CAPITOLO

7

Le forze: peso e forza elastica

Una molla che si allunga è uno strumento di misura che la natura ci offre già pronto: basta imparare a leggerlo.

OBIETTIVI

1. Riconoscere una forza dai suoi effetti e rappresentarla come un vettore.
2. Distinguere le forze di contatto da quelle a distanza e nominare le quattro interazioni fondamentali.
3. Misurare una forza con il dinamometro ed esprimerla in newton.
4. Calcolare la forza risultante di forze collineari, perpendicolari e concorrenti.
5. Calcolare la forza-peso con $P = m\,g$ e distinguere la massa dal peso.
6. Applicare la legge di Hooke e ricavare la costante elastica di una molla da una tabella o da un grafico.

INDICE DEL CAPITOLO

7.1 Che cos'è una forza 2
7.2 Il dinamometro e il newton 4
7.3 La forza risultante 5
7.4 La forza-peso 8
7.5 La forza elastica e la legge di Hooke 11

Fisica 1 · Parte II · Vettori e forze · versione 1.0
Capitolo 7: Le forze: peso e forza elastica · pagine 175–198 del volume completo · estratto per lo studio

Spingi la porta della classe e si apre. Schiacci una pallina di gomma e si deforma. Lasci cadere le chiavi e scendono sempre più veloci verso il pavimento. Tiri l'elastico di una fionda e lo senti tirare a sua volta le tue dita. In ognuna di queste situazioni c'è qualcosa che agisce su un corpo e ne cambia la forma o il movimento: è quella che in fisica si chiama *forza*.

Nel linguaggio di tutti i giorni la parola «forza» ha molti significati: la forza di volontà, la forza di un argomento, «forza Italia» allo stadio. In fisica il suo significato è uno solo, preciso e misurabile. In questo capitolo impariamo a riconoscere le forze dai loro effetti, a misurarle con uno strumento semplice, il dinamometro, e a trattarle come vettori, usando gli strumenti del capitolo 6. Poi studiamo da vicino due forze che incontriamo continuamente: il *peso*, con cui la Terra attira ogni corpo, e la *forza elastica*, con cui una molla reagisce quando la deformiamo. Sono le due forze che useremo di più in tutta la parte del libro dedicata all'equilibrio.

7.1 Che cos'è una forza

7.1.1 Gli effetti di una forza

Non vediamo le forze: vediamo i loro effetti. È proprio dagli effetti che conviene partire per definirle. Una **forza** è un'azione capace di **deformare** un corpo oppure di **cambiarne lo stato di moto**, cioè di metterlo in movimento, fermarlo, farlo andare più veloce o più piano, o fargli cambiare direzione.

Il primo effetto si chiama **effetto statico** (o deformante): una molla si allunga, il cuscino si schiaccia sotto la testa, la mensola si incurva un poco sotto il peso dei libri. Alcune deformazioni si vedono a occhio nudo, altre sono minuscole ma ci sono sempre: anche il tavolo di marmo su cui appoggi un vocabolario si deforma, di una quantità che solo strumenti sensibili possono rilevare.

Il secondo effetto si chiama **effetto dinamico**: il pallone calciato parte, la bicicletta frenata rallenta, la palla da tennis colpita dalla racchetta inverte il suo moto. Che relazione precisa ci sia fra una forza e il cambiamento di moto che produce è l'argomento della *dinamica*, che studierai il prossimo anno. In questo volume useremo soprattutto l'effetto statico, che è più facile da misurare, e studieremo i corpi che restano fermi sotto l'azione di più forze.

7.1.2 La forza è un vettore

Immagina di spingere un carrello della spesa con la stessa intensità, prima in avanti e poi di lato: l'effetto è completamente diverso. Per descrivere una forza non basta dire «quanto è forte»: bisogna dire anche in che direzione e in che verso agisce, e dove è applicata. La forza è

quindi una grandezza vettoriale, e si rappresenta con una freccia, come lo spostamento del capitolo 6. Di ogni forza occorre conoscere:

- il **modulo** (o intensità), un numero positivo seguito dall'unità di misura, che è il newton (N);
- la **direzione**, cioè la retta lungo cui la forza agisce, detta **retta d'azione**;
- il **verso**, indicato dalla punta della freccia;
- il **punto di applicazione**, il punto del corpo su cui la forza agisce.

Per gli spostamenti il punto di partenza della freccia non contava: due spostamenti uguali disegnati in posizioni diverse erano lo stesso vettore. Per le forze, invece, il punto di applicazione conta: spingere una porta vicino alla maniglia o vicino ai cardini produce effetti molto diversi, come vedrai nel capitolo 10. Nel testo scriviamo il vettore forza in grassetto corsivo, $\boldsymbol{F}$, e il suo modulo in corsivo semplice, F; nelle figure il vettore porta una piccola freccia sopra la lettera.

7.1.3 Forze di contatto e forze a distanza

Molte forze agiscono solo quando due corpi si toccano: la spinta della mano sulla porta, la tensione di una corda sul secchio che regge, l'attrito delle scarpe sul pavimento, la forza con cui una molla tira il corpo appeso al suo estremo. Sono le **forze di contatto**. Altre forze agiscono anche fra corpi lontani, senza che nulla di visibile li colleghi: la Terra attira la Luna a quasi quattrocentomila chilometri di distanza, una calamita attira un chiodo attraverso un foglio di carta, un palloncino strofinato sui capelli attira i pezzetti di carta. Sono le **forze a distanza**.

Questa distinzione è comoda nella vita di tutti i giorni, ma la fisica moderna ha scoperto che, scendendo fino agli atomi, tutte le forze della natura si riducono a quattro sole **interazioni fondamentali**. L'**interazione gravitazionale** agisce fra tutti i corpi dotati di massa: è debolissima fra oggetti piccoli, ma domina a grande scala e tiene insieme i pianeti, le stelle e le galassie. L'**interazione elettromagnetica** agisce fra le cariche elettriche: tiene insieme gli atomi e le molecole, e da essa derivano quasi tutte le forze di contatto, perché quando la mano spinge la porta sono gli elettroni degli atomi della pelle a respingere quelli degli atomi del legno. L'**interazione nucleare forte** tiene uniti protoni e neutroni nel nucleo atomico, e l'**interazione nucleare debole** è responsabile di alcuni decadimenti radioattivi. Le ultime due agiscono solo su distanze piccolissime, dell'ordine delle dimensioni di un nucleo, e non le incontreremo in questo volume.

DA RICORDARE

Una forza si riconosce dai suoi effetti: deforma i corpi (effetto statico) o ne cambia lo stato di moto (effetto dinamico). È un vettore: per descriverla servono modulo, direzione, verso e punto di applicazione. Una forza agisce sempre *su* un corpo ed è esercitata *da* un altro corpo: quando disegni una forza chiediti sempre «chi la esercita, e su chi?».

7.2 Il dinamometro e il newton

7.2.1 Una definizione operativa

Nel capitolo 2 abbiamo visto che una grandezza fisica si definisce indicando *come si misura*. Per le forze, la strada più semplice passa per l'effetto statico. Prendiamo una molla e appendiamola a un sostegno. Diciamo che due forze hanno lo **stesso modulo** se, applicate alla stessa molla nello stesso modo, producono lo stesso allungamento. Diciamo poi che una forza è **doppia** di un'altra se produce lo stesso effetto di due forze uguali alla prima applicate insieme, per esempio appendendo alla molla due oggetti identici invece di uno. Con queste due regole possiamo confrontare le forze fra loro e costruire una scala, esattamente come si fa per le lunghezze con un righello.

Resta da scegliere l'unità. Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della forza è il **newton** (simbolo N), in onore di Isaac Newton. Non è un'unità fondamentale ma derivata, e in unità fondamentali vale

$$1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$$

Il significato di questa uguaglianza ti sarà chiaro il prossimo anno, quando studierai il legame fra forza e cambiamento di velocità. Per ora conviene farsi un'idea concreta della sua grandezza: **1 N è circa il peso di un oggetto di 102 g**, per esempio di una piccola mela o di un vasetto di yogurt. Una persona adulta che si regge su una bilancia le spinge contro con una forza di qualche centinaio di newton; per sollevare uno zaino scolastico di 8 kg ne servono circa 80.

7.2.2 Il dinamometro

Lo strumento che misura le forze sfruttando la deformazione di una molla si chiama **dinamometro** (Figura 7.1). Una molla di acciaio è fissata in alto all'interno di un tubo trasparente, e il suo estremo inferiore porta un indice e un'asta che termina con un gancio. Quando al gancio si applica una forza, la molla si allunga e l'indice scorre lungo una scala graduata direttamente in newton. Come vedremo nel paragrafo 7.5, per una buona molla l'allungamento è proporzionale alla forza: per questo le tacche della scala sono equidistanti.

Un dinamometro, come ogni strumento, ha una portata e una sensibilità (capitolo 4). Quello della figura ha portata 10 N e tacche ogni 0,25 N. Nel laboratorio scolastico si trovano dinamometri con portate diverse, da 1 N a 100 N circa: la molla è più rigida nei dinamometri a portata maggiore, che sono però meno sensibili. Per usare bene uno strumento conviene scegliere quello con la portata più piccola fra quelli adatti alla misura.

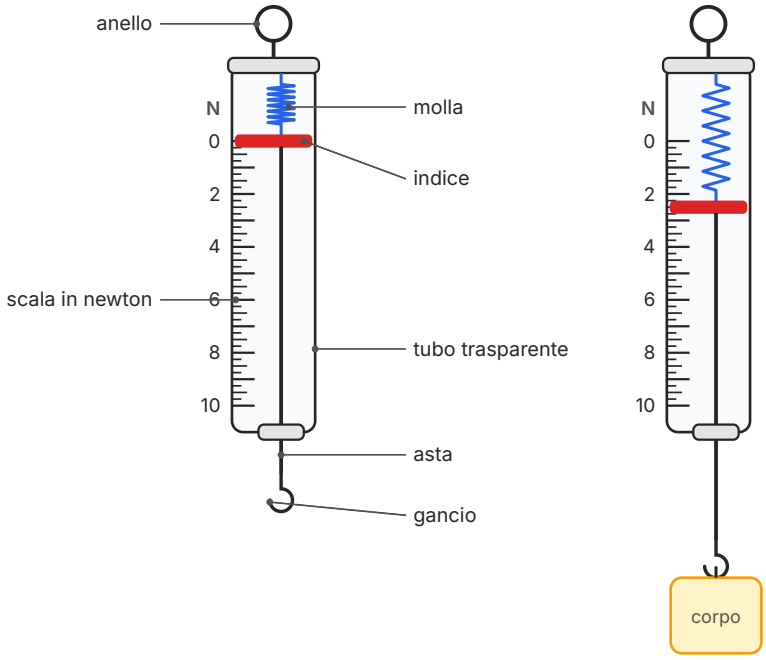


Figura 7.1 Il dinamometro. a) Senza carico l'indice è sullo zero della scala. b) Con un corpo appeso la molla si allunga e l'indice segna 2,5 N. Poiché l'allungamento è proporzionale alla forza, le tacche sono equidistanti (portata 10 N, una tacca ogni 0,25 N).

Prima di ogni misura bisogna controllare che, senza carico, l'indice sia esattamente sullo zero, con lo strumento tenuto nella stessa posizione in cui verrà usato. Se l'indice è spostato, quasi tutti i dinamometri hanno una vite di regolazione dello zero; se non lo si corregge, tutte le misure saranno affette da un errore sistematico. La lettura va fatta con l'occhio all'altezza dell'indice, per evitare l'errore di parallasse.

Un dinamometro misura la forza applicata al suo gancio *lungo il proprio asse*. Se tiri il gancio di traverso, la molla sfrega contro il tubo e la lettura è sbagliata. Inoltre non bisogna mai superare la portata: oltre un certo allungamento la molla si deforma in modo permanente (paragrafo 7.5) e lo strumento non torna più a zero.

7.3 La forza risultante

Su un corpo agiscono quasi sempre più forze contemporaneamente. Un secchio d'acqua è tirato in basso dalla Terra e in alto dalla mano che lo regge; una barca a vela è spinta dal vento e fre-

nata dall'acqua. L'esperienza mostra che l'effetto complessivo di più forze applicate a uno stesso punto è identico a quello di *una sola* forza, uguale alla loro **somma vettoriale**. Questa forza si chiama **forza risultante** (o semplicemente risultante) e si indica con $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \boldsymbol{F}_3 + \ldots$$

Che le forze si sommino come vettori non è ovvio: è un fatto sperimentale, che si può verificare in laboratorio con tre dinamometri collegati a un anello: quando l'anello è fermo, la forza segnata da ciascun dinamometro è l'opposto della somma vettoriale delle altre due. Grazie a questo fatto possiamo usare tutti gli strumenti del capitolo 6. Le forze che agiscono su uno stesso punto, o le cui rette d'azione passano per uno stesso punto, si dicono **forze concorrenti**; in questo capitolo consideriamo solo forze di questo tipo.

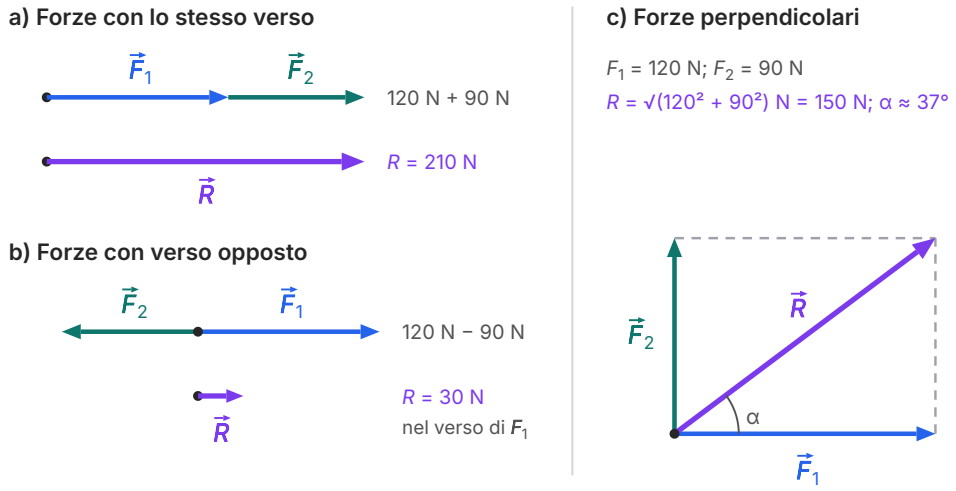


Figura 7.2 La risultante di due forze di 120 N e 90 N applicate allo stesso punto. a) Forze con lo stesso verso: 210 N. b) Forze con verso opposto: 30 N nel verso della forza maggiore. c) Forze perpendicolari: con la regola del parallelogramma e il teorema di Pitagora, 150 N, a circa 37° dalla forza di 120 N. Le frecce sono in scala.

7.3.1 Forze collineari

Due o più forze che hanno la stessa retta d'azione si dicono **forze collineari**. Se hanno lo stesso verso, la risultante ha quel verso e modulo uguale alla somma dei moduli: due ragazzi che spingono un'auto in panne, uno con 120 N e l'altro con 90 N, producono lo stesso effetto di una spinta di 210 N (Figura 7.2a). Se hanno verso opposto, come in un tiro alla fune, la risultante ha il verso della forza più intensa e modulo uguale alla differenza dei moduli: 120 N − 90 N = 30 N (Figura 7.2b). Se le due forze opposte hanno lo stesso modulo, la risultante è nulla.

Per forze collineari conviene scegliere un asse orientato lungo la loro retta comune e trattarle come numeri con segno: positivi se concordi con l'asse, negativi se opposti. La risultante è la

somma algebrica, e il suo segno ne indica il verso. Con l'asse verso destra, le forze +25 N, +40 N e −30 N hanno risultante +35 N, cioè 35 N verso destra.

7.3.2 Forze perpendicolari e forze qualsiasi

Se due forze concorrenti sono perpendicolari, la risultante è la diagonale del rettangolo che hanno per lati, e il suo modulo si trova con il teorema di Pitagora (Figura 7.2c):

$$R = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2)}$$

Quando le forze formano angoli qualsiasi, il metodo più sicuro è quello delle componenti, che hai imparato nel capitolo 6: si scelgono due assi perpendicolari, si scompone ogni forza nelle componenti $F_x = F \cos \alpha$ e $F_y = F \operatorname{sen} \alpha$ (con il segno adatto), si sommano separatamente tutte le componenti x e tutte le componenti y, e infine si ricava il modulo della risultante con Pitagora: $R = \sqrt{(R_x^2 + R_y^2)}$.

ESEMPIO SVOLTO

Due corde che tirano una cassa

Problema. Due operai trascinano una cassa sul pavimento con due corde orizzontali, legate allo stesso gancio. Il primo tira verso est con una forza di 120 N, il secondo verso nord con una forza di 90 N. Trova modulo e direzione della risultante. Che cosa cambierebbe se tirassero entrambi verso est?

Soluzione. Le due forze sono perpendicolari. Il modulo della risultante è $R = \sqrt{(120^2 + 90^2)}$ N = $\sqrt{(14\,400 + 8100)}$ N = $\sqrt{22\,500}$ N = 150 N. Per la direzione, chiamiamo α l'angolo fra la risultante e la direzione est: nel triangolo rettangolo che ha per ipotenusa R e per cateto adiacente la forza di 120 N, $\cos \alpha = 120/150 = 0{,}80$. Con la calcolatrice in modalità gradi (tasto $\cos^{-1}$) si ottiene $\alpha \approx 37°$: la risultante punta fra est e nord, più vicina all'est che al nord, come ci si aspetta dato che la forza verso est è maggiore.

Se i due operai tirassero entrambi verso est, le forze sarebbero collineari e concordi: $R = 120$ N + 90 N = 210 N verso est. Nota che 150 N è minore di 210 N: tirando in direzioni diverse, una parte dello sforzo dei due operai «si perde» nel senso che non contribuisce alla risultante.

Controllo. La risultante deve essere maggiore di ciascuna delle due forze e minore della loro somma: 120 N < 150 N < 210 N. Il risultato è ragionevole.

ERRORE FREQUENTE

«Una forza di 120 N più una di 90 N fa 210 N» è vero solo se le due forze hanno la stessa direzione e lo stesso verso. In generale il modulo della risultante è compreso fra la differenza e la somma dei moduli: per 120 N e 90 N, fra 30 N e 210 N, a seconda dell'angolo. Prima di sommare dei moduli, guarda sempre il disegno.

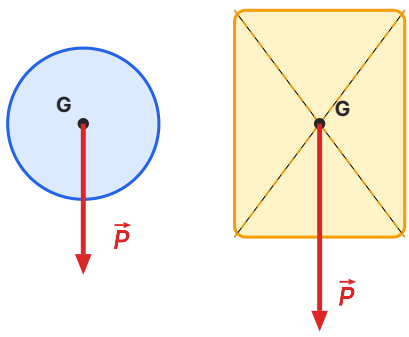
7.4 La forza-peso

7.4.1 Il peso è una forza

Ogni corpo che si trova vicino alla superficie terrestre è attirato dalla Terra. Questa attrazione, che agisce a distanza, si chiama **forza-peso** o semplicemente **peso**, e si indica con $\boldsymbol{P}$. Come ogni forza, il peso è un vettore:

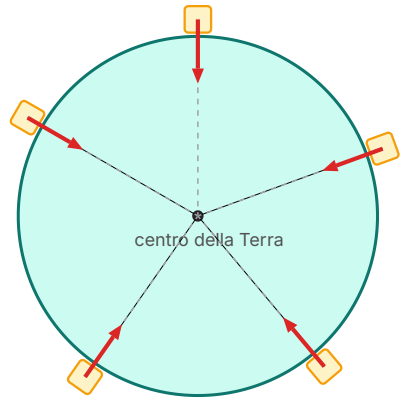
- la sua **direzione** è la **verticale** del luogo, cioè la direzione indicata da un filo a piombo;
- il suo **verso** è verso il basso, cioè, a guardare la Terra intera, verso il suo centro (Figura 7.3b);
- il suo **punto di applicazione** è un punto particolare del corpo, il **baricentro** (o centro di gravità), indicato con G. Per un corpo omogeneo e simmetrico, come una sfera o un parallelepipedo di materiale uniforme, il baricentro coincide con il centro geometrico (Figura 7.3a). Come si trova il baricentro di un corpo qualsiasi lo vedrai nel capitolo 11.

a) Il peso è applicato nel baricentro G



Il vettore peso parte dal baricentro e punta verso il basso, lungo la verticale.

b) La verticale e il centro della Terra



Disegno non in scala: «verso il basso» significa, in ogni luogo, verso il centro della Terra.

Figura 7.3 a) Il peso di un corpo è un vettore applicato nel baricentro G, diretto lungo la verticale verso il basso; per una sfera e un parallelepipedo omogenei G è il centro geometrico. b) In ogni punto della superficie terrestre la verticale punta, con ottima approssimazione, verso il centro della Terra (disegno non in scala).

7.4.2 Peso e massa: $P = m\,g$

Appendiamo a un dinamometro oggetti di massa diversa, misurata prima con una bilancia. Scopriamo che il peso è **direttamente proporzionale alla massa**: un oggetto di massa doppia

ha peso doppio, uno di massa tripla peso triplo. Il rapporto fra il peso e la massa è quindi costante, e si indica con g:

$$P = m\,g$$

Sulla superficie terrestre il valore di g è circa **9,8 N/kg**: ogni chilogrammo di massa pesa circa 9,8 newton. Il vettore peso si scrive $\boldsymbol{P} = m\,\boldsymbol{g}$, dove $\boldsymbol{g}$ è un vettore diretto verso il basso con modulo g. Si può verificare che 1 N/kg = 1 (kg·m/s^2)/kg = 1 m/s^2: per questo g si scrive spesso anche 9,8 m/s^2 e si chiama **accelerazione di gravità**. Il perché di questo nome lo capirai nel capitolo 16, quando studierai la caduta dei corpi. Da qui in avanti, salvo indicazione diversa, negli esercizi useremo sempre g = 9,8 N/kg.

La formula si usa in tutte e due le direzioni. Una ragazza di massa 55 kg ha peso P = 55 kg × 9,8 N/kg ≈ 540 N. Un sacco che appeso al dinamometro segna 147 N ha massa $m = P/g$ = 147 N / (9,8 N/kg) = 15 kg.

7.4.3 Massa e peso non sono la stessa cosa

Nel capitolo 2 abbiamo definito la **massa** come la quantità di materia di un corpo, misurata in chilogrammi con la bilancia a bracci uguali. Il **peso** è invece una forza, misurata in newton con il dinamometro. Le due grandezze sono legate dalla relazione $P = m\,g$, ma hanno natura diversa:

- la massa è uno **scalare**; il peso è un **vettore**;
- la massa si misura in kg; il peso in N;
- la massa di un corpo è la stessa in qualunque luogo; il peso dipende dal valore di g nel luogo in cui il corpo si trova.

Il valore di g, infatti, non è uguale dappertutto. Sulla Luna è circa 1,62 N/kg, circa un sesto di quello terrestre (Tabella 7.1). Un astronauta di massa 60 kg ha massa 60 kg sia sulla Terra sia sulla Luna, ma il suo peso passa da circa 590 N a circa 97 N (Figura 7.4). Per questo gli astronauti delle missioni Apollo si muovevano sulla Luna a balzi, nonostante le tute pesanti.

Tabella 7.1 Valore di g sulla superficie di alcuni corpi celesti (valori arrotondati; per Giove, gigante gassoso senza una superficie solida, il valore si riferisce al livello delle nubi).

Luogo	g (N/kg)	Peso di un corpo di massa 1,0 kg (N)
Terra, all'equatore, al livello del mare	9,78	9,8
Terra, ai poli, al livello del mare	9,83	9,8
Luna	1,62	1,6
Marte	3,71	3,7
Giove	24,8	25

Anche sulla Terra g varia un poco. Cresce leggermente andando dall'equatore verso i poli, perché la Terra è un po' schiacciata ai poli e ruota su sé stessa; diminuisce salendo di quota, perché ci si allontana dal centro della Terra: a 10 km di altezza, dove volano gli aerei di linea, è circa lo 0,3% più piccolo che al livello del mare. Sono differenze piccole, che nella vita quotidiana non si avvertono, ma che strumenti precisi misurano senza difficoltà. Il valore 9,8 N/kg che usiamo negli esercizi è un buon arrotondamento per l'Italia.

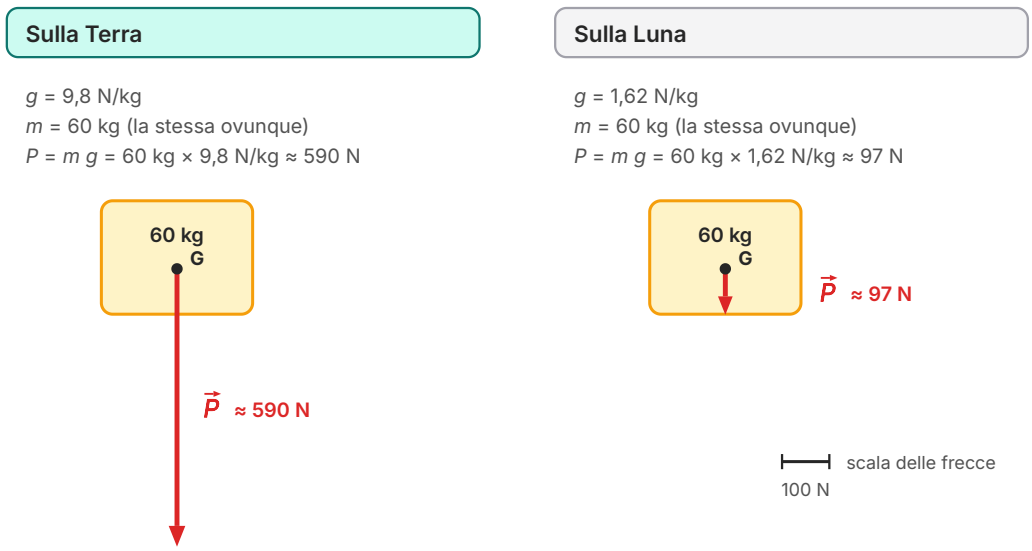


Figura 7.4 Lo stesso corpo di massa 60 kg sulla Terra e sulla Luna. La massa non cambia; il peso, calcolato con $P = m\,g$, passa da circa 590 N a circa 97 N. Le due frecce sono disegnate alla stessa scala.

7.4.4 Bilancia e dinamometro

Ora possiamo capire perché la bilancia a bracci uguali e il dinamometro misurano grandezze diverse. La bilancia confronta il peso dell'oggetto con quello di masse campione: se lo stesso g agisce su entrambi i piatti, l'equilibrio si ottiene quando le *masse* sono uguali, qualunque sia il valore di g. Sulla Luna la bilancia darebbe lo stesso risultato che sulla Terra. Il dinamometro, invece, misura direttamente la forza con cui l'oggetto tira la molla, cioè il *peso*: sulla Luna segnerebbe un valore circa sei volte più piccolo.

ESEMPIO SVOLTO

Un sasso lunare

Problema. Un astronauta appende un campione di roccia a un dinamometro e legge 4,86 N sulla Luna. Qual è la massa del campione? Quanto segnerebbe lo stesso dinamometro sulla Terra? E una bilancia a bracci uguali?

Soluzione. Sulla Luna $g = 1{,}62$ N/kg, quindi $m = P/g = 4{,}86$ N / (1,62 N/kg) = 3,00 kg. La massa non cambia viaggiando: sulla Terra il campione ha ancora massa 3,00 kg e il suo peso è $P = 3{,}00 \text{ kg} \times 9{,}8 \text{ N/kg} \approx 29$ N (due cifre significative, come il valore di g usato). Il dinamometro segnerebbe circa 29 N. La bilancia a bracci uguali, invece, darebbe 3,00 kg sia sulla Luna sia sulla Terra.

Controllo. Il rapporto fra i due pesi è $29/4{,}86 \approx 6$, uguale al rapporto fra i valori di g ($9{,}8/1{,}62 \approx 6{,}0$). È ciò che ci aspettiamo, perché la massa è la stessa.

ERRORE FREQUENTE

«Peso 60 kg» è una frase del linguaggio comune, ma in fisica è sbagliata due volte: il chilogrammo è l'unità della massa, e il peso si misura in newton. In fisica si dice «la mia massa è 60 kg» oppure «il mio peso è circa 590 N». Attenzione anche alla bilancia pesapersone del bagno: misura in realtà una forza, la spinta che le esercitiamo sopra, ma mostra il risultato in chilogrammi perché è tarata dividendo per il valore di g terrestre. Portata sulla Luna, segnerebbe circa un sesto della nostra massa vera.

COLLEGAMENTI

Scienze motorie e salute. Quando saltiamo o corriamo, ossa, cartilagini e tendini delle gambe devono sopportare forze che possono superare di parecchie volte il peso del corpo. Per questo è il peso, cioè una forza, e non la massa, la grandezza che interessa ai medici e agli ingegneri che progettano scarpe da corsa, protesi e pavimenti sportivi. Nello spazio, dove gli astronauti non avvertono il peso, muscoli e ossa che non lavorano contro di esso si indeboliscono: per questo sulla Stazione spaziale internazionale l'equipaggio fa ogni giorno esercizio fisico con attrezzi appositi, per esempio un tapis roulant su cui l'astronauta è tenuto da cinghie elastiche che lo spingono contro il nastro.

7.5 La forza elastica e la legge di Hooke

7.5.1 Deformazioni elastiche e plastiche

Se tiri un elastico e poi lo lasci, torna alla sua lunghezza iniziale. Se schiacci una pallina di plastilina, resta schiacciata. Un corpo che, cessata la forza, riprende la forma originale si dice **ela-**

stico, e la sua deformazione si chiama **deformazione elastica**; un corpo che conserva la deformazione si dice **plastico**, e la sua è una **deformazione plastica**. Molti materiali si comportano in entrambi i modi, a seconda di quanto li deformiamo: una molla d'acciaio tirata poco torna come prima, ma tirata troppo resta allungata per sempre. Il valore della forza (o dell'allungamento) oltre il quale la deformazione smette di essere elastica si chiama **limite di elasticità**.

Un corpo elastico deformato esercita una forza su chi lo deforma: l'elastico della fionda tira le dita, la molla compressa del materasso spinge verso l'alto. Questa forza si chiama **forza elastica**, ed è sempre diretta in modo da riportare il corpo alla sua forma di riposo: per questo si dice anche *forza di richiamo*.

7.5.2 La legge di Hooke

Appendiamo a una molla, uno alla volta, uno, due e tre pesetti identici da 100 g, e misuriamo ogni volta l'**allungamento** Δx, cioè la differenza fra la lunghezza della molla carica e la sua **lunghezza a riposo** (Figura 7.5). Con un pesetto l'allungamento è 4,0 cm, con due 8,0 cm, con tre 12,0 cm: raddoppiando la forza l'allungamento raddoppia, triplicandola triplica. La forza e l'allungamento sono **direttamente proporzionali** (capitolo 5).

Questo risultato vale per moltissimi corpi elastici, purché non si superi il limite di elasticità, ed è noto come **legge di Hooke**: *entro il limite di elasticità, la forza elastica esercitata da una molla è direttamente proporzionale alla sua deformazione*. In modulo si scrive

$$F = k\,\Delta x$$

La costante di proporzionalità k si chiama **costante elastica** della molla. Si ricava come rapporto $k = F/\Delta x$, e nel SI si misura in **newton al metro** (N/m): indica quanti newton servono per allungare la molla di un metro, o, più concretamente, di quanti centesimi di newton bisogna aumentare la forza per ogni centimetro di allungamento in più. Una molla con k grande è **rigida**, cioè si allunga poco anche con forze intense; una molla con k piccolo è **cedevole**. Una molla da laboratorio scolastico ha di solito una costante di qualche decina di newton al metro; le molle delle sospensioni di un'automobile hanno costanti di decine di migliaia di newton al metro.

La legge vale anche per le compressioni: una molla compressa di Δx spinge con una forza di modulo $k\,\Delta x$, purché le spire non arrivino a toccarsi.

ERRORE FREQUENTE

Δx nella legge di Hooke non è la lunghezza della molla, ma la sua *variazione* rispetto alla lunghezza a riposo. Se una molla lunga 12,0 cm a riposo diventa lunga 15,5 cm, Δx = 3,5 cm, non 15,5 cm. E prima di calcolare k in N/m ricordati di trasformare i centimetri in metri: 3,5 cm = 0,035 m.

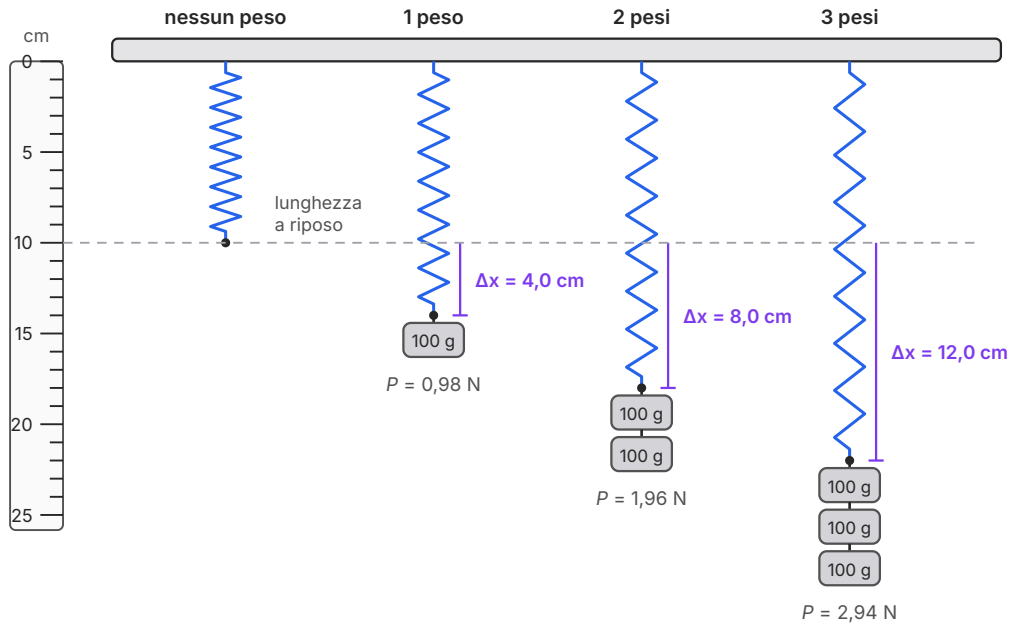


Figura 7.5 Una molla di lunghezza a riposo 10,0 cm caricata con uno, due e tre pesetti identici da 100 g (peso 0,98 N ciascuno). Gli allungamenti sono 4,0 cm, 8,0 cm e 12,0 cm: raddoppiando o triplicando la forza, l'allungamento raddoppia o triplica (disegno in scala).

7.5.3 Il segno meno: la forma vettoriale

La forza elastica ha sempre verso opposto alla deformazione: se allunghiamo la molla verso il basso, la molla tira verso l'alto; se la comprimiamo verso sinistra, spinge verso destra. Fissiamo un asse x lungo la molla con l'origine nella posizione dell'estremo libero quando la molla è a riposo, e chiamiamo Δx lo spostamento dell'estremo, positivo o negativo secondo l'orientamento dell'asse. La legge di Hooke in forma completa si scrive

$$F_x = -k\,\Delta x$$

Il segno meno dice proprio che la forza elastica e la deformazione hanno segni opposti: con l'asse orientato verso destra, se l'estremo è spostato a destra ($\Delta x > 0$) la forza punta a sinistra ($F_x < 0$), e viceversa. Spesso questa relazione si scrive in modo compatto come $F = -k\Delta x$.

Attenzione a *chi* esercita la forza. La forza $-k\,\Delta x$ è quella che la **molla** esercita sulla mano (o sul corpo appeso). La forza che la **mano** esercita sulla molla per tenerla allungata ha lo stesso modulo e verso opposto, cioè $+k\,\Delta x$: concorde con l'allungamento.

7.5.4 Il grafico forza-allungamento

Se riportiamo in un grafico la forza F in ordinata e l'allungamento Δx in ascissa, una molla che segue la legge di Hooke dà una retta che passa per l'origine. Come hai visto nel capitolo 5, la **pendenza** della retta è proprio la costante di proporzionalità: la costante elastica $k = \Delta F / \Delta x$. Una molla più rigida dà una retta più ripida.

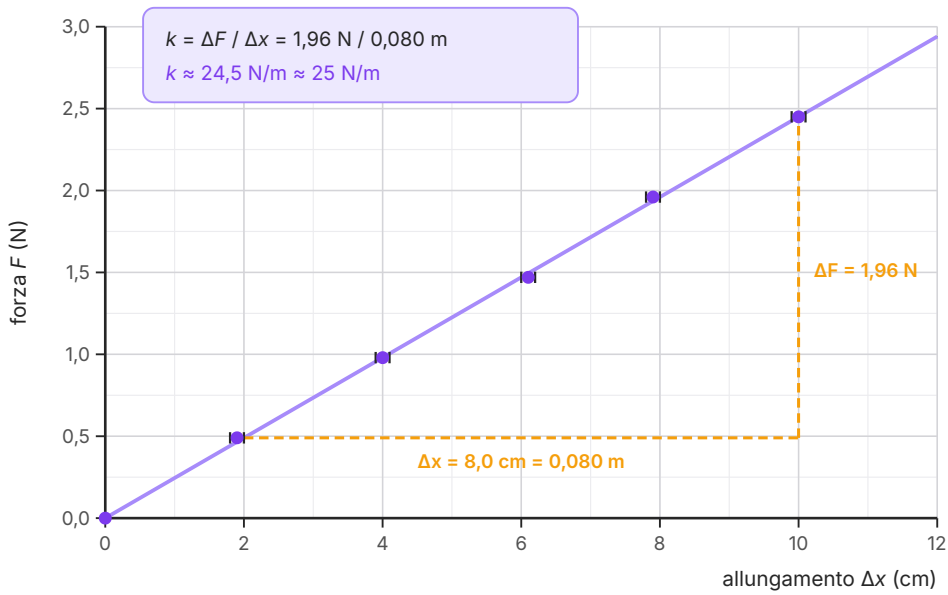


Figura 7.6 Grafico forza-allungamento dei dati della Tabella 7.2, con le barre di incertezza (± 0,1 cm). I punti stanno su una retta passante per l'origine; la pendenza, ricavata dal triangolo tratteggiato, è la costante elastica $k \approx 24{,}5$ N/m.

ESEMPIO SVOLTO

Ricavare *k* da una serie di misure

Problema. Un gruppo appende a una molla masse da 50 g a 250 g e misura gli allungamenti con un righello millimetrato (Tabella 7.2). La molla segue la legge di Hooke? Quanto vale la sua costante elastica?

Tabella 7.2 Taratura di una molla. Il peso è calcolato con $P = m\,g$; l'incertezza sugli allungamenti è 0,1 cm.

m (g)	50	100	150	200	250
$F = P$ (N)	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45
Δx (cm)	1,9	4,0	6,1	7,9	10,0
$F/\Delta x$ (N/m)	26	24,5	24	25	24,5

Analisi. Il rapporto $F/\Delta x$ (dopo aver convertito i centimetri in metri) è circa costante, fra 24 e 26 N/m: le piccole differenze sono dovute all'incertezza degli allungamenti, che pesa di più sulla misura più piccola (0,1 cm su 1,9 cm è più del 5%). Nel grafico (Figura 7.6) i punti si dispongono, entro le barre di incertezza, su una retta passante per l'origine: la molla segue la legge di Hooke. Per la pendenza scegliamo due punti della retta lontani fra loro, per esempio (2,0 cm; 0,49 N) e (10,0 cm; 2,45 N):

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{2{,}45\ \text{N} - 0{,}49\ \text{N}}{0{,}100\ \text{m} - 0{,}020\ \text{m}} = \frac{1{,}96\ \text{N}}{0{,}080\ \text{m}} \approx 24{,}5\ \text{N/m}$$

Con due cifre significative, $k \approx 25$ N/m. **Controllo:** è la stessa molla della Figura 7.5, dove 100 g (0,98 N) davano 4,0 cm: 0,98 N / 0,040 m = 24,5 N/m.

7.5.5 Oltre il limite di elasticità

Se continuiamo ad aggiungere pesi, a un certo punto la retta si incurva: l'allungamento cresce più in fretta della forza e la molla «cede» (Figura 7.7). Abbiamo superato il limite di elasticità. Se ora togliamo i pesi, la molla si accorcia ma non torna più alla lunghezza iniziale: le resta una **deformazione permanente**. Da quel momento la molla non è più adatta a fare da dinamometro, perché senza carico l'indice non tornerebbe a zero e la sua costante elastica potrebbe essere cambiata. Il limite di elasticità dipende dal materiale e dalla forma del corpo: per questo ogni dinamometro porta indicata la sua portata, che è scelta ben al di sotto di quel limite.

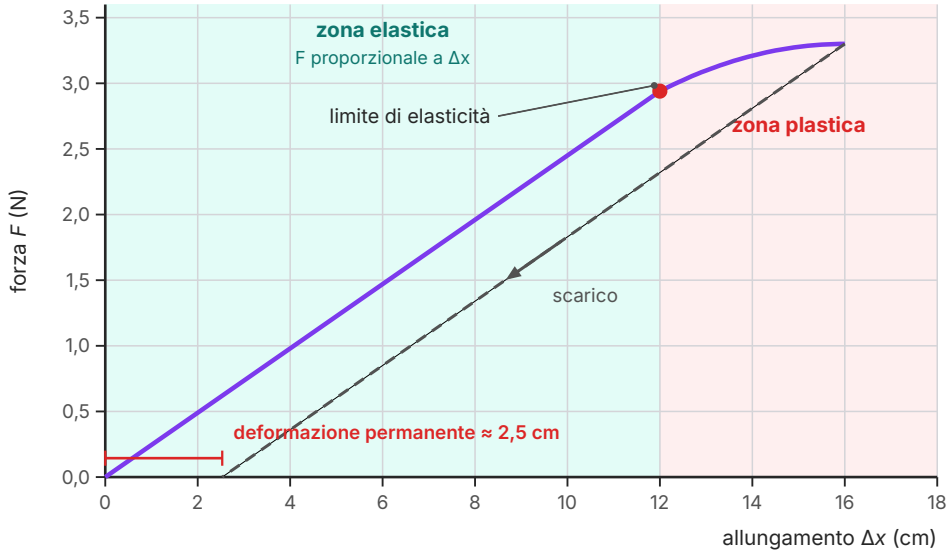


Figura 7.7 Andamento tipico del grafico forza-allungamento di una molla d'acciaio portata oltre il limite di elasticità. Nella zona elastica vale la legge di Hooke; nella zona plastica l'allungamento cresce più in fretta della forza e, togliendo il carico (linea tratteggiata), la molla conserva una deformazione permanente.

APPROFONDIMENTO

Robert Hooke e «ut tensio, sic vis»

Robert Hooke (1635–1703) fu uno degli scienziati più versatili dell'Inghilterra del Seicento: fisico, astronomo, architetto e microscopista. Nel suo libro *Micrographia*, dedicato alle osservazioni al microscopio, usò per primo la parola «cellula» per descrivere le minuscole cavità che vedeva in una sottile fetta di sughero: un nome che i biologi usano ancora oggi.

Hooke studiò a lungo le molle, anche perché gli servivano per costruire orologi più precisi. Per assicurarsi la priorità della scoperta senza svelarla subito, la annunciò prima sotto forma di anagramma, una serie di lettere in disordine; nel 1678 ne pubblicò la soluzione in latino: *ut tensio, sic vis*, cioè «come l'allungamento, così la forza». È la legge che porta il suo nome, espressa con una proporzione invece che con una formula.

7.5.6 Il principio del dinamometro

Ora sappiamo perché il dinamometro funziona. La sua molla lavora sempre entro il limite di elasticità, quindi l'allungamento è proporzionale alla forza applicata al gancio: $\Delta x = F/k$. Una volta nota la costante k, a ogni posizione dell'indice corrisponde un preciso valore della forza, e

la scala può essere graduata con tacche equidistanti. Per **tarare** un dinamometro basta appendere al gancio alcuni oggetti di peso noto e segnare le posizioni dell'indice, come nell'attività di laboratorio che segue.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: tarare una molla e costruire un dinamometro

Materiali. Una molla a spirale da laboratorio, abbastanza morbida da allungarsi di qualche centimetro con poche decine di grammi, un sostegno con asta e morsetto, un righello millimetrato fissato in verticale accanto alla molla, un piattello o un gancetto, 5–6 masse campione da 20 g o 50 g, una bilancia elettronica, un foglio di cartoncino e un pennarello sottile.

Procedimento. 1) Appendi la molla al sostegno con il piattello e segna la posizione dell'estremo inferiore: è lo zero (in questo modo il peso del piattello non entra nella misura). 2) Controlla con la bilancia le masse campione. 3) Aggiungi una massa alla volta, attendi che il sistema sia fermo e leggi la posizione dell'estremo, con l'occhio alla sua altezza. 4) Calcola per ogni carico il peso $P = m\,g$ e l'allungamento Δx. 5) Togli tutte le masse e controlla che la molla torni allo zero: se non ci torna, hai superato il limite di elasticità e i dati non sono validi.

Tabella 7.3 Schema della tabella dei dati (da completare).

m (g)	P (N)	posizione (cm)	Δx (cm)	$P/\Delta x$ (N/m)
0	0	…	0	—
…	…	…	…	…

Che cosa concludere. Riporta i dati in un grafico F–Δx con le barre di incertezza, verifica che i punti stiano su una retta passante per l'origine e ricava k dalla pendenza. Poi incolla il cartoncino dietro la molla e disegna una scala: se $k = 25$ N/m, una forza di 0,1 N allunga la molla di 0,4 cm, quindi le tacche da 0,1 N vanno segnate ogni 4 mm. Ecco il tuo dinamometro: misura il peso di alcuni oggetti e confronta i risultati con quelli di un dinamometro del laboratorio.

Sicurezza. Non tirare la molla a mano oltre il carico massimo e tieni il viso lontano: una molla che si sgancia di colpo può scattare.

Per la relazione. Nella tabella riporta masse, pesi e allungamenti con la loro incertezza; ricava k con le rette di massima e minima pendenza e scrivilo con la sua incertezza. Nelle conclusioni confronta le misure del tuo dinamometro con quelle del dinamometro del laboratorio (sono compatibili?) e indica il carico oltre il quale non useresti il tuo strumento.

APPROFONDIMENTO

Molle in serie e in parallelo

Che cosa succede se usiamo due molle identiche invece di una? Se le colleghiamo **in serie**, cioè una sotto l'altra, e appendiamo un peso all'estremo inferiore, ciascuna molla è tirata dall'intero peso e si allunga quanto si allungherebbe da sola: l'allungamento totale è doppio. Il sistema si comporta come una sola molla più cedevole, con costante elastica minore. Se invece le colleghiamo **in parallelo**, una accanto all'altra, e appendiamo il peso a una barretta che le unisce entrambe, ciascuna regge metà del peso e si allunga la metà: il sistema è più rigido, con costante elastica maggiore. Per questo le sospensioni dei veicoli pesanti usano più molle affiancate.

IN SINTESI

1 N = 1 kg·m/s²: l'unità SI della forza; 1 N è circa il peso di 102 g.

$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \ldots$: la risultante è la somma *vettoriale* delle forze; per forze perpendicolari $R = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2)}$.

$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{m}\,\boldsymbol{g}$: il peso (in N) è proporzionale alla massa (in kg); sulla Terra $g \approx 9{,}8$ N/kg, sulla Luna 1,62 N/kg. La massa non cambia da un luogo all'altro, il peso sì.

$\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{k}\,\boldsymbol{\Delta x}$ (in modulo $F = k\,\Delta x$): entro il limite di elasticità la forza della molla è proporzionale alla deformazione e ha verso opposto; k in N/m è la pendenza del grafico F–Δx.

Con il peso e la forza elastica abbiamo i primi due «personaggi» del capitolo sull'equilibrio. Nel prossimo capitolo incontreremo le forze che nascono dal contatto fra i corpi e le superfici che li sostengono: le reazioni vincolari e l'attrito.

SINTESI

- Una forza è un'azione che deforma un corpo (effetto statico) o ne cambia lo stato di moto (effetto dinamico); la legge che lega forza e moto si studia il prossimo anno.
- La forza è un vettore: ha modulo, direzione (retta d'azione), verso e punto di applicazione.
- Le forze possono essere di contatto o a distanza; tutte derivano da quattro interazioni fondamentali: gravitazionale, elettromagnetica, nucleare forte e nucleare debole.
- Le forze si misurano con il dinamometro, che sfrutta l'allungamento di una molla; l'unità SI è il newton, 1 N = 1 kg·m/s^2, circa il peso di 102 g.
- L'effetto di più forze concorrenti equivale a quello della risultante, la loro somma vettoriale; il modulo della risultante non è in generale la somma dei moduli.
- Il peso è la forza con cui la Terra attira un corpo: è verticale, rivolto verso il basso e applicato nel baricentro; vale $P = m\,g$ con $g \approx 9{,}8$ N/kg.
- La massa (scalare, kg, misurata con la bilancia) non cambia da un luogo all'altro; il peso (vettore, N, misurato con il dinamometro) dipende da g, che sulla Luna vale 1,62 N/kg.
- g varia leggermente sulla Terra: aumenta dall'equatore ai poli e diminuisce con la quota.
- Una deformazione è elastica se il corpo torna alla forma iniziale, plastica se resta deformato; il confine è il limite di elasticità.
- Legge di Hooke: entro il limite di elasticità $F = -k\,\Delta x$; la forza della molla è opposta alla deformazione, quella che applichiamo noi è $+k\,\Delta x$.
- La costante elastica k (N/m) misura la rigidità della molla ed è la pendenza del grafico F–Δx.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● L'unità di misura della forza nel Sistema Internazionale è:
   - **A.** il chilogrammo
   - **B.** il newton
   - **C.** il newton al chilogrammo
   - **D.** il chilogrammo al metro

2. ● Quale fra queste è una forza a distanza?
   - **A.** la spinta di una mano su una porta
   - **B.** la tensione della corda che regge un secchio
   - **C.** l'attrazione di una calamita su un chiodo
   - **D.** l'attrito fra le scarpe e il pavimento

3. ● La massa di un corpo:
   A. è più piccola sulla Luna che sulla Terra
   B. si misura in newton
   C. si misura con il dinamometro
   D. è la stessa sulla Terra e sulla Luna

4. ●● Due forze di 30 N e 40 N sono applicate allo stesso punto e sono perpendicolari. Il modulo della risultante è:
   A. 50 N
   B. 70 N
   C. 10 N
   D. 35 N

5. ●● Un corpo appeso a un dinamometro sulla Terra fa segnare 49 N. La sua massa è:
   A. 49 kg
   B. 480 kg
   C. 5,0 kg
   D. 0,20 kg

6. ● La costante elastica di una molla si misura in:
   A. N·m
   B. N
   C. m/N
   D. N/m

7. ●● Una molla con $k = 200$ N/m è allungata di 5,0 cm. Il modulo della forza elastica è:
   A. 1000 N
   B. 10 N
   C. 40 N
   D. 0,25 N

8. ● La forza elastica esercitata da una molla allungata ha verso:
   A. opposto all'allungamento
   B. uguale a quello dell'allungamento
   C. sempre verso il basso
   D. perpendicolare all'asse della molla

9. ●● Due forze di 12 N e 5 N hanno la stessa retta d'azione e versi opposti. La risultante è:
   A. 17 N nel verso della forza di 12 N
   B. 7 N nel verso della forza di 5 N
   C. 7 N nel verso della forza di 12 N
   D. 13 N, perpendicolare alle due forze

Vero o falso

10. ● Due forze hanno lo stesso modulo se, applicate alla stessa molla nello stesso modo, producono lo stesso allungamento. V / F

11. ● Il peso di un corpo è esattamente lo stesso in ogni punto della superficie terrestre. V / F

12. ●● Entro il limite di elasticità, se l'allungamento di una molla raddoppia, raddoppia anche la forza elastica. V / F

13. ● Il modulo della risultante di due forze è sempre uguale alla somma dei loro moduli. V / F

14. ●● Una molla allungata oltre il limite di elasticità, una volta scaricata, torna esattamente alla sua lunghezza a riposo. V / F

Applicare

15. ● Calcola il peso di un'automobile di massa $1{,}20 \times 10^3$ kg.

16. ● Un dinamometro ha una scala da 0 a 5 N divisa in 50 parti uguali. Completa: la portata è _____ , la sensibilità è _____ ; se l'indice si ferma sulla 34ª tacca dopo lo zero, la misura è _____ .

17. ● Sulla Luna un corpo appeso a un dinamometro fa segnare 81 N. Qual è la sua massa?

18. ●● Nella Figura 7.8 sono riportati i grafici forza-allungamento di due molle A e B. Ricava le loro costanti elastiche in N/m e stabilisci quale è più rigida. Di quanto si allungherebbe ciascuna con una forza di 3,0 N?

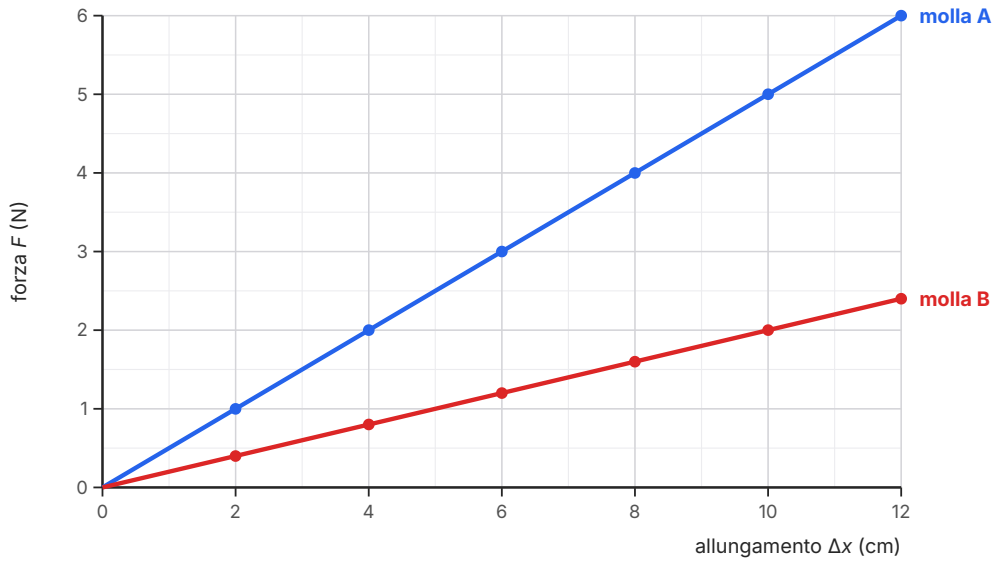


Figura 7.8 Grafici forza-allungamento di due molle A e B, per l'esercizio 18.

19. ● Che forza bisogna applicare a una molla di costante elastica 40 N/m per allungarla di 15 cm?

20. ●● Una molla si allunga di 3,0 cm quando le si applica una forza di 1,5 N. Di quanto si allunga con una forza di 4,0 N, se non si supera il limite di elasticità?

21. ●● Su un carrello agiscono tre forze orizzontali con la stessa retta d'azione: 35 N verso destra, 20 N verso destra e 65 N verso sinistra. Scegli un asse, scrivi le forze con il segno e trova la risultante.

22. ● Completa: una molla lunga 12,0 cm a riposo diventa lunga 15,5 cm quando vi si appende un oggetto. L'allungamento è _____ ; se $k = 60$ N/m, il peso dell'oggetto è _____ .

Problemi

23. ●● Appendendo una massa di 300 g a una molla, questa si allunga di 6,0 cm. a) Calcola la costante elastica della molla. b) Quale massa bisogna appendere per ottenere un allungamento di 10,0 cm?

24. ●●● Due ragazzi tirano una slitta con due corde orizzontali legate allo stesso anello e perpendicolari fra loro, con forze di 60 N e 80 N. a) Trova il modulo della risultante e l'angolo che forma con la corda tirata con 60 N. b) Quale sarebbe la risultante se tirassero nella stessa direzione e nello stesso verso? c) Quale forza dovrebbe esercitare un terzo ragazzo, e in che direzione, perché la risultante delle tre forze nel caso a) fosse nulla?

25. ●● Un campione di roccia appeso a un dinamometro sulla Luna fa segnare 6,48 N. a) Qual è la massa del campione? b) Quanto segnerebbe lo stesso dinamometro sulla Terra? c) Che risultato darebbe una bilancia a bracci uguali sulla Luna? Motiva.

26. ●●● Vuoi costruire un dinamometro con una molla di costante elastica 25 N/m, che resta elastica fino a un allungamento di 10 cm. a) Qual è la massima forza che lo strumento può misurare senza superare il limite di elasticità? b) Se scegli una portata di 2,0 N, quanto è lunga la scala? c) A quale distanza vanno segnate le tacche da 0,1 N? d) Un sasso appeso allo strumento produce un allungamento di 5,6 cm: quali sono il suo peso e la sua massa?

27. ●●● Su un anello agiscono due forze: $\boldsymbol{F}_1$, di modulo 50 N, inclinata di 30° verso l'alto rispetto all'asse x orizzontale, e $\boldsymbol{F}_2$, di modulo 20 N, diretta lungo l'asse x nel verso positivo. Trova le componenti di $\boldsymbol{F}_1$, le componenti della risultante e il suo modulo.

28. ●●● Un gruppo misura l'allungamento di un elastico per ufficio sotto diversi carichi (Tabella 7.4). L'elastico segue la legge di Hooke per tutti i carichi? Per quali sì? Calcola la sua costante elastica nell'intervallo in cui la legge vale.

Tabella 7.4 Allungamento di un elastico (incertezza 0,1 cm).

F (N)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Δx (cm)	2,0	4,1	5,9	8,0	12,5

29. ●●● Appendendo a una molla una massa di 200 g, la molla è lunga 18,0 cm; con una massa di 500 g è lunga 22,5 cm. Trova la costante elastica e la lunghezza della molla a riposo.

Ragionare e argomentare

30. ●● Marco, che ha una massa di 72 kg, porta la sua bilancia pesapersone digitale in una base lunare immaginaria e legge 12 kg. Esclama: «Sulla Luna la mia massa è diventata 12 kg!». Trova l'errore nel suo ragionamento e spiega perché la bilancia segna circa 12 kg.

31. ●●● Stima il peso dell'aria contenuta nella tua classe. Indica le dimensioni che hai ipotizzato, usa per l'aria una densità di 1,20 kg/m^3 e dai il risultato come ordine di grandezza. Ti sorprende?

32. ●● Hai una molla, un righello, un sostegno e un solo oggetto di massa nota, 100 g. Progetta un procedimento per misurare il peso di un sasso, indicando quali condizioni devono essere rispettate perché il metodo funzioni.

PER APPROFONDIRE

- [HEW] P.G. Hewitt, *Conceptual Physics*: i capitoli sulle forze spiegano massa, peso e risultante con pochissime formule e molti esempi quotidiani.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: il capitolo introduttivo sulle forze presenta le interazioni fondamentali e l'origine elettrica delle forze di contatto.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle forze, con la forza-peso e la forza elastica.
- [BIPM] La «brochure SI» del BIPM: definizione del newton come unità derivata.

Glossario del capitolo

Accelerazione di gravità
Costante g che lega peso e massa (P = mg); sulla Terra vale circa 9,8 N/kg = 9,8 m/s², sulla Luna 1,62 N/kg.

Costante elastica
Costante k della legge di Hooke, in N/m; misura la rigidità di una molla ed è la pendenza del grafico forza-allungamento.

Deformazione elastica
Deformazione che scompare quando cessa la forza: il corpo torna alla forma iniziale.

Deformazione plastica
Deformazione che rimane, in tutto o in parte, anche dopo che la forza ha smesso di agire.

Dinamometro
Strumento che misura le forze attraverso l'allungamento di una molla, con una scala graduata in newton.

Forza
Azione capace di deformare un corpo (effetto statico) o di cambiarne lo stato di moto (effetto dinamico); è una grandezza vettoriale.

Forza risultante
Somma vettoriale di tutte le forze che agiscono su un corpo; ne produce da sola lo stesso effetto.

Forza-peso
Forza con cui la Terra (o un altro corpo celeste) attira un corpo; verticale, verso il basso, applicata nel baricentro, di modulo P = mg.

Forze a distanza
Forze che agiscono anche fra corpi lontani, come l'attrazione gravitazionale o quella di una calamita.

Forze collineari
Forze che hanno la stessa retta d'azione; la risultante si ottiene come somma algebrica con il segno.

Forze concorrenti
Forze applicate a uno stesso punto o le cui rette d'azione passano per uno stesso punto.

Forze di contatto
Forze che agiscono solo quando due corpi si toccano, come una spinta, la tensione di una corda o l'attrito.

Interazioni fondamentali
Le quattro interazioni a cui si riducono tutte le forze: gravitazionale, elettromagnetica, nucleare forte e nucleare debole.

Legge di Hooke
Entro il limite di elasticità la forza elastica è proporzionale e opposta alla deformazione: $F = -k\Delta x$.

Limite di elasticità
Valore della forza o della deformazione oltre il quale un corpo non si comporta più in modo elastico.

Newton
Unità SI della forza (N): 1 N = 1 kg·m/s²; è circa il peso di un oggetto di 102 g.

Retta d'azione
Retta lungo la quale agisce una forza; ne individua la direzione.

Soluzioni

1. B. Il newton (N); il chilogrammo è l'unità della massa, N/kg è l'unità di g.

2. C. La calamita agisce sul chiodo anche senza toccarlo; le altre sono forze di contatto.

3. D. La massa non dipende dal luogo; si misura in kg con la bilancia, mentre il dinamometro misura il peso.

4. A. $R = \sqrt{(30^2 + 40^2)}$ N = $\sqrt{2500}$ N = 50 N.

5. C. $m = P/g$ = 49 N / (9,8 N/kg) = 5,0 kg.

6. D. $k = F/\Delta x$, quindi N/m.

7. B. $F = k\,\Delta x$ = 200 N/m × 0,050 m = 10 N (attenzione: 5,0 cm = 0,050 m).

8. A. La forza elastica è una forza di richiamo, opposta alla deformazione (segno meno nella legge di Hooke).

9. C. Forze collineari discordi: 12 N − 5 N = 7 N, nel verso della forza più intensa.

10. V. È la prima regola della definizione operativa della forza (confronto degli effetti statici).

11. F. g varia leggermente con la latitudine (9,78 N/kg all'equatore, 9,83 N/kg ai poli) e con la quota, e con esso il peso.

12. V. Entro il limite di elasticità $F = k\,\Delta x$: forza e allungamento sono direttamente proporzionali.

13. F. Vale solo per forze con la stessa direzione e lo stesso verso; in generale R è compreso fra la differenza e la somma dei moduli.

14. F. Oltre il limite di elasticità la deformazione è in parte plastica: rimane una deformazione permanente.

15. $P = m\,g$ = 1,20 × 10^3 kg × 9,8 N/kg = 1,176 × 10^4 N ≈ 1,2 × 10^4 N (due cifre significative, come g).

16. Portata 5 N; sensibilità 5 N / 50 = 0,1 N; la 34ª tacca dopo lo zero corrisponde a 34 × 0,1 N, quindi la misura è (3,4 ± 0,1) N.

17. $m = P/g_{\text{Luna}}$ = 81 N / (1,62 N/kg) = 50 kg.

18. Molla A: a 8 cm corrisponde 4,0 N, quindi k_A = 4,0 N / 0,080 m = 50 N/m. Molla B: a 10 cm corrisponde 2,0 N, quindi k_B = 2,0 N / 0,10 m = 20 N/m. A è più rigida (retta più ripida). Con 3,0 N: Δx_A = 3,0 N / (50 N/m) = 0,060 m = 6,0 cm; Δx_B = 3,0 N / (20 N/m) = 0,15 m = 15 cm (oltre la scala del grafico: vale solo se B resta elastica).

19. $F = k\,\Delta x$ = 40 N/m × 0,15 m = 6,0 N.

20. k = 1,5 N / 0,030 m = 50 N/m; Δx = 4,0 N / (50 N/m) = 0,080 m = 8,0 cm. (Oppure per proporzione: 3,0 cm × 4,0/1,5 = 8,0 cm.)

21. Asse verso destra: +35 N + 20 N − 65 N = −10 N. Il segno meno indica che la risultante ha verso opposto all'asse: 10 N verso sinistra.

22. Δx = 15,5 cm − 12,0 cm = 3,5 cm; $P = k\,\Delta x$ = 60 N/m × 0,035 m = 2,1 N.

23. a) $F = m\,g$ = 0,300 kg × 9,8 N/kg = 2,94 N; k = 2,94 N / 0,060 m = 49 N/m. b) Δx è proporzionale alla massa: m = 300 g × 10,0/6,0 = 5,0 × 10^2 g = 0,50 kg (verifica: $m = k\,\Delta x/g$ = 49 × 0,100 / 9,8 = 0,50 kg).

24. a) $R = \sqrt{(60^2 + 80^2)}$ N = 100 N; cos α = 60/100 = 0,60 → α ≈ 53° rispetto alla corda tirata con 60 N. b) 60 N + 80 N = 140 N. c) Una forza di 100 N con la stessa direzione della risultante del caso a) e verso opposto (il vettore opposto $-\boldsymbol{R}$).

25. a) m = 6,48 N / (1,62 N/kg) = 4,00 kg. b) P = 4,00 kg × 9,8 N/kg = 39,2 N ≈ 39 N. c) 4,00 kg: la bilancia a bracci uguali confronta masse, perché lo stesso g agisce su entrambi i piatti.

26. a) $F_{\text{max}} = k\,\Delta x_{\text{max}}$ = 25 N/m × 0,10 m = 2,5 N. b) Δx = 2,0 N / (25 N/m) = 0,080 m = 8,0 cm. c) 0,1 N / (25 N/m) = 0,004 m = 4 mm. d) P = 25 N/m × 0,056 m = 1,4 N; m = 1,4 N / (9,8 N/kg) ≈ 0,14 kg.

27. F_{1x} = 50 N × cos 30° = 50 N × 0,866 ≈ 43 N; F_{1y} = 50 N × sen 30° = 25 N. R_x = 43,3 N + 20 N ≈ 63 N; R_y = 25 N. $R = \sqrt{(63{,}3^2 + 25^2)}$ N ≈ 68 N.

28. Rapporti $F/\Delta x$: 0,25; 0,24; 0,25; 0,25; 0,20 N/cm. I primi quattro sono uguali entro l'incertezza: fino a 2,0 N l'elastico segue la legge di Hooke, con $k \approx 0{,}25$ N/cm = 25 N/m. Con 2,5 N l'allungamento cresce molto più del previsto (atteso 10,0 cm, misurato 12,5 cm): il comportamento non è più lineare.

29. Fra i due carichi: $\Delta F = 0{,}300 \text{ kg} \times 9{,}8 \text{ N/kg} = 2{,}94$ N e $\Delta L = 22{,}5 \text{ cm} - 18{,}0 \text{ cm} = 4{,}5$ cm; $k = 2{,}94 \text{ N} / 0{,}045 \text{ m} \approx 65$ N/m. Con 200 g: $\Delta x = 1{,}96 \text{ N} / (65{,}3 \text{ N/m}) = 0{,}030$ m = 3,0 cm, quindi lunghezza a riposo 18,0 cm − 3,0 cm = 15,0 cm.

30. La massa di Marco resta 72 kg. La bilancia pesapersone misura una forza (il peso, circa $72 \times 1{,}62 \approx 117$ N sulla Luna) e la divide per il g terrestre con cui è tarata: 117 N / (9,8 N/kg) ≈ 12 kg. Segna quindi circa un sesto della massa vera; per misurare la massa servirebbe una bilancia a bracci uguali.

31. Traccia: aula di circa 8 m × 6 m × 3 m = 144 $m^3 \approx 1{,}4 \times 10^2$ m^3; massa d'aria ≈ 1,20 kg/m^3 × 144 $m^3 \approx 1{,}7 \times 10^2$ kg; peso ≈ $1{,}7 \times 10^2$ kg × 9,8 N/kg ≈ $1{,}7 \times 10^3$ N: ordine di grandezza 10^3 N, come il peso di due o tre studenti. Sorprende perché non percepiamo il peso dell'aria in cui siamo immersi.

32. Traccia: appendere la molla al sostegno e misurarne la lunghezza a riposo; appendere la massa di 100 g (peso 0,98 N) e misurare l'allungamento Δx_1, ricavando $k = 0{,}98 \text{ N}/\Delta x_1$; appendere il sasso e misurare Δx_2, da cui $P = k\,\Delta x_2 = 0{,}98 \text{ N} \times \Delta x_2/\Delta x_1$. Condizioni: la molla deve restare entro il limite di elasticità (controllare che torni alla lunghezza a riposo dopo ogni misura), le misure si fanno a molla ferma e verticale, e conviene ripetere le letture per stimare l'incertezza.