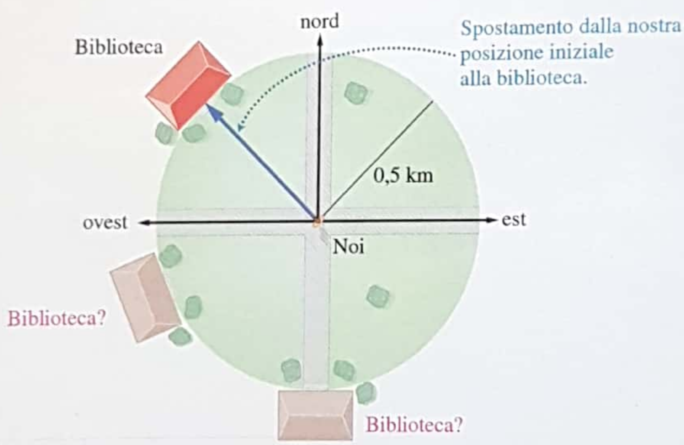


Figura 1
Spostamento: distanza, direzione e verso

Lo **spostamento** dalla nostra posizione iniziale al punto in cui si trova la biblioteca è una grandezza fisica determinata non solo dalla distanza percorsa, ma anche dalla direzione (nord-ovest) e dal verso del movimento.
In figura 1 lo spostamento è rappresentato da una freccia che punta nella **direzione** e nel **verso** del moto e la cui lunghezza, che chiameremo **modulo** o **intensità** (0,5 km, in questo caso), rappresenta la distanza in linea d'aria tra la posizione iniziale e la biblioteca.

ATTENZIONE!

Direzione e verso sono due cose diverse: dicendo che un aereo vola lungo la rotta Milano-Roma, indichiamo la direzione del volo; specificando che l'aereo viaggia da Milano a Roma, indichiamo il verso.

Lo spostamento è un esempio di **grandezza vettoriale**. In generale, una grandezza fisica specificata da un modulo, che è un numero non negativo con un'unità di misura, da una direzione e da un verso è detta **grandezza vettoriale**.

Grandezza vettoriale e vettore

Una grandezza vettoriale è una grandezza fisica rappresentata matematicamente da un vettore.
Un **vettore** è un ente matematico definito da un *modulo* (che è un numero non negativo), una *direzione* e un *verso*.

Quali sono le caratteristiche di un vettore?

Per rappresentare graficamente un vettore usiamo una freccia (fig. 2). Il simbolo di un vettore è una lettera (maiuscola o minuscola) in corsivo con una piccola freccia sopra. La stessa lettera senza freccia indica il modulo del vettore.

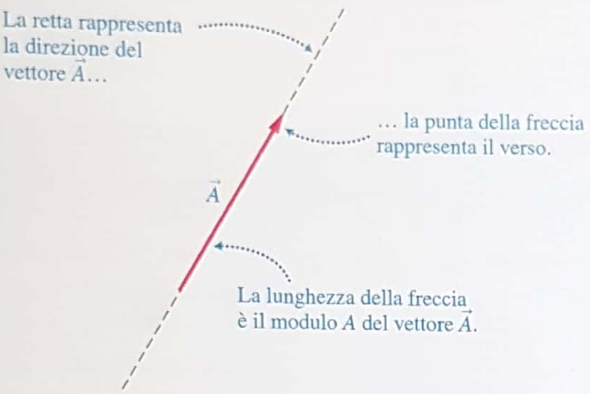


Figura 2 Rappresentazione grafica di un vettore

RAGIONA CON UN ESEMPIO

1 **Mentre viaggi in auto su un'autostrada rettilinea, sul contachilometri leggi che hai percorso 18 km. Di quali altre informazioni hai bisogno per determinare il tuo spostamento?**

Hai bisogno di conoscere anche la direzione lungo la quale l'auto si muove e il verso. Ad esempio, il tuo spostamento si può indicare come:

$\vec{s} = 18$ km, nord (la direzione è la retta nord-sud, il verso è orientato verso nord)

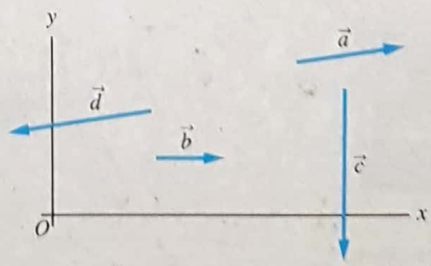
Fissa i concetti chiave

1. **SCEGLI** Considera le seguenti due grandezze e indica quale è scalare S e quale è vettoriale V.
- Il tempo che impieghi a percorrere 100 m S V
- Il tuo spostamento dopo aver percorso 100 m S V

2. **IDENTIFICA** L'intensità di un vettore si riferisce alla sua lunghezza o alla sua direzione?

3. **SPIEGA** Illustra con un esempio qual è la differenza fra verso e direzione di un vettore.

4. **CONFRONTA** Ordina i seguenti vettori per intensità (modulo) crescente:



2. Operazioni con i vettori

Con i vettori è possibile effettuare varie operazioni. Ci occuperemo di addizione e sottrazione di vettori e di moltiplicazione di un vettore per uno scalare.

Come si sommano i vettori

Curiosando in una vecchia cassa in soffitta trovi la mappa di un tesoro. La mappa dice che, per localizzare il tesoro, devi partire dall'albero di magnolia che si trova in cortile, fare 5 passi verso nord e poi 3 verso est. Se questi due spostamenti sono rappresentati dai vettori $\vec{A}$ e $\vec{B}$ in figura 3, lo spostamento totale dall'albero al tesoro è dato dal vettore $\vec{C}$.
Diciamo che $\vec{C}$ è il **vettore somma** o **risultante** di $\vec{A}$ e $\vec{B}$ e scriviamo:

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$$

ATTENZIONE!
Il modulo della somma di due vettori *non* è uguale alla somma dei moduli dei vettori, a meno che questi vettori non abbiano la stessa direzione e lo stesso verso.

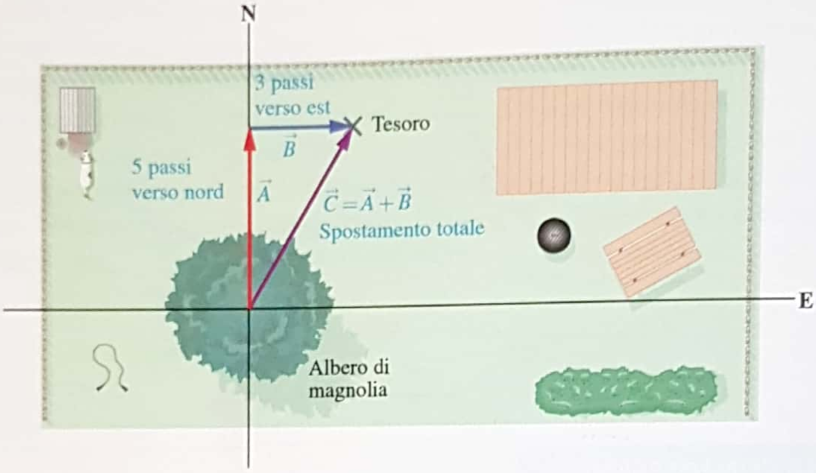


Figura 3
Somma di due vettori

In generale i vettori si sommano graficamente secondo la seguente regola, detta **metodo punta-coda**:

Come si sommano graficamente due vettori?

Somma di due vettori: metodo punta-coda

Per sommare i vettori $\vec{A}$ e $\vec{B}$:
- si dispone la coda di $\vec{B}$ sulla punta di $\vec{A}$;
- la somma $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ è il vettore che va dalla coda di $\vec{A}$ alla punta di $\vec{B}$.

Per applicare il metodo punta-coda è necessario spostare i vettori (fig. 4). Questa operazione non comporta alcun problema se i vettori vengono spostati parallelamente a loro stessi, senza modificarne l'intensità (o il modulo) e il verso. Rette parallele rappresentano infatti la stessa direzione e, poiché un vettore è definito dal suo modulo, dalla sua direzione e dal suo verso, se questi non cambiano, non cambia neanche il vettore.

FIGURA ANIMATA

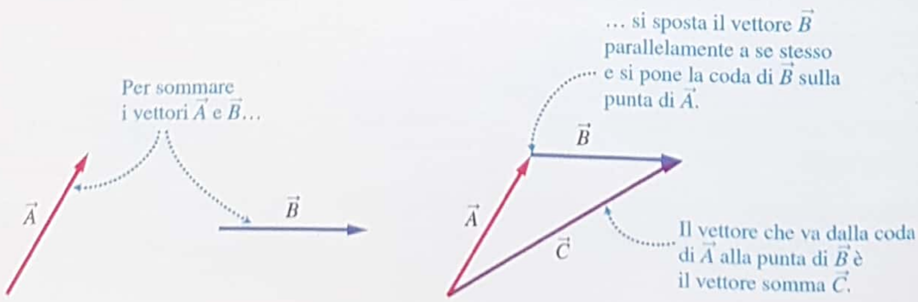


Figura 4
Somma di due vettori con il metodo punta coda

Sommare vettori che hanno la stessa direzione

Possiamo applicare il metodo punta-coda al caso particolare in cui si sommano due vettori che hanno *uguale direzione* (**fig. 5**). Il vettore somma ha la stessa direzione, per ciò che riguarda il suo modulo e il suo verso:

- se i due vettori hanno **versi uguali**, il vettore somma ha come modulo la somma dei moduli dei due vettori e lo stesso verso.
- se i due vettori hanno **verso opposto**, il vettore somma ha come modulo la differenza dei moduli dei due vettori e come verso quello del vettore che ha modulo maggiore.

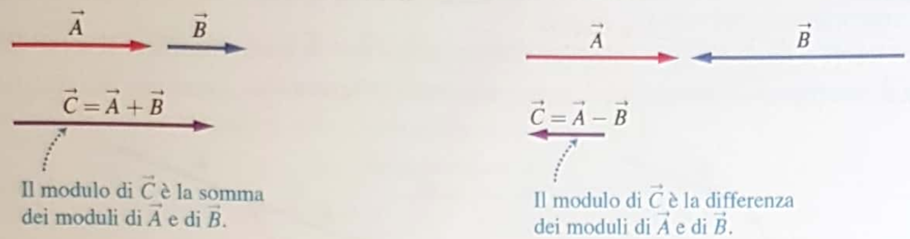


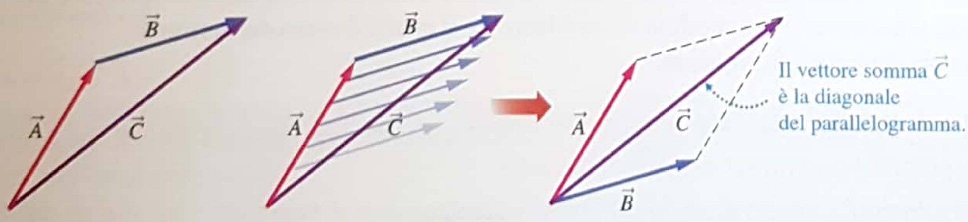
Figura 5 Somma di vettori con la stessa direzione

Sommare vettori con la regola del parallelogramma

Consideriamo i due vettori $\vec{A}$ e $\vec{B}$ di **figura 6a** e il loro vettore somma $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ ottenuto con il metodo punta-coda. Se spostiamo parallelamente a se stessa la freccia che rappresenta $\vec{B}$ in modo che la sua coda coincida con quella di $\vec{A}$, troviamo che $\vec{C}$ è la diagonale del parallelogramma che ha come lati $\vec{A}$ e $\vec{B}$ (**fig. 6b**). Abbiamo scoperto così un altro metodo per costruire la somma di due vettori, noto come **regola del parallelogramma**:

IN DIGITALE
Approfondimento
Somma di più vettori

> **Somma di due vettori: regola del parallelogramma**
>
> Per sommare i vettori $\vec{A}$ e $\vec{B}$:
> - si fanno coincidere le loro code e si disegna il parallelogramma che ha i due vettori come lati;
> - la somma $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$ è la diagonale del parallelogramma.



a) Metodo punta-coda

b) Regola del parallelogramma

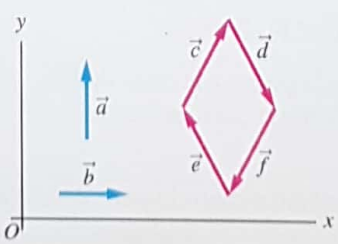
FIGURA ANIMATA

Figura 6 Somma di vettori con direzioni diverse

RAGIONA CON UN ESEMPIO

2 **Considera i vettori $\vec{a}$ e $\vec{b}$ mostrati in figura. Quale degli altri quattro vettori è la somma $\vec{a} + \vec{b}$?**

Il vettore $\vec{a}$ punta verso l'alto, il vettore $\vec{b}$ verso destra. La somma $\vec{a} + \vec{b}$ punterà quindi in alto a destra: l'unico vettore che soddisfa questa condizione è il vettore $\vec{c}$.



Come si sottraggono i vettori

Vogliamo determinare il **vettore differenza** $\vec{D}$ dei due vettori $\vec{A}$ e $\vec{B}$ rappresentati in figura 7a, cioè:

$$\vec{D} = \vec{A} - \vec{B}$$

Possiamo scrivere $\vec{D}$ nel modo seguente:

$$\vec{D} = \vec{A} + (-\vec{B})$$

cioè come somma di $\vec{A}$ e $-\vec{B}$, dove il vettore $-\vec{B}$ è il **vettore opposto** di $\vec{B}$.
L'opposto di un vettore è rappresentato da una freccia della stessa lunghezza del vettore originale, ma orientata nel verso opposto.
Per sottrarre $\vec{B}$ da $\vec{A}$, cioè per calcolare il vettore $\vec{D} = \vec{A} - \vec{B}$, basta cambiare il verso di $\vec{B}$ e sommare il vettore così ottenuto ad $\vec{A}$, come mostrato in figura 7b.

FIGURA ANIMATA

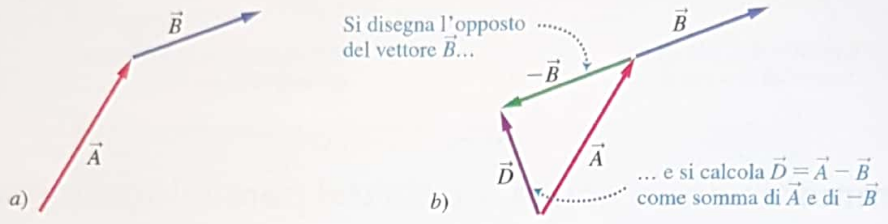


Figura 7
Differenza di vettori

La regola generale è la seguente:

Come si sottraggono graficamente due vettori?

Differenza di due vettori

Per sottrarre un vettore $\vec{B}$ da un vettore $\vec{A}$:
- si costruisce il vettore $-\vec{B}$, che è l'opposto di $\vec{B}$;
- il vettore differenza $\vec{D} = \vec{A} - \vec{B}$ è la somma dei vettori $\vec{A}$ e $-\vec{B}$.

Moltiplicare un vettore per un numero

Come mostrato in figura 8, ad esempio, moltiplicando un vettore per 3 si aumenta di un fattore 3 il suo modulo, ma non si cambiano direzione e verso; moltiplicando il vettore per -3, invece, si aumenta il suo modulo di un fattore 3 e si *inverte* il verso del vettore.
La regola generale è la seguente:

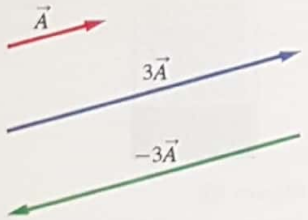


Figura 8
Prodotto di un vettore per un numero

Prodotto di un vettore per un numero

Per moltiplicare un vettore per un numero:
- si moltiplica il suo modulo per il valore assoluto di quel numero;
- la direzione del vettore prodotto non cambia, mentre il suo verso rimane lo stesso se il numero è positivo, si inverte se il numero è negativo.

Fissa i concetti chiave

1. DESCRIVI Come posizioni la punta e la coda di due vettori che vuoi sommare? Come si chiama questo metodo?

2. RISPONDI Come si chiama l'altro metodo per sommare due vettori?

3. SPIEGA Per calcolare la differenza di due vettori si calcola una somma: di quali vettori?

4. SPIEGA Nel prodotto di un vettore per un numero che cosa succede all'intensità, alla direzione e al verso del vettore?

3. Componenti cartesiane di un vettore

Scomporre un vettore lungo due rette qualsiasi

Scomporre un vettore lungo due rette significa trovare due vettori diretti lungo queste rette, la cui somma sia uguale al vettore dato. Per farlo si ricorre alla regola del parallelogramma, utilizzando il procedimento illustrato in figura 9.

Che cosa significa scomporre un vettore nei suoi vettori componenti?

Se $\vec{A}$ è il vettore da scomporre lungo le rette r_1 ed r_2:

1) poniamo la coda di $\vec{A}$ nel punto di intersezione di r_1 ed r_2;
2) tracciamo le parallele ad r_1 ed r_2 passanti per la punta di $\vec{A}$;
3) i lati del parallelogramma che si ottiene, orientati a partire dalla coda di $\vec{A}$, rappresentano i vettori cercati, cioè i vettori $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ che hanno come somma $\vec{A}$:

$$\vec{A}_1 + \vec{A}_2 = \vec{A}$$

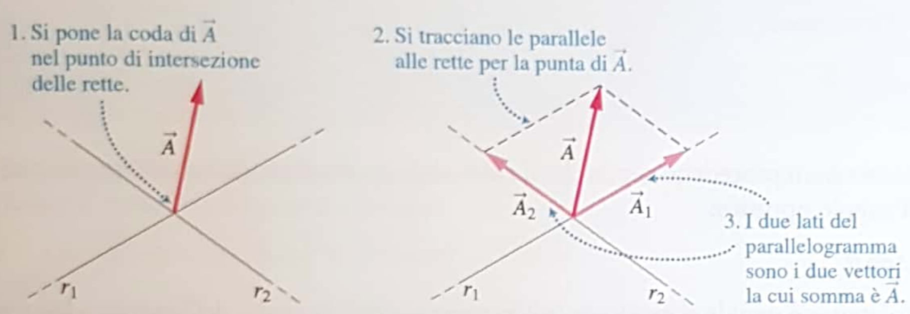


FIGURA ANIMATA

Figura 9
Scomposizione di un vettore lungo due rette

Scomporre un vettore lungo gli assi cartesiani

Di particolare importanza è la **scomposizione di un vettore lungo i due assi perpendicolari** di un sistema di coordinate cartesiane. Scegliamo un'origine, O, e un verso positivo per l'asse x e per l'asse y (fig. 10). Ponendo la coda di un vettore $\vec{A}$ nell'origine e disegnando le parallele agli assi x e y che passano per la punta di $\vec{A}$, si trovano due vettori *perpendicolari* $\vec{A}_x$ e $\vec{A}_y$ la cui somma è $\vec{A}$:

$$\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y$$

La direzione di $\vec{A}$ nel sistema cartesiano è individuata dall'angolo θ (si legge *teta*) che il vettore forma con l'asse delle ascisse.
I moduli A_x e A_y dei due vettori $\vec{A}_x$ e $\vec{A}_y$ sono le **componenti cartesiane** del vettore $\vec{A}$. Associando a ogni componente il verso corrispondente, si ottengono i vettori componenti lungo gli assi. Alle componenti si attribuisce un *segno positivo o negativo* a seconda che i vettori $\vec{A}_x$ e $\vec{A}_y$ siano diretti nel verso positivo o nel verso negativo degli assi x e y, rispettivamente (fig. 11).

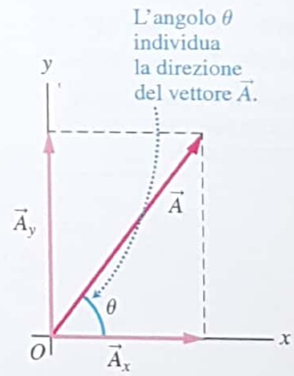
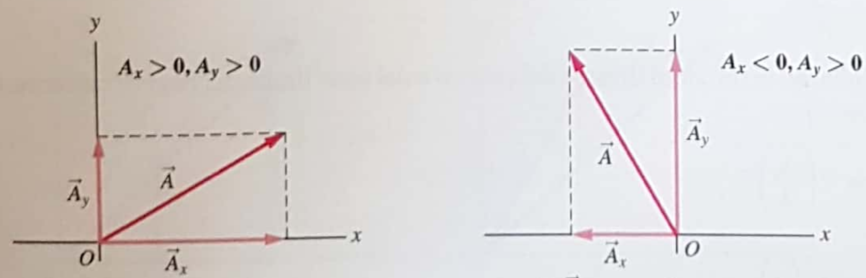


Figura 10
Componenti cartesiane di un vettore



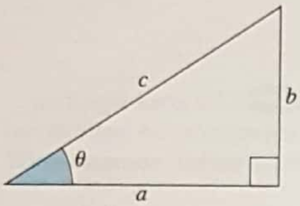
a) $\vec{A}_x$ e $\vec{A}_y$ puntano entrambi nel verso positivo, quindi $A_x > 0$ e $A_y > 0$.

b) $\vec{A}_x$ punta nel verso negativo dell'asse x, quindi $A_x < 0$.

Figura 11
Vettori con componenti entrambe positive (*a*) e di segno diverso (*b*)

Calcolo delle componenti di un vettore a partire dal modulo e dalla direzione

Le componenti A_x e A_y possono essere calcolate a partire dal modulo e dalla direzione di $\vec{A}$.
La **direzione** di $\vec{A}$ è individuata dall'angolo θ che il vettore forma con l'asse delle ascisse. Per ottenere una relazione tra θ e le componenti cartesiane di $\vec{A}$ dobbiamo introdurre due funzioni matematiche molto importanti: il **seno** e il **coseno** di un angolo.
Facendo riferimento al generico triangolo rettangolo di figura 12, il seno e il coseno sono definiti come segue:



$\text{sen}\,\theta = \dfrac{b}{c} \rightarrow b = c\,\text{sen}\,\theta$

$\cos\theta = \dfrac{a}{c} \rightarrow a = c\cos\theta$

Figura 12
Seno e coseno di un angolo

Seno e coseno di un angolo θ

Il seno dell'angolo θ, indicato con sen θ, è dato dal rapporto tra il cateto opposto all'angolo e l'ipotenusa:

$$\text{sen}\,\theta = \frac{b}{c}$$

Il coseno dell'angolo θ, indicato con cos θ, è dato dal rapporto tra il cateto adiacente all'angolo e l'ipotenusa:

$$\cos\theta = \frac{a}{c}$$

ATTENZIONE!

Seno e coseno
Le funzioni seno e coseno verranno studiate nel corso di matematica. Noi ci limiteremo a usarle praticamente e per determinare i loro valori utilizzeremo la calcolatrice tascabile.
Alcuni valori notevoli sono:

$\text{sen}\,0° = 0 \quad \text{sen}\,90° = 1$

$\cos 0° = 1 \quad \cos 90° = 0$

Il seno e il coseno di un angolo sono sempre non maggiori di 1.

Dalle due relazioni precedenti segue che il cateto b è uguale al prodotto dell'ipotenusa c per il seno dell'angolo opposto:

$$b = c\,\text{sen}\,\theta$$

mentre il cateto a è uguale al prodotto dell'ipotenusa c per il coseno dell'angolo adiacente:

$$a = c\cos\theta$$

Applicando queste relazioni al triangolo rettangolo di figura 13, che ha come cateti A_x e A_y e come ipotenusa A, si possono scrivere le componenti del vettore $\vec{A}$ in funzione del suo modulo e dell'angolo θ:

$$A_x = A\cos\theta$$
$$A_y = A\,\text{sen}\,\theta$$

Vediamo ora come si risolve il problema inverso, cioè come si calcola il modulo del vettore $\vec{A}$ e l'angolo θ che identifica la sua direzione conoscendo le componenti cartesiane A_x e A_y.
Il modulo del vettore $\vec{A}$ si ottiene applicando il teorema di Pitagora al triangolo rettangolo di figura 13:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

Per determinare θ, usando le relazioni date sopra scriviamo dapprima il coseno e il seno di θ:

$$\cos\theta = \frac{A_x}{A}$$

$$\text{sen}\,\theta = \frac{A_y}{A}$$

e poi calcoliamo le funzioni inverse del coseno e del seno (indicate, rispettivamente, con $\cos^{-1}$ e sen^{-1}):

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{A_x}{A}\right)$$

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{A_y}{A}\right)$$

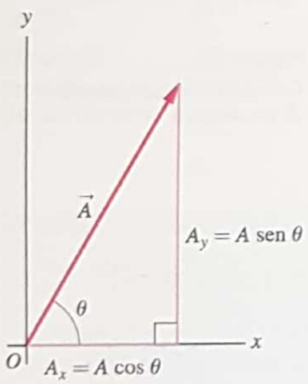


Figura 13
Componenti di un vettore in funzione del suo modulo e dell'angolo formato con l'asse delle ascisse

Queste formule significano che θ è l'angolo il cui coseno vale A_x/A e il cui seno vale A_y/A. Non approfondiremo la matematica delle funzioni $\cos^{-1}$ e sen^{-1}. Ci basterà sapere che possiamo determinare i loro valori con la nostra calcolatrice tascabile.

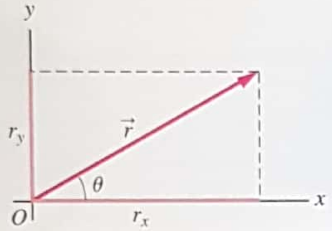
APPLICA SUBITO

3 Il vettore $\vec{r}$ disegnato in figura ha modulo $r = 1{,}50$ m. Se l'angolo θ è di 25,0°, quali sono le componenti cartesiane di $\vec{r}$?

Le componenti cartesiane r_x e r_y del vettore $\vec{r}$ si ottengono applicando le relazioni $r_x = r\cos\theta$ e $r_y = r\,\text{sen}\,\theta$. Abbiamo quindi:

$$r_x = r\cos\theta = (1{,}50\ \text{m})\cos(25{,}0°) = 1{,}36\ \text{m}$$

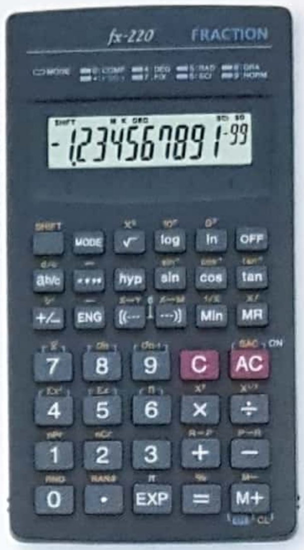
$$r_y = r\,\text{sen}\,\theta = (1{,}50\ \text{m})\,\text{sen}\,(25{,}0°) = 0{,}634\ \text{m}$$



Se, al contrario, conoscessimo le componenti $r_x = 1{,}36$ m ed $r_y = 0{,}634$ m e dovessimo calcolare il modulo r e l'angolo θ, avremmo:

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} = \sqrt{(1{,}36\ \text{m})^2 + (0{,}634\ \text{m})^2} = 1{,}50\ \text{m}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{r_x}{r}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{1{,}36\ \text{m}}{1{,}50\ \text{m}}\right) = 25{,}0°$$



▲ Le funzioni sen^{-1} e $\cos^{-1}$ su questa calcolatrice tascabile si attivano digitando, rispettivamente, i tasti SHIFT → SIN e SHIFT → COS.

Somma vettoriale per componenti

La convenienza della rappresentazione cartesiana dei vettori sta nel fatto che, usando le componenti cartesiane, diventa piuttosto facile sommare i vettori. Infatti:

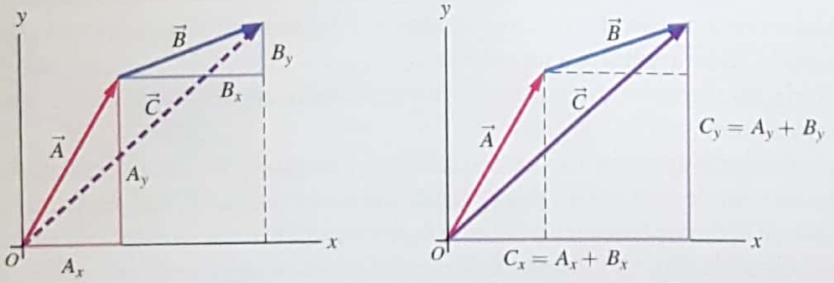
Somma vettoriale per componenti

Per sommare due o più vettori basta sommare le loro componenti.

Il metodo è illustrato in figura 14. Se $\vec{C}$ è la somma di $\vec{A}$ e $\vec{B}$, cioè $\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$, le componenti cartesiane di $\vec{C}$ sono date da:

$$C_x = A_x + B_x \qquad C_y = A_y + B_y$$

e per calcolare il modulo di $\vec{C}$ si applica la formula $C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$.



a) Componenti di $\vec{A}$ e $\vec{B}$ b) Componenti di $\vec{C}$

FIGURA ANIMATA

Figura 14
Somma di vettori mediante le loro componenti cartesiane

4. Le forze

Quando spingiamo un carrello al supermercato o trasciniamo uno scatolone sul pavimento, stiamo esercitando una forza. Analogamente, quando teniamo un libro in mano, stiamo esercitando una forza verso l'alto che si oppone all'attrazione verso il basso dovuta alla forza di gravità. Queste situazioni legate a semplici attività umane sono un esempio di ciò che in natura accade continuamente e a tutti livelli. Il mondo che ci circonda, infatti, è costituito da oggetti che esercitano delle azioni gli uni sugli altri. Queste azioni prendono il nome di **forze**.
Le forze possono agire **per contatto**, come quando colpiamo una palla da tennis con la racchetta o piantiamo un chiodo con un martello, o **a distanza**, come nel caso della forza di gravità o della forza magnetica che fa muovere l'ago di una bussola (fig. 15).

Figura 15
Forze per contatto e forze a distanza

L'effetto delle forze è di **modificare il moto** dei corpi. Esse possono anche produrre delle **deformazioni**, ma a livello microscopico queste sono comunque riconducibili a cambiamenti dello stato di moto delle molecole.

Qual è l'effetto di una forza su un corpo?

Effetto delle forze

Le forze tendono a modificare il moto dei corpi o a provocarne una deformazione.

Figura 16
Le forze sono grandezze vettoriali

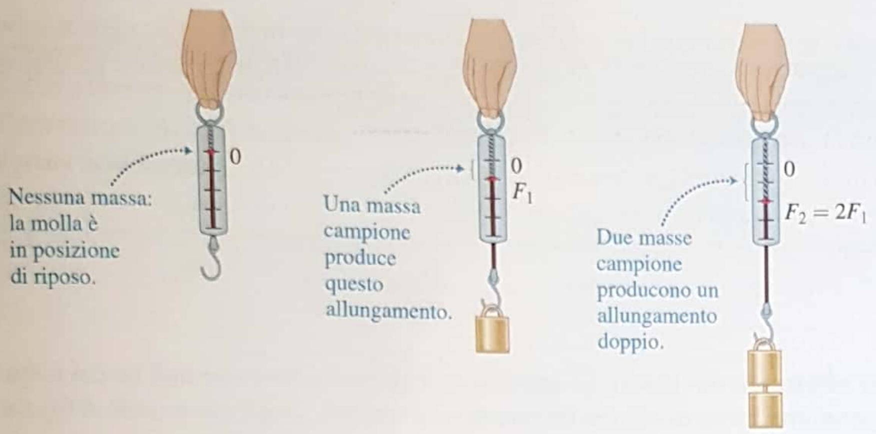
Le forze sono grandezze vettoriali

Se pensiamo a una forza familiare, come quella che esercitiamo spingendo un oggetto, ci convinciamo facilmente che le forze sono caratterizzate non solo da una certa *intensità* (o *modulo*), ma anche da una *direzione* e da un *verso*. Le forze sono quindi **grandezze vettoriali**, descritte matematicamente da vettori (fig. 16). La coda della freccia che rappresenta graficamente il vettore forza va collocata nel punto in cui agisce la forza, detto **punto di applicazione**.

La misura delle forze

Per misurare le forze si sfruttano i loro effetti, in particolare le deformazioni che esse causano sugli oggetti. Un possibile strumento di misura delle forze è il **dinamometro a molla**, il cui funzionamento è basato sull'allungamento che una forza produce quando viene applicata a una molla.
Per definizione, due forze hanno uguale intensità se, applicate al dinamometro, producono lo stesso allungamento.
Per *tarare* lo strumento applichiamo a esso una forza campione. Le forze di cui disponiamo più comodamente sono le forze peso di oggetti di massa conosciuta. Appendiamo quindi una massa campione al dinamometro e poniamo convenzionalmente uguale a 1 il valore della forza indicato dalla scala (fig. 17). Appendiamo poi due masse uguali alla precedente e assegniamo il valore 2 alla forza corrispondente. Procedendo in questo modo, costruiremo una scala

graduata e potremo misurare qualunque forza confrontando l'allungamento che essa produce con quello dovuto alle masse campione.



ATTENZIONE!

Possiamo procedere in questo modo nella costruzione della scala dello strumento perché tra le forze applicate e l'allungamento c'è una proporzionalità diretta, come vedremo studiando la forza elastica.

Figura 17 Taratura di un dinamometro

Possiamo ora definire l'**unità di misura della forza**, che è il **newton** (N).

Unità di misura della forza, newton

Un newton (N) è la forza che produce un allungamento della molla di un dinamometro uguale a quello prodotto da una massa appesa di 102 g.

Come si misura una forza?

Tabella 1 Intensità di alcune forze

Tipi di forza	Intensità (N)
Forza trainante di una locomotiva	$2{,}5 \cdot 10^5$
Forza per accelerare un'automobile	$7 \cdot 10^3$
Peso di un uomo adulto	$7 \cdot 10^2$
Peso di una mela	1

Risultante di più forze

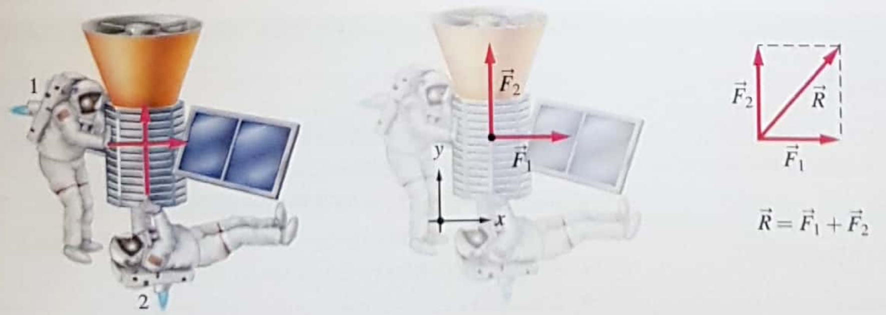
Quasi sempre su un corpo agiscono contemporaneamente più forze. Un libro fermo su un tavolo è soggetto a una forza verso il basso dovuta alla gravità e a una forza verso l'alto dovuta al tavolo; se spingiamo il libro parallelamente al tavolo, il libro è soggetto anche a una forza orizzontale dovuta alla nostra spinta. La **forza totale**, o **risultante**, esercitata sul libro è la somma vettoriale delle singole forze che agiscono su di esso.

Forza totale o risultante, $\vec{R}$

La forza totale o risultante di due o più forze che agiscono su un corpo è il vettore $\vec{R}$, somma vettoriale delle singole forze.

Come si calcola l'effetto di più forze?

Supponiamo che due astronauti stiano utilizzando dei propulsori a getto per spingere un satellite verso la navicella spaziale (fig. 18).



a) Rappresentazione fisica *b*) Schema delle forze *c*) Forza risultante

Figura 18 Risultante di due forze diverse in modulo e direzione

Se l'astronauta 1 esercita una forza $\vec{F}_1$ e l'astronauta 2 esercita una forza $\vec{F}_2$, la risultante delle forze sul satellite, cioè la forza effettiva che agisce sul satellite, è la somma vettoriale $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Poiché le forze si sommano vettorialmente, è possibile che su un corpo agiscano delle forze che non sono nulle, ma la cui risultante è nulla. In questo caso, le forze non producono alcun effetto complessivo e si dice che il corpo è in **equilibrio**.

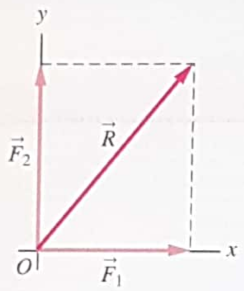
PROBLEM SOLVING 1

Al lavoro nello spazio

Quando escono nello spazio per effettuare dei lavori, gli astronauti indossano tute speciali su cui sono fissati dei propulsori a getto, che generano forze di alcune decine di newton (N). Se gli astronauti di figura 18 spingono il satellite con forze di intensità $F_1 = 32$ N ed $F_2 = 51$ N, le cui direzioni formano un angolo di 90°, qual è l'intensità della forza risultante sul satellite?

DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

Con il sistema di coordinate indicato in figura 18, l'astronauta 1 spinge nel verso positivo dell'asse x, mentre l'astronauta 2 spinge nel verso positivo dell'asse y. L'astronauta 1 esercita una forza di intensità $F_1 = 32$ N, l'astronauta 2 esercita una forza di intensità $F_2 = 51$ N. Dobbiamo calcolare il modulo di $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.



STRATEGIA

Calcoliamo il modulo del vettore $\vec{R}$ applicando il teorema di Pitagora al triangolo rettangolo.

Dati

$F_1 = 32$ N $\quad F_2 = 51$ N

Incognita

$R = ?$

SOLUZIONE

Calcola l'intensità della risultante applicando il teorema di Pitagora:

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{(32\text{ N})^2 + (51\text{ N})^2} = 60\text{ N}$$

PROVA TU **Quanto varrebbe il modulo di $\vec{R}$ se le forze $\vec{F}_1$ ed $\vec{F}_2$ avessero entrambe intensità di 50 N?**

[$R = 71$ N]

Fissa i concetti chiave

1. **SPIEGA** Quale effetto producono le forze sui corpi ai quali sono applicate?

2. **SPIEGA** Come si determina l'effetto di più forze che agiscono contemporaneamente su un corpo?

3. **IDENTIFICA** Quali fra le seguenti sono forze che agiscono per contatto C e quali a distanza D?
   - Forza di una mano che arresta un pallone C D
   - Forza di gravità che si esercita tra Terra e Luna C D
   - Forza del vento che muove le foglie C D
   - Forza di una calamita che attrae un chiodo C D

5. La forza peso

Ti è mai capitato di vedere un muratore all'opera mentre utilizza un filo a piombo? Si tratta di uno strumento usato per determinare la direzione verticale (fig. 19). Il filo teso indica la direzione della forza gravitazionale, rivolta verso il basso, che tende a far cadere il piombo: questa forza è il **peso** del piombo.

Figura 19
Il piombo è tirato verso il basso dal suo peso

Peso P di un oggetto

Il peso P di un corpo sulla superficie terrestre è la forza gravitazionale esercitata su di esso dalla Terra.

Che cos'è il peso di un corpo?

Il peso è dunque una forza, la **forza peso**, e nel SI si misura in newton (N).

Il peso di un corpo è legato alla sua massa: cerchiamo di capirlo nel seguente esempio. Supponiamo di pesare un mattone e di misurare il valore 8 N; se aggiungiamo un secondo mattone, identico al primo, in modo da raddoppiare la massa, misureremo un peso di 2 (8 N) = 16 N.

Quindi, in un determinato luogo, il modulo della forza peso P e la massa m di un corpo sono direttamente proporzionali.

Relazione tra peso P e massa m

Il modulo del peso P e la massa m di un oggetto sono **direttamente proporzionali**:

$$\underbrace{P}_{\text{peso (N)}} = \underbrace{m}_{\text{massa (kg)}}\,\underbrace{g}_{\text{costante di proporzionalità (N/kg)}}$$

IN DIGITALE
Math Help
La relazione di proporzionalità diretta

dove g è una **costante di proporzionalità** che sulla superficie terrestre vale:

$$g = 9{,}81\ \text{N/kg}$$

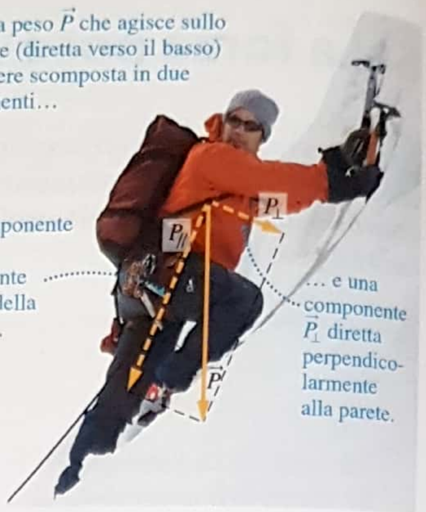
Una massa di 1 kg pesa quindi 9,81 N.

Il valore $g = 9{,}81$ N/kg è in realtà solo indicativo. Il coefficiente g dipende infatti, anche se poco, dal punto della superficie terrestre in cui ci si trova (ai poli è maggiore che all'equatore di circa lo 0,5%) e dall'altitudine (diminuisce all'aumentare dell'altezza rispetto al livello del mare).

Poiché il peso è una forza, è anche una grandezza vettoriale; esso ha un modulo (che abbiamo indicato con P), una direzione e un verso (fig. 20):

- il modulo della forza peso $\vec{P}$ vale mg;
- la direzione è verticale, diretta dal corpo al centro della Terra;
- il verso è diretto verso il basso.

Figura 20
Direzione e verso della forza peso



Differenza fra peso e massa

Qual è la differenza fra massa e peso?

Sottolineiamo la netta distinzione tra peso e massa: **il peso è la forza gravitazionale misurata in newton, la massa è una quantità invariante tipica di ogni corpo, misurata in kilogrammi.**

Se ci trovassimo sulla Luna la nostra massa non cambierebbe perché avremmo sempre la stessa quantità di materia, ma sulla Luna peseremmo meno di quanto pesiamo sulla Terra, poiché la forza gravitazionale lunare è minore di quella terrestre (cioè la costante g ha sulla Luna un valore più piccolo che sulla Terra).

Dal momento che la costante g lunare vale 1,62 N/kg (circa un sesto della costante g terrestre), il peso di un corpo sulla Luna è circa un sesto del peso sulla Terra.

Ad esempio, se una persona ha una massa $m = 55{,}1$ kg, il suo peso sulla Terra e sulla Luna è:

$$P_{\text{Terra}} = m \cdot 9{,}81\ \text{N/kg} = (55{,}1\ \text{kg})\,(9{,}81\ \text{N/kg}) = 541\ \text{N}$$

$$P_{\text{Luna}} = m \cdot 1{,}62\ \text{N/kg} = (55{,}1\ \text{kg})\,(1{,}62\ \text{N/kg}) = 89\ \text{N}$$

REAL PHYSICS

Che cosa rappresenta il numero che leggi sulla bilancia?

La massa $m = 55{,}1$ kg misurata dalla bilancia corrisponde sulla Terra a un peso $P = mg = 541$ N.

APPLICA SUBITO

4 **La sonda automatica Phoenix Mars Lander atterrò su Marte il 25 maggio 2008 dopo un viaggio durato più di nove mesi. Phoenix Mars Lander ha una massa di 350 kg. Qual è il suo peso sulla Terra e su Marte (dove $g = 3{,}69$ N/kg)?**

La massa della sonda (350 kg) è la stessa sulla Terra e su Marte. Il peso, invece, dipende dalla costante g che vale 9,81 N/kg sulla Terra e 3,69 N/kg su Marte:

$$P_{\text{Terra}} = mg_{\text{Terra}} = (350\ \text{kg})(9{,}81\ \text{N/kg}) = 3{,}43 \cdot 10^3\ \text{N}$$

$$P_{\text{Marte}} = mg_{\text{Marte}} = (350\ \text{kg})(3{,}69\ \text{N/kg}) = 1{,}29 \cdot 10^3\ \text{N}$$

Fissa i concetti chiave

1. IDENTIFICA Quale equazione è utilizzata per determinare il peso di un corpo conoscendo la sua massa?

2. CONFRONTA Il valore che leggi sulla bilancia pesapersone corrisponde al tuo peso o alla tua massa?

6. La forza elastica

Per allungare una molla dobbiamo compiere un certo sforzo. Ciò è dovuto al fatto che, quando viene allungata, la molla esercita sulla nostra mano una forza di richiamo, detta **forza elastica**, che tende a riportarla alla lunghezza iniziale (fig. 21).

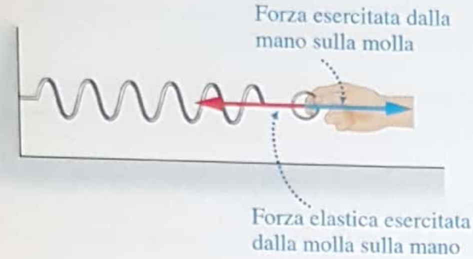


Figura 21
Forza elastica di una molla
La forza esercitata dalla mano e la forza elastica sono un esempio di forze di interazione tra corpi: studieremo nel capitolo 8 che le forze si presentano sempre a coppie.

La legge di Hooke stabilisce la relazione fra forza elastica e allungamento

Supponiamo che, allungando una molla di una quantità x, essa eserciti una forza di intensità F. Si può verificare che la forza elastica diventa $2F$ se allunghiamo la molla di una quantità doppia $2x$, e così via (fig. 22). **La forza elastica è direttamente proporzionale all'allungamento.**
Analogamente, se comprimiamo la molla di una quantità x, la molla spinge la mano con una forza elastica di intensità F, dove F ha lo stesso valore del caso precedente. Come ci si può aspettare, una compressione di $2x$ comporta una spinta della molla di intensità $2F$. La differenza rispetto al caso dell'allungamento è che il verso della forza è opposto (fig. 23), dal momento che la molla tende comunque a tornare alla sua lunghezza iniziale.
In definitiva possiamo dire che esiste una relazione di proporzionalità diretta tra la forza esercitata da una molla e l'allungamento, o la compressione, che essa subisce.

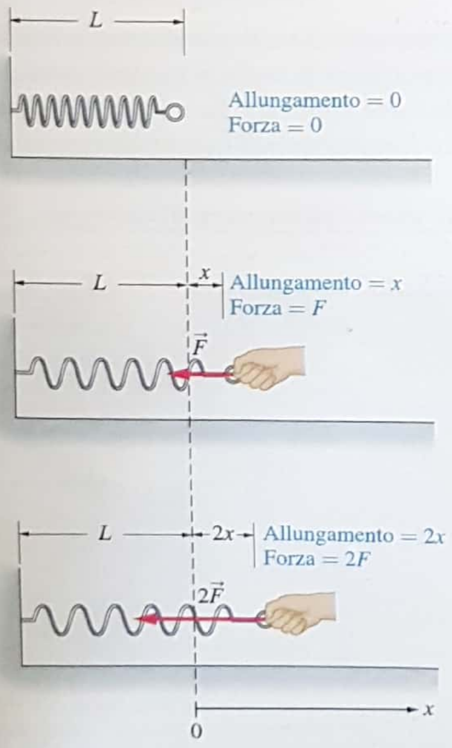


Figura 22
Forza di una molla: allungamento

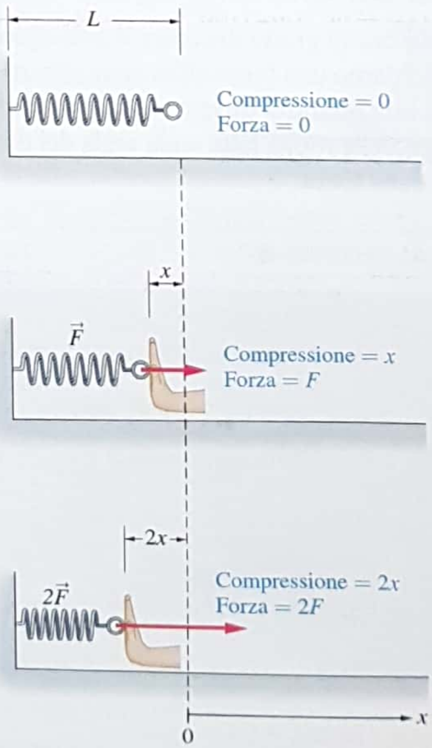


Figura 23
Forza di una molla: compressione

FIGURA ANIMATA

Questa relazione è nota come **legge di Hooke** e prende il nome dal fisico e naturalista inglese Robert Hooke (1635-1703) che per primo la formulò nel 1675.

Quale tipo di forza esercita una molla che viene estesa o compressa?

Legge di Hooke

Una molla esercita una forza elastica la cui intensità F è direttamente proporzionale all'allungamento o alla compressione x della molla:

$$\underbrace{F}_{\text{forza (N)}} = \overbrace{k}^{\text{costante elastica (N/m)}}\underbrace{x}_{\text{compressione/allungamento (m)}}$$

In questa espressione k è la costante di proporzionalità e prende il nome di **costante elastica della molla**. Essendo F misurata in newton e x in metri, l'unità di misura di k è il newton al metro, N/m.

significato di k

La costante k è uguale numericamente al valore della forza che allunga la molla di 1 metro: più grande è il valore di k, più rigida è la molla, cioè maggiore è la forza alla quale dobbiamo sottoporre la molla per ottenere lo stesso allungamento o compressione.

La legge di Hooke è una legge empirica

La legge di Hooke è una legge empirica, non una legge fisica universale, e non vale per qualsiasi valore di x; ad esempio, sappiamo che, se allunghiamo una molla oltre un certo limite, questa rimane deformata permanentemente e non ritorna più alla sua lunghezza iniziale. Diciamo in questo caso che la molla ha superato il proprio **limite di elasticità**. Tuttavia, per allungamenti e compressioni abbastanza piccoli, la legge di Hooke è sufficientemente accurata.

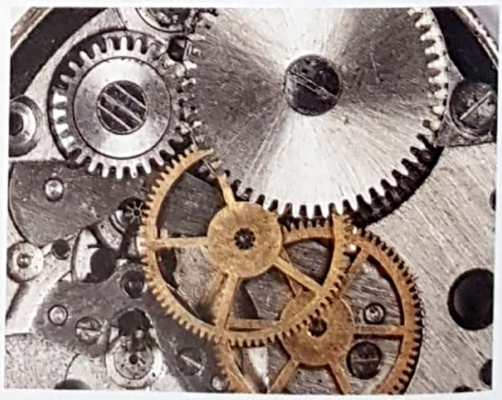
Si parla di *molle ideali* per indicare le molle delle quali si può trascurare la massa e che obbediscono esattamente alla legge di Hooke. D'ora in poi, per "molle" intenderemo sempre delle molle ideali.

La legge di Hooke spiega il funzionamento di un dinamometro a molla

Siamo ora in grado di capire il principio di funzionamento di un dinamometro a molla. Se applichiamo una forza all'estremo libero di un dinamometro, la molla al suo interno si allunga di una quantità direttamente proporzionale alla forza applicata. La misura dell'allungamento della molla letta sulla scala del dinamometro fornisce quindi indirettamente una misura della forza.

REAL PHYSICS

▲ Le grandi molle del carrello ferroviario sono così rigide e pesanti che non si riescono a comprimere o allungare con le mani; tuttavia, ne sono necessarie quattro per attenuare le vibrazioni di una carrozza.



▲ La sottile molla a spirale del bilanciere di un orologio si flette anche con una leggerissima pressione; essa però esercita ugualmente una forza sufficiente a mantenere in movimento il delicato meccanismo dell'orologio.

La legge di Hooke in forma vettoriale stabilisce il verso della forza elastica

Poiché il verso della forza elastica cambia a seconda che la molla venga allungata o compressa, conviene riscrivere la legge di Hooke in forma vettoriale indicando con $\vec{x}$ il vettore spostamento dell'estremità della molla dalla posizione di equilibrio e con $\vec{F}$ la forza elastica (fig. 24):

Legge di Hooke in forma vettoriale

Una molla che subisce uno spostamento $\vec{x}$ dalla posizione di equilibrio esercita una forza elastica data da:

$\vec{F} = -k\vec{x}$ dove k è la costante elastica della molla

Il segno meno in questa relazione esprime il fatto che la forza elastica è sempre opposta allo spostamento della molla dalla posizione di equilibrio.

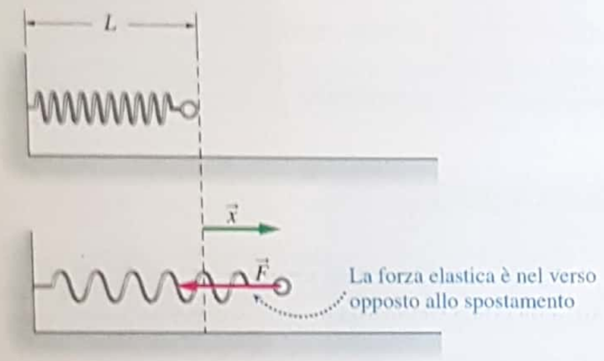


Figura 24
Legge di Hooke in forma vettoriale

APPLICA SUBITO

5 **La molla 1 e la molla 2 hanno rispettivamente costante elastica $k_1 = 200$ N/m e $k_2 = 100$ N/m.**

a) Se si applica a entrambe le molle la stessa forza $F = 4$ N, qual è il loro allungamento?

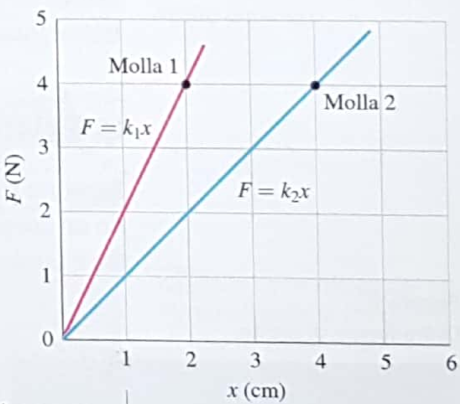
b) Rappresenta graficamente la legge di Hooke per le due molle.

a) Dalla legge di Hooke si ottiene che l'allungamento della molla 1 è:

$$x = \frac{F}{k_1} = \frac{4\ \text{N}}{200\ \text{N/m}} = 0{,}02\ \text{m}$$

mentre l'allungamento della molla 2 è:

$$x = \frac{F}{k_2} = \frac{4\ \text{N}}{100\ \text{N/m}} = 0{,}04\ \text{m} \quad \text{cioè il doppio}$$



b) La legge di Hooke per le due molle è rappresentata dalle rette in figura. Notiamo che quanto più grande è la costante elastica (e quindi più rigida la molla), tanto più è ripida la retta che descrive la legge (in un riferimento cartesiano in cui si abbia la forza F sulle ordinate).

Fissa i concetti chiave

1. IDENTIFICA Quale legge è utilizzata per determinare l'allungamento di una molla che viene compressa o tirata?

2. SPIEGA Che cosa accade quando una molla supera il proprio limite di elasticità?

3. SCELTA TRIPLA Per raddoppiare l'allungamento di una molla è necessario applicare una forza:

A doppia.
B dimezzata.
C dipende dalla molla.

7. Le forze di attrito

Le forze di attrito si oppongono al moto

Sai per esperienza che un vassoio si ferma rapidamente una volta che smetti di spingerlo sul piano di un tavolo. Il vassoio è portato a fermarsi dalla **forza di attrito**. Se osservata a livello atomico, anche la più liscia delle superfici risulta scabra e dentellata (fig. 25) e per far scorrere due superfici l'una sull'altra occorre superare la resistenza dovuta agli urti fra i loro microscopici avvallamenti. Questa resistenza è l'origine della forza che chiamiamo attrito.

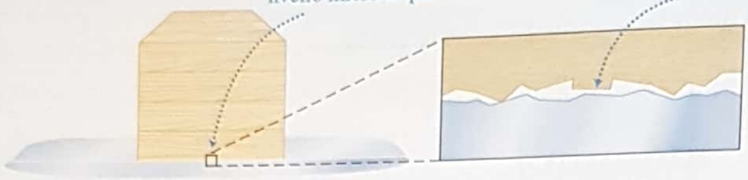


Figura 25
L'origine dell'attrito

Attrito: pro e contro

Spesso pensiamo all'attrito come a qualcosa che dobbiamo ridurre, o addirittura eliminare per quanto possibile. Ad esempio, circa il 20% del carburante messo nel serbatoio di un'automobile è consumato in attriti interni al motore e non contribuisce al movimento: è chiaro che in questo caso ridurre l'attrito sarebbe molto desiderabile.
L'attrito può essere invece utile, e anche indispensabile, in altre situazioni. Supponi, ad esempio, di essere in piedi e di decidere di cominciare a camminare in avanti. La forza che permette questa azione è la forza di attrito fra le tue scarpe e il suolo. Semplicemente, non potremmo correre o camminare in assenza di attrito: è già abbastanza difficile farlo quando l'attrito di riduce un po', come sul ghiaccio. Lo stesso vale per far partire o arrestare un'automobile: l'attrito è insomma un importante aspetto della vita di tutti i giorni.

Esistono diversi tipi di attrito

Esistono molti tipi di attrito: una prima distinzione è quella fra l'attrito che si manifesta quando un corpo *scivola* su una superficie (fig. 26a), detto **attrito radente**, e l'attrito che si manifesta quando un corpo *rotola* su una superficie (fig. 26b), detto **attrito volvente**.

Figura 26
Le tre forme di attrito

a) Attrito radente
I giocatori di hockey manovrano facilmente il puck, disco in gomma vulcanizzata, grazie al minimo attrito radente fra disco e ghiaccio.

b) Attrito volvente
Percorrendo la curva un'auto si mantiene in traiettoria grazie all'attrito volvente fra i suoi pneumatici e la superficie stradale.

c) Attrito viscoso
L'attrito viscoso con l'aria rallenta il moto del ciclista; per ridurre questo attrito i ciclisti assumono posizioni raccolte sulla bicicletta.

L'attrito volvente è molto meno intenso dell'attrito radente tra le stesse superfici.
La forza di attrito radente si distingue ulteriormente in:

- **attrito statico**, che bisogna vincere per mettere in movimento un corpo su una superficie;
- **attrito dinamico**, che bisogna vincere per mantenere in movimento un corpo su una superficie.

C'è un'ulteriore forma di attrito, detta **attrito del mezzo** o **attrito viscoso**, che si oppone al moto di un corpo in un mezzo fluido (cioè in un gas o in un liquido) e che dipende dalla velocità e dalla forma del corpo (fig. 26c).
La forza di attrito è una grandezza vettoriale. L'attrito radente ha direzione parallela alla superficie di contatto; il verso è opposto a quello dello scorrimento.
L'attrito viscoso ha direzione uguale a quella della velocità del corpo.

ATTENZIONE!
L'attrito volvente è un tipo di attrito statico: per capirlo meglio, leggi *Ragiona con un esempio* a pagina 68.

L'attrito dinamico agisce fra superfici in scorrimento

L'attrito dinamico, come dice il nome, si manifesta quando un corpo si muove scivolando su una superficie. La forza di attrito dinamico $\vec{F}_d$, dovuta al contatto tra la superficie del corpo e quella su cui esso si muove, agisce in modo da opporsi allo scivolamento del corpo (fig. 27).

a) La forza di attrito tra il mobile e il pavimento impedisce lo scivolamento verso destra ed è quindi diretta nel *verso opposto* alla forza che spinge il mobile.

b) La forza di attrito non sempre si oppone al moto del corpo. La forza di attrito tra il piede e il terreno impedisce lo scivolamento all'indietro ed è quindi diretta nel *verso del moto*.

Figura 27
Attrito dinamico

Si può verificare sperimentalmente che la forza di attrito radente dinamico non dipende né dall'area della superficie di contatto né dalla velocità del corpo, ma solo dalla forza premente che agisce *perpendicolarmente* sulla superficie.
In termini matematici, la legge dell'attrito dinamico è:

Legge dell'attrito dinamico

$$F_d = \mu_d F_\perp$$

intensità della forza di attrito dinamico (N)
intensità della forza premente (N)
coefficiente di attrito dinamico

Da cosa dipende l'intensità della forza di attrito dinamico?

dove $\vec{F}_\perp$ è la forza premente perpendicolare e la costante di proporzionalità μ_d è il **coefficiente di attrito dinamico**.
Poiché $\vec{F}_d$ e $\vec{F}_\perp$ sono entrambe forze e hanno la stessa unità di misura, il coefficiente μ_d è un numero adimensionale, cioè un numero puro, senza una dimensione fisica. I suoi valori dipendono dal tipo di superfici a contatto, e variano fra 0 e 1.

Alcuni esempi di attrito dinamico

Se il corpo che scivola sulla superficie non è soggetto ad alcuna forza esterna, la forza premente $\vec{F}_\perp$ è semplicemente data dal suo peso $\vec{P}$. Consideriamo, ad esempio, un mattone che scorre su una superficie orizzontale, non soggetto ad alcuna forza esterna (fig. 28). In questo caso la forza di attrito dinamico agisce in direzione opposta al moto e dipende dal peso $\vec{P}$ del mattone:

$$F_d = \mu_d F_\perp = \mu_d P$$

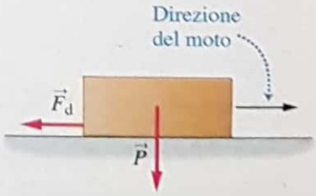


Figura 28
Forza di attrito dinamico per un corpo non soggetto a forze esterne

Supponiamo ora di premere con la mano sul mattone con una forza $\vec{F}$ (fig. 29). In questo caso sulla superficie agisce, oltre alla forza peso $\vec{P}$ del corpo, anche la forza $\vec{F}$ esercitata dalla mano, per cui la forza premente diventa $\vec{F}_\perp = \vec{F} + \vec{P}$.
L'intensità dell'attrito dinamico in questo caso è:

$$F_d = \mu_d F_\perp = \mu_d (P + F)$$

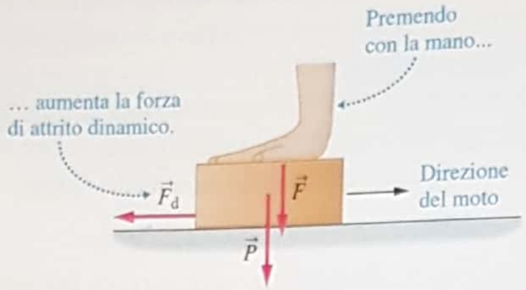
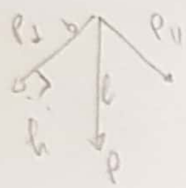


Figura 29
Forza di attrito dinamico per un corpo soggetto a una forza esterna

Consideriamo, infine, un'altra situazione molto comune, lo scivolamento di un corpo lungo un piano inclinato (fig. 30).
In questo caso la forza premente è la componente della forza peso perpendicolare al piano, che è inferiore al modulo P della forza peso. È solo questa componente che contribuisce alla forza di attrito.
Dalla figura si vede che, se θ è l'angolo di inclinazione del piano, il modulo della forza premente è $F_\perp = P_\perp = P \cos\theta$ ed è sempre minore del peso P. La forza di attrito su un piano inclinato, a parità di forza premente, è quindi *minore* che su un piano orizzontale:



$$F_d = \mu_d F_\perp = \mu_d P \cos\theta$$

FIGURA ANIMATA

$P_{\parallel} = P \cdot \frac{h}{l}$

$P_{\perp} = P \cdot \frac{b}{l}$

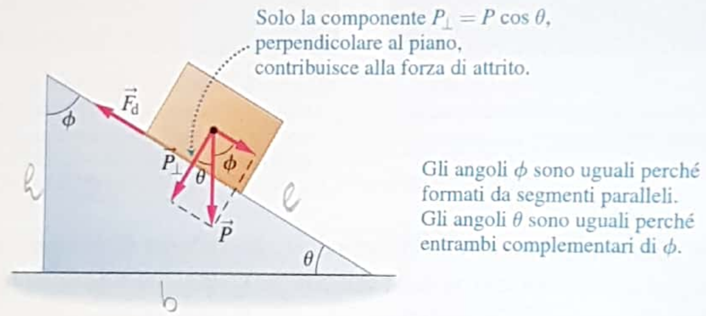


Figura 30
Forza di attrito dinamico su un piano inclinato

Riassumiamo le leggi dell'attrito radente dinamico:

Quali leggi descrivono l'attrito radente dinamico?

Leggi dell'attrito radente dinamico

La forza di attrito dinamico tra un corpo e una superficie:
1) è parallela alla superficie di contatto e il suo verso è opposto a quello dello scivolamento del corpo sulla superficie;
2) è indipendente dall'area della superficie di contatto e dalla velocità del corpo;
3) è direttamente proporzionale alla forza premente sulla superficie, $F_d = \mu_d F_\perp$.

L'attrito statico si oppone all'inizio del moto di un corpo

Quale confronto si può fare fra attrito statico e attrito dinamico?

L'attrito statico tende a impedire che un oggetto fermo su una superficie, sottoposto a una forza parallela alla superficie, cominci a scivolare. Anche questo tipo di attrito, come quello dinamico, è dovuto alle microscopiche irregolarità delle superfici a contatto. A parità di tipo di superfici a contatto e di forza premente, **l'attrito statico è generalmente maggiore di quello**

dinamico perché, quando le superfici sono in contatto statico, i loro microscopici avvallamenti possono aderire maggiormente l'uno all'altro, determinando una forte interazione fra le due superfici (tab. 2).

Tabella 2 Alcuni valori dei coefficienti di attrito

Materiale	Attrito dinamico μ_d	Attrito statico μ_s
Gomma su cemento (asciutto)	0,80	1,00-4,00
Acciaio su acciaio	0,57	0,74
Vetro su vetro	0,40	0,94
Legno su pelle	0,40	0,50
Gomma su cemento (bagnato)	0,25	0,30
Sci sciolinati su neve	0,05	0,10
Articolazione del ginocchio	0,003	0,01

Consideriamo, ad esempio, un mattone fermo su un tavolo (fig. 31).
Se tiriamo il mattone con una forza così piccola da non riuscire a farlo muovere, sul mattone agisce una forza di attrito statico $\vec{F}_s$ che tende a mantenerlo fermo, essendo uguale e opposta alla forza che applichiamo sul mattone. Aumentiamo ora gradualmente l'intensità della forza applicata. Fino a che il mattone rimane fermo, aumenta anche la forza di attrito statico, che continua a compensare quella applicata. A un certo punto il mattone comincia a muoversi e in quel momento la forza di attrito statico raggiunge il suo valore massimo, che indicheremo con $F_{s,max}$. Successivamente, l'attrito diventa dinamico. La forza $\vec{F}_{s,max}$ è detta **forza massima di attrito statico** o **forza di attrito al distacco.**

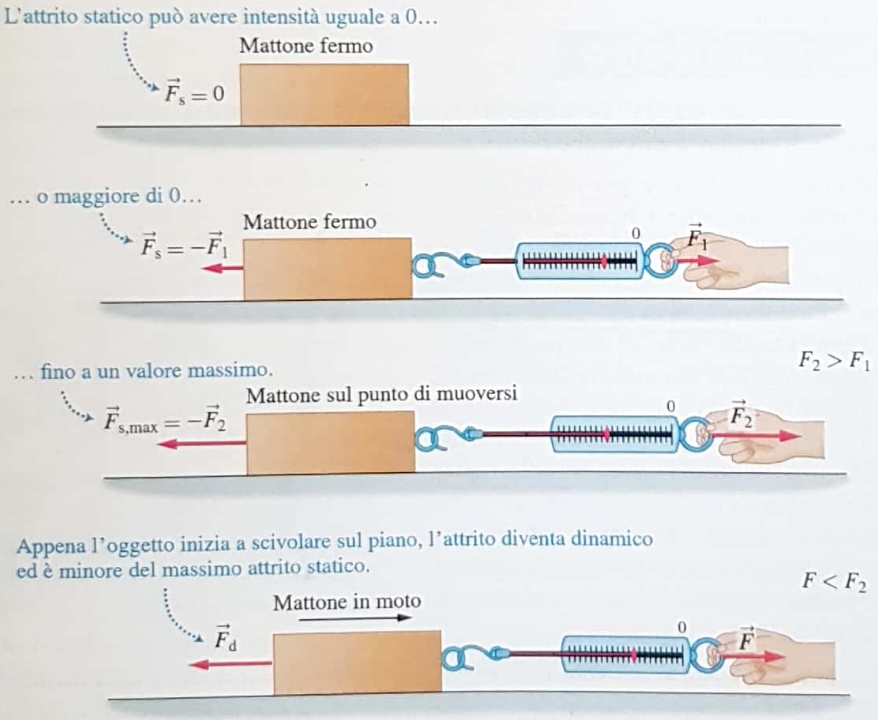


FIGURA ANIMATA

Figura 31
Il limite massimo dell'attrito statico

Si trova sperimentalmente che la forza massima di attrito statico non dipende dall'area della superficie di contatto ed è direttamente proporzionale alla forza premente:

Forza massima di attrito statico

$$F_{s,max} = \mu_s F_\perp$$

intensità della forza massima di attrito statico (N)
intensità della forza premente (N)
coefficiente di attrito statico

Da cosa dipende l'intensità della forza massima di attrito statico?

La costante di proporzionalità μ_s è il **coefficiente di attrito statico.**

■ REAL PHYSICS ■

Da che cosa sono prodotte le "scie di roccia" nel deserto?

■ Il coefficiente di attrito statico tra due superfici dipende da molti fattori, incluso il fatto che le superfici siano asciutte o bagnate. Nel deserto della Valle della Morte, in California, le rare ma forti piogge rendono viscido il terreno sabbioso e possono a volte ridurre l'attrito tra le rocce e il terreno in modo tale che i forti venti possono trascinare le rocce anche per distanze considerevoli. Il risultato è evidente nelle "scie di roccia" che registrano la direzione del vento. ■

Le osservazioni precedenti possono essere riassunte nelle seguenti leggi dell'attrito statico:

Quali leggi descrivono l'attrito statico?

Leggi dell'attrito statico

La forza di attrito statico tra un corpo e una superficie:

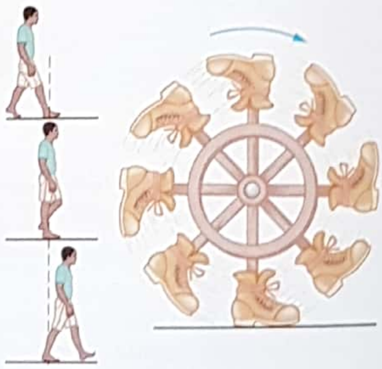
1) è parallela alla superficie di contatto e il suo verso è opposto a quello in cui si muoverebbe il corpo in assenza di attrito;
2) è indipendente dall'area della superficie di contatto;
3) può assumere un qualsiasi valore tra zero e la forza massima di attrito statico: $F_{s,max} = \mu_s F_{\perp}$;
4) finché il corpo non si muove, l'intensità della forza di attrito è uguale a quella della forza applicata al corpo.

RAGIONA CON UN ESEMPIO

VIDEO
Attrito statico vs attrito dinamico

6 Un'auto viaggia con le ruote che si muovono liberamente. L'attrito fra le ruote e l'asfalto è statico o dinamico?

Visto che l'auto si muove, potremmo pensare che l'attrito coinvolto sia di tipo dinamico, ma non è così! Al contrario, l'attrito è statico perché il punto più basso della ruota ha un contatto statico con l'asfalto.
Per capire meglio, osserva i tuoi piedi mentre cammini. Anche se stai muovendoti in avanti, ogni piede ha un contatto statico con la strada ogni volta che sei in appoggio su di esso. Il tuo piede non si muove di nuovo fino a che non lo sollevi e lo porti avanti per il passo successivo.
Una ruota può essere immaginata come una serie di piedi disposti in cerchio, ognuno dei quali è istantaneamente in contatto statico con l'asfalto.



Fissa i concetti chiave

1. APPLICA Un libro scivola su un tavolo e dopo poco si ferma. Come variano la forza perpendicolare alla superficie del tavolo e la forza di attrito se un secondo libro è posto sopra il primo e il blocco dei due libri scivola sul piano?

2. VALUTA Un tuo compagno ti dice che per ridurre lo spazio di frenata con la bicicletta occorre che tu blocchi i freni e slitti fino allo stop. È giusto?

3. FORNISCI ESEMPI Descrivi due situazioni della vita di tutti i giorni in cui l'attrito è indesiderabile e due in cui è utile.