CAPITOLO

15

Il lavoro e la potenza

«Ma chi sperasse e tentasse, per via di machine far l'istesso effetto senza crescere tardità al mobile, questo certamente rimarrà ingannato.» — Galileo Galilei, Le mecaniche

OBIETTIVI

1. Calcolare il lavoro di una forza costante usando la sua componente lungo lo spostamento, e riconoscere quando il lavoro è positivo, negativo o nullo.
2. Leggere il lavoro come area sotto il grafico forza–spostamento e calcolare il lavoro per deformare una molla.
3. Dimostrare che il lavoro del peso non dipende dal percorso e distinguere forze conservative e non conservative.
4. Spiegare con il lavoro perché le macchine semplici non fanno risparmiare lavoro.
5. Calcolare potenza, consumi in kWh e rendimento in situazioni reali, e misurare la propria potenza in laboratorio.

INDICE DEL CAPITOLO

15.1 Il lavoro di una forza costante 2
15.2 Il lavoro come area 5
15.3 Il lavoro del peso e le forze conservative 8
15.4 Le macchine semplici non fanno risparmiare lavoro 10
15.5 La potenza 12

Fisica 3 · Parte VI · Lavoro ed energia · versione 1.0
Capitolo 15: Il lavoro e la potenza · pagine 379–400 del volume completo · estratto per lo studio

Nella lingua di tutti i giorni «lavoro» è quasi tutto ciò che costa fatica. Per la fisica una forza «lavora» soltanto quando il corpo su cui agisce si sposta, e lavora tanto di più quanto più grande è la forza e quanto più lungo è lo spostamento nella sua direzione. Chi regge lo zaino fermo, per quanto si stanchi, sullo zaino non compie alcun lavoro; la gru che porta un carico sul tetto di un cantiere ne compie molto.

In cambio, il lavoro si misura, si somma, si confronta. Con il lavoro si capisce perché le macchine semplici dei capitoli 7 e 8 non possono «ingannare la natura», come diceva Galileo; e con il lavoro diviso per il tempo, la *potenza*, si confrontano un ciclista, un ascensore e un asciugacapelli. Soprattutto, il lavoro è la porta d'ingresso al concetto di energia, che studierai nel capitolo 16.

15.1 Il lavoro di una forza costante

15.1.1 Forza e spostamento nella stessa direzione

Spingi un carrello della spesa lungo una corsia del supermercato con una forza orizzontale costante, nella stessa direzione e nello stesso verso in cui il carrello si muove. Se la forza ha modulo F e il carrello percorre uno spostamento di modulo s, il **lavoro** compiuto dalla forza è il prodotto della forza per lo spostamento:

$$W = F \cdot s \qquad \text{(forza e spostamento paralleli e concordi)}$$

Il lavoro è una grandezza **scalare**: un numero con un segno, senza direzione né verso. La sua unità nel SI è il newton per metro, che prende il nome di **joule** (simbolo J), in onore del fisico inglese James Prescott Joule (1818–1889):

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

Un joule è un lavoro piccolo: è quello che si compie sollevando di un metro, lentamente, un corpo che pesa 1 N, cioè una massa di circa 102 g, come una piccola mela. Spingendo il carrello con 30 N per 20 m compi un lavoro di $30\ \text{N} \cdot 20\ \text{m} = 600\ \text{J}$.

15.1.2 Una forza inclinata: conta la componente lungo lo spostamento

Spesso la forza non ha la direzione dello spostamento. Una slitta trascinata con una fune che sale verso la mano si muove in orizzontale, mentre la fune tira in obliquo. Come nel capitolo 5, scomponiamo la forza $\boldsymbol{F}$ in due componenti: $F_{\parallel}$, parallela allo spostamento, e $F_{\perp}$, perpendicolare a esso (Figura 15.1). La componente perpendicolare solleva un poco la slitta e la preme meno sulla neve, ma non la fa avanzare: lungo lo spostamento lavora soltanto $F_{\parallel}$. Perciò, in generale,

$$W = F_{\parallel} \cdot s$$

dove $F_{\parallel}$ è la componente della forza lungo lo spostamento. Per ricavarla usiamo gli strumenti del capitolo 5. Se la fune forma con lo spostamento un angolo di 30°, il triangolo rettangolo che ha per ipotenusa la forza è metà di un triangolo equilatero: $F_{\parallel} = (\sqrt{3}/2)\,F \approx 0{,}866\,F$. A 45° si ha $F_{\parallel} = (\sqrt{2}/2)\,F \approx 0{,}707\,F$; a 60°, $F_{\parallel} = F/2$. Se invece la direzione è data dalla pendenza (la fune «sale di 3 cm ogni 4 cm in orizzontale»), il triangolo della forza è simile al triangolo 3, 4, 5 e $F_{\parallel} = (4/5)\,F = 0{,}8\,F$.

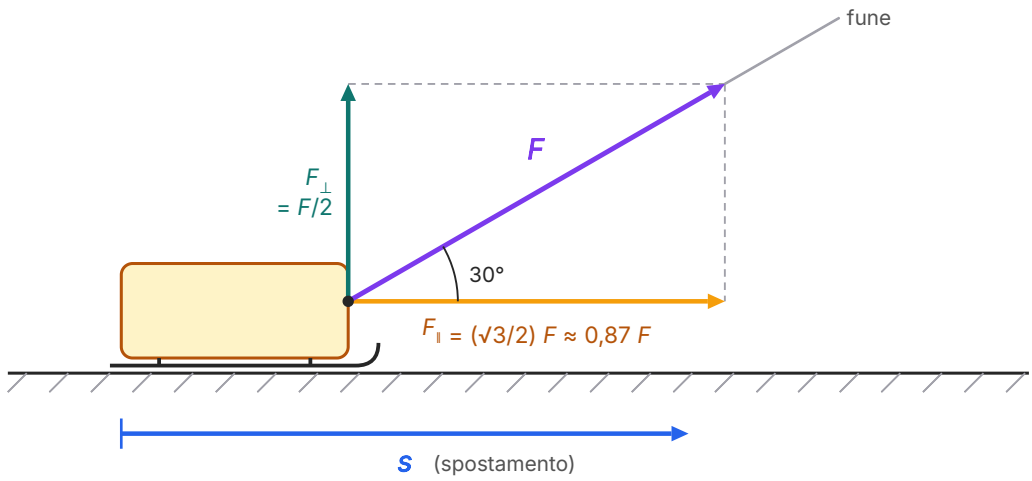


Figura 15.1 Una slitta trascinata da una fune inclinata di 30° sull'orizzontale. Lungo lo spostamento ***s*** lavora solo la componente $F_{\parallel}$ della forza ***F***; la componente $F_{\perp}$ è perpendicolare allo spostamento e non compie lavoro. I valori delle componenti vengono dal triangolo rettangolo notevole 30°-60°-90°.

15.1.3 Lavoro positivo, negativo, nullo

La componente $F_{\parallel}$ può avere lo stesso verso dello spostamento oppure il verso opposto (Figura 15.2). Se ha lo stesso verso, la forza «aiuta» il moto e il lavoro è positivo: è un **lavoro motore**. Se ha verso opposto, la forza «si oppone» al moto e il lavoro è negativo: è un **lavoro resistente**, $W = -F_{\parallel}\,s$. L'attrito dinamico su un corpo che striscia sul pavimento è opposto allo spostamento, e il suo lavoro è sempre negativo.

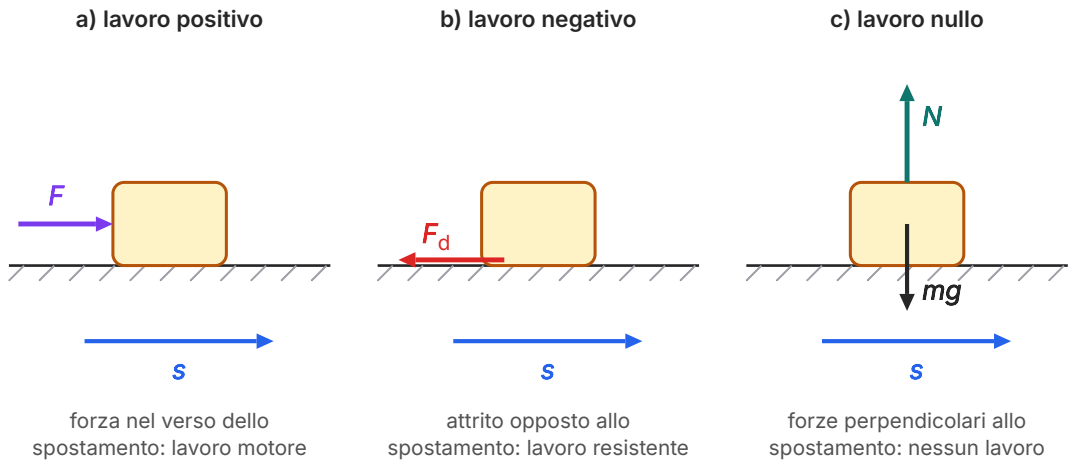


Figura 15.2 Il segno del lavoro dipende dal verso della componente della forza lungo lo spostamento: a) una spinta nel verso del moto compie un lavoro positivo; b) l'attrito dinamico, opposto al moto, compie un lavoro negativo; c) la forza normale N e il peso mg, perpendicolari allo spostamento orizzontale, non compiono lavoro.

Il lavoro è nullo in due situazioni diverse, che conviene distinguere. La prima: la forza è perpendicolare allo spostamento. Su una cassa trascinata sul pavimento, né il peso né la forza normale compiono lavoro. Lo stesso accade alla forza centripeta del moto circolare uniforme (capitolo 14): è perpendicolare alla velocità, e infatti ne cambia la direzione ma non il modulo. La seconda: lo spostamento è nullo. Chi regge fermo un bilanciere sopra la testa esercita una forza grande, ma il bilanciere non si sposta e il lavoro è zero.

ERRORE FREQUENTE

«Mi sono stancato, quindi ho compiuto lavoro»

Reggere uno zaino fermo, o portarlo in orizzontale a velocità costante, stanca anche se la forza delle tue braccia sullo zaino non compie lavoro: nel primo caso lo zaino non si sposta, nel secondo la tua forza è verticale e lo spostamento è orizzontale. La fatica nasce dentro il corpo: per tenere contratto un muscolo, le sue fibre devono ripetere di continuo il loro meccanismo di contrazione, e questo consuma le riserve dell'organismo anche se lo zaino resta fermo. Un tavolo regge lo stesso zaino per ore senza consumare nulla. Il lavoro della fisica riguarda la forza e lo spostamento del corpo su cui agisce, non la fatica di chi la esercita.

15.1.4 Il lavoro di più forze

Su un corpo agiscono di solito più forze, e ciascuna compie il suo lavoro. Il **lavoro totale** è la somma algebrica, con i segni, dei lavori delle singole forze. Si dimostra che è uguale al lavoro

della forza risultante, come verificherai nell'esempio che segue. Il lavoro totale avrà un ruolo centrale nel capitolo 16, perché è legato alla variazione della velocità del corpo.

ESEMPIO SVOLTO

La slitta sulla neve

Problema. Una slitta viene trascinata per 25,0 m su un tratto orizzontale innevato con una fune inclinata di 30° sull'orizzontale (Figura 15.1); la forza della fune ha modulo 60,0 N. L'attrito della neve sulla slitta vale 40,0 N. Calcola il lavoro di ciascuna forza e il lavoro totale. Quanto lavoro compirebbe la stessa forza con la fune orizzontale?

Le forze. Sulla slitta agiscono la forza della fune, l'attrito, il peso e la forza normale del suolo. Il peso e la forza normale sono verticali, perpendicolari allo spostamento: il loro lavoro è nullo.

La fune. La componente lungo lo spostamento è il cateto adiacente all'angolo di 30°: $F_{\parallel} = (\sqrt{3}/2) \cdot 60{,}0\ \text{N} = 52{,}0\ \text{N}$. Il lavoro è

$$W_{\text{fune}} = F_{\parallel} \cdot s = 52{,}0\ \text{N} \cdot 25{,}0\ \text{m} = 1{,}30 \times 10^{3}\ \text{J}$$

L'attrito. È opposto allo spostamento: $W_{\text{attr}} = -40{,}0\ \text{N} \cdot 25{,}0\ \text{m} = -1{,}00 \times 10^{3}\ \text{J}$.

Lavoro totale. $W_{\text{tot}} = 1299\ \text{J} - 1000\ \text{J} + 0 + 0 \approx 3{,}0 \times 10^{2}\ \text{J}$. **Controllo** con la risultante: lungo lo spostamento la risultante vale $52{,}0\ \text{N} - 40{,}0\ \text{N} = 12{,}0\ \text{N}$, e $12{,}0\ \text{N} \cdot 25{,}0\ \text{m} \approx 3{,}0 \times 10^{2}\ \text{J}$. La risultante non è nulla, quindi la slitta accelera (capitolo 13): il legame fra il lavoro totale e la velocità è il tema del capitolo 16.

Fune orizzontale. Con la stessa forza tutta lungo lo spostamento: $W = 60{,}0\ \text{N} \cdot 25{,}0\ \text{m} = 1{,}50 \times 10^{3}\ \text{J}$.

15.2 Il lavoro come area

15.2.1 Il grafico forza–spostamento

Riportiamo in un grafico la componente della forza lungo lo spostamento, in ordinata, in funzione della posizione, in ascissa. Per una forza costante il grafico è un segmento orizzontale, e il rettangolo compreso fra il segmento e l'asse delle ascisse ha base s e altezza F: la sua area, $F \cdot s$, è proprio il lavoro (Figura 15.3a). L'«area» va misurata con le unità degli assi: newton per metro, cioè joule. È la stessa idea che nei capitoli 10 e 11 ti ha fatto leggere lo spostamento come area sotto il grafico velocità–tempo.

L'interpretazione come area ha un grande pregio: funziona anche quando la forza cambia durante lo spostamento. Si divide lo spostamento in tratti abbastanza piccoli perché in ciascuno la forza sia quasi costante; il lavoro di ogni tratto è l'area di un rettangolo sottile, e il lavoro totale è la somma di queste aree. Così **il lavoro di una forza variabile è l'area sotto il grafico**

forza–spostamento; se il grafico scende sotto l'asse, la forza è opposta allo spostamento e quell'area si conta con il segno meno.

15.2.2 Il lavoro per deformare una molla

Per allungare una molla ideale vale la legge di Hooke del capitolo 6: per tenerla allungata di x rispetto alla lunghezza a riposo serve una forza di modulo $F = k\,x$. Allunghiamola lentamente da 0 fino a x: il grafico della forza è una retta per l'origine di pendenza k, e l'area sottostante è un triangolo di base x e altezza kx (Figura 15.3b). Il lavoro che compi è quindi

$$W = \frac{1}{2} \cdot x \cdot kx = \frac{1}{2} kx^2$$

Il lavoro non è proporzionale all'allungamento ma al suo quadrato: per allungare la stessa molla del doppio serve un lavoro quadruplo, perché raddoppiano sia la base sia l'altezza del triangolo. La formula vale partendo dalla molla a riposo; fra due allungamenti x_1 e x_2 l'area è un trapezio, e il lavoro è la differenza $\frac{1}{2}kx_2^2 - \frac{1}{2}kx_1^2$. La molla, per il terzo principio, spinge la mano con una forza opposta: il suo lavoro sulla mano è $-\frac{1}{2}kx^2$.

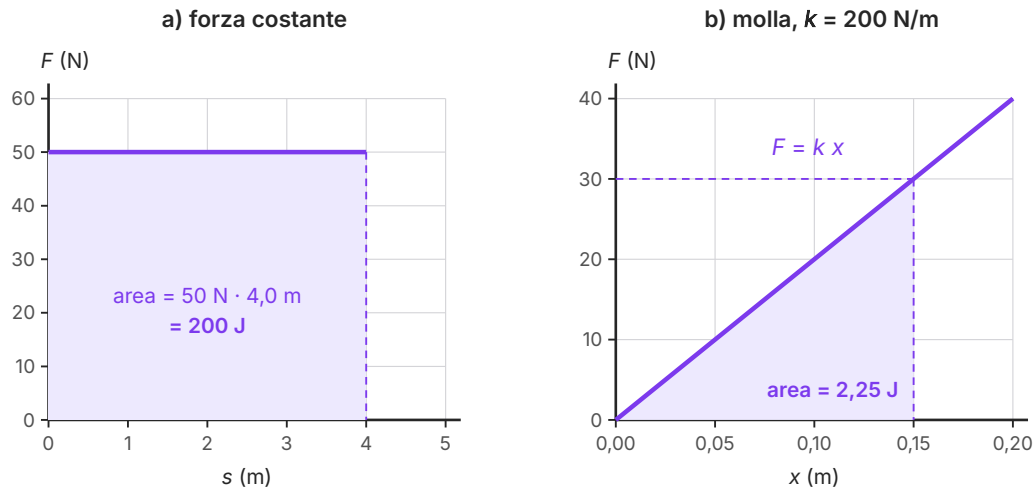


Figura 15.3 Il lavoro come area sotto il grafico forza–spostamento. a) Una forza costante di 50 N per 4,0 m: l'area del rettangolo è 200 J. b) La forza necessaria per allungare una molla ideale con k = 200 N/m cresce linearmente: per portarla da 0 a 0,15 m serve un lavoro pari all'area del triangolo, ½ · 0,15 m · 30 N = 2,25 J.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto lavoro serve per tendere un elastico?

Problema. Si appende un elastico di gomma a un sostegno e lo si allunga con un dinamometro, leggendo la forza a intervalli di 2,0 cm (Tabella 15.1). Quanto lavoro serve per allungarlo di 10,0 cm? Che errore si commetterebbe trattandolo come una molla ideale?

Tabella 15.1 Dati tipici della trazione di un elastico; l'incertezza del dinamometro è 0,1 N. Le aree dei trapezi sono calcolate nella terza colonna.

x (cm)	F (N) ± 0,1 N	area del tratto precedente (J)
0	0	—
2,0	2,6	0,026
4,0	4,4	0,070
6,0	5,8	0,102
8,0	7,0	0,128
10,0	8,4	0,154

Il grafico. I punti non stanno su una retta (Figura 15.4): nel primo tratto la forza cresce di 2,6 N, negli ultimi soltanto di 1,2–1,4 N, e l'elastico non segue la legge di Hooke. Uniamo i punti con segmenti: sotto ogni segmento c'è un trapezio.

Le aree. Ogni trapezio ha altezza 2,0 cm = 0,020 m e basi uguali alle due forze. Il primo: (0 + 2,6) N / 2 · 0,020 m = 0,026 J; il secondo: (2,6 + 4,4) N / 2 · 0,020 m = 0,070 J; e così via. La somma è

$$W \approx 0{,}026\ \text{J} + 0{,}070\ \text{J} + 0{,}102\ \text{J} + 0{,}128\ \text{J} + 0{,}154\ \text{J} = 0{,}48\ \text{J}$$

Confronto. Una molla ideale che arrivasse alla stessa forza finale, 8,4 N a 10,0 cm, avrebbe il grafico rettilineo tratteggiato in rosso, e richiederebbe ½ · 0,100 m · 8,4 N = 0,42 J: un valore più piccolo del 12% circa, perché la retta passa sotto i punti misurati. Anche i trapezi sono un'approssimazione, ma con tratti di 2 cm l'errore è piccolo.

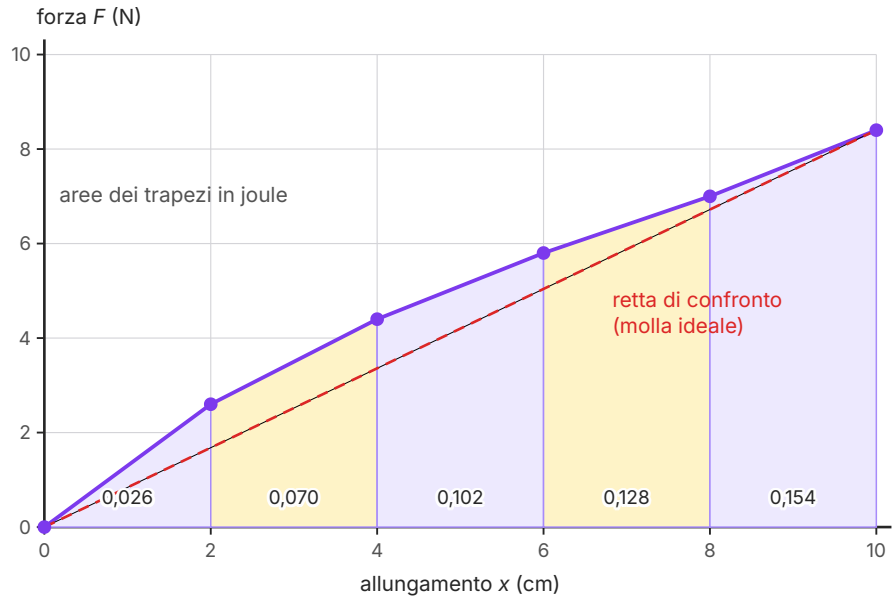


Figura 15.4 La forza necessaria per allungare un elastico, dai dati della Tabella 15.1. L'area sotto la spezzata, somma dei cinque trapezi, stima il lavoro: circa 0,48 J. La retta tratteggiata rappresenta una molla ideale che raggiunge la stessa forza finale.

15.3 Il lavoro del peso e le forze conservative

15.3.1 Il lavoro del peso

Un vaso di massa m cade da un davanzale alto h. Durante la caduta il peso, di modulo mg, è diretto verso il basso come lo spostamento: il suo lavoro è positivo e vale $mg \cdot h$. Se invece un corpo viene sollevato di h, il peso è opposto allo spostamento e compie il lavoro negativo $-mgh$; chi lo solleva lentamente, a velocità costante, esercita una forza uguale al peso e compie il lavoro positivo mgh. Nel lavoro del peso conta soltanto lo spostamento verticale: in un tratto orizzontale il peso è perpendicolare allo spostamento e non lavora.

$$W_{\text{peso}} = \pm\, mgh \qquad (+ \text{ in discesa}, - \text{ in salita})$$

15.3.2 Scala o rampa?

Una persona di 60 kg sale di un piano, cioè di 3,0 m, dal punto A al punto B. Può salire una scala di dieci gradini oppure una rampa lunga 12 m (Figura 15.5). Sulla scala, nelle «pedate» orizzontali il peso non lavora; in ognuna delle dieci «alzate» verticali di 0,30 m il suo lavoro è $-mg \cdot 0{,}30$ m, e in tutto $-mg \cdot 3{,}0$ m. Sulla rampa, come hai visto nel capitolo 7 per il piano inclinato, la

componente del peso lungo il piano vale $mg \cdot h/l$ ed è opposta allo spostamento, che è lungo l: il lavoro è $-mg \cdot (h/l) \cdot l = -mgh$. I due risultati coincidono:

$$W_{\text{peso}} = -mgh = -60\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 3{,}0\ \text{m} \approx -1{,}8 \times 10^3\ \text{J}$$

Lo stesso vale per qualsiasi percorso fra A e B, anche uno che prima scende in cantina e poi risale: ogni percorso si può approssimare con tanti piccoli gradini, e contano soltanto le alzate, la cui somma con i segni è il dislivello. **Il lavoro del peso dipende soltanto dalle quote iniziale e finale, non dal percorso.**

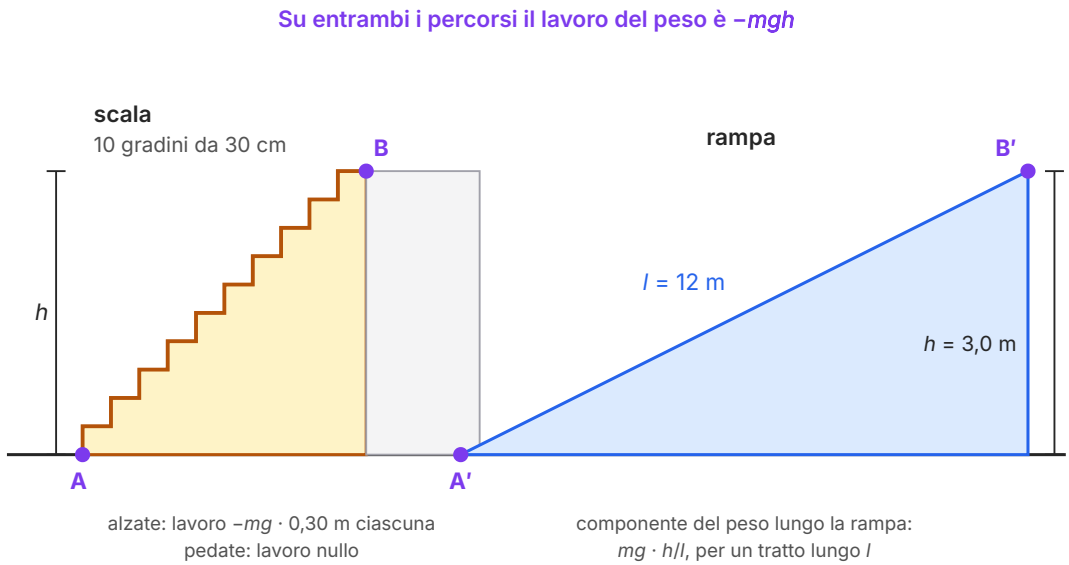


Figura 15.5 Due percorsi dallo stesso piano terra (A, A′) allo stesso pianerottolo (B, B′), con un dislivello h = 3,0 m. Sulla scala il peso lavora soltanto nelle alzate; sulla rampa lavora la sua componente lungo il piano, mgh/l, per tutta la lunghezza l. In entrambi i casi il lavoro del peso è $-mgh$. La rampa non è disegnata in scala.

15.3.3 Il lavoro dell'attrito dipende dal percorso

Con l'attrito le cose vanno diversamente. Una cassa di 20 kg viene trascinata sul pavimento da un angolo A di una stanza all'angolo opposto B, a 5,0 m in linea retta; il coefficiente d'attrito dinamico è 0,30. L'attrito vale $0{,}30 \cdot 196\ \text{N} \approx 58{,}8\ \text{N}$, perché sul pavimento orizzontale la forza premente è il peso. In linea retta il suo lavoro è $-58{,}8\ \text{N} \cdot 5{,}0\ \text{m} \approx -2{,}9 \times 10^2\ \text{J}$. Se invece la cassa segue due pareti, per 3,0 m e poi per 4,0 m, il lavoro diventa $-58{,}8\ \text{N} \cdot 7{,}0\ \text{m} \approx -4{,}1 \times 10^2\ \text{J}$. Lo stesso spostamento, due lavori diversi: **il lavoro dell'attrito dipende dal percorso**, perché l'attrito è sempre opposto al moto e il suo lavoro è proporzionale alla strada percorsa, non al dislivello.

15.3.4 Forze conservative e non conservative

Questa differenza divide le forze in due grandi famiglie. Una forza è **conservativa** se il suo lavoro per portare un corpo da un punto a un altro non dipende dal percorso seguito, ma solo dai punti di partenza e di arrivo. Il peso è conservativo, e lo è anche la forza elastica di una molla ideale, il cui lavoro dipende solo dagli allungamenti iniziale e finale. Una forza è **non conservativa** se il suo lavoro dipende dal percorso: l'attrito radente e la resistenza dell'aria sono non conservative, e poiché il loro lavoro sul corpo che si muove è sempre negativo si chiamano anche **forze dissipative**.

DA RICORDARE

Il criterio del percorso chiuso

Su un percorso chiuso, che torna al punto di partenza, il lavoro di una forza conservativa è zero: il peso di un sasso lanciato in alto compie lavoro negativo in salita e lavoro positivo uguale in discesa. Se c'è anche un solo percorso chiuso su cui il lavoro non è zero, la forza non è conservativa: l'attrito su una cassa trascinata avanti e indietro compie sempre lavoro negativo. Questa distinzione è il fondamento del capitolo 16: soltanto per le forze conservative si può definire un'energia potenziale.

15.4 Le macchine semplici non fanno risparmiare lavoro

Nei capitoli 7 e 8 hai visto che una macchina semplice permette di equilibrare un peso con una forza più piccola. Consideriamo macchine **ideali**, senza attriti e di massa trascurabile, che spostano il carico lentamente, a velocità costante.

15.4.1 Il piano inclinato

Per portare a 1,0 m d'altezza un carico di 50 kg (peso 490 N) lo si può sollevare in verticale, con una forza di 490 N per 1,0 m: lavoro 490 J. Oppure lo si può spingere su un'asse liscia lunga 4,0 m: basta una forza parallela al piano pari a mgh/l = 490 N · 1,0/4,0 ≈ 123 N, ma per una strada quattro volte più lunga. Il lavoro è 122,5 N · 4,0 m = 490 J, lo stesso. Nel caso generale $(mgh/l) \cdot l = mgh$: è il risultato della sezione precedente, visto dalla parte di chi spinge.

15.4.2 La leva e la carrucola mobile

In una leva in equilibrio vale $F_1 b_1 = F_2 b_2$. Se la leva ruota di un piccolo angolo, i suoi due estremi percorrono archi di circonferenza con lo stesso angolo al centro: come sai dal capitolo 12, la lunghezza di un arco è proporzionale al raggio, quindi $s_1 : s_2 = b_1 : b_2$ (Figura 15.6a). Moltiplicando membro a membro le due relazioni si ottiene $F_1 s_1 = F_2 s_2$: il lavoro della forza motrice è uguale a quello necessario per sollevare il carico.

Nella carrucola mobile ideale (Figura 15.6b) il carico è sostenuto da due tratti di fune, e la forza necessaria è la metà del peso. Ma perché il carico salga di h entrambi i tratti devono accorciarsi di h: chi tira deve recuperare $2h$ di fune. Il lavoro è $(mg/2) \cdot 2h = mgh$. Lo stesso bilancio vale per il paranco e per il torchio idraulico del capitolo 9, il cui pistone piccolo percorre un tratto tanto più lungo quanto più la forza è ridotta.

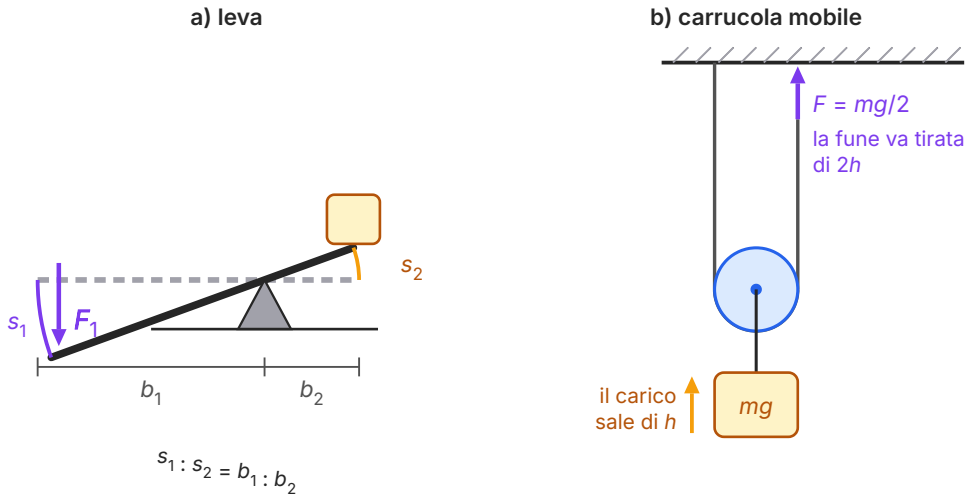


Figura 15.6 Le macchine semplici non riducono il lavoro. a) In una leva gli estremi percorrono archi proporzionali ai bracci, $s_1 : s_2 = b_1 : b_2$; poiché $F_1 b_1 = F_2 b_2$, i due lavori sono uguali. In tratteggio la leva prima della rotazione. b) Nella carrucola mobile la forza è la metà del peso, ma per sollevare il carico di h la fune va tirata di $2h$.

15.4.3 La regola d'oro della meccanica

Tutti questi esempi obbediscono a una sola legge, chiamata tradizionalmente **regola d'oro della meccanica**: **una macchina ideale non riduce il lavoro; quello che si guadagna in forza si perde in spostamento.** Una macchina reale fa di peggio: una parte del lavoro se ne va negli attriti. Le macchine servono allora a compiere con la forza di cui disponiamo un'operazione che ne richiederebbe una maggiore, o a cambiare la direzione di una forza, come la carrucola fissa.

Galileo lo spiegò con grande chiarezza nelle *Mecaniche*, un trattato nato dalle sue lezioni degli anni padovani. Gli artigiani, scriveva, si illudono di «potere con poca forza muovere ed alzare grandissimi pesi, ingannando, in un certo modo, con le loro machine la natura»; ma la forza minore deve percorrere un cammino tanto più lungo quanto più il peso la supera. La sua conclusione è l'epigrafe di questo capitolo: chi spera di ottenere con una macchina lo stesso effetto senza rendere più lento il moto del carico «certamente rimarrà ingannato».

15.5 La potenza

15.5.1 Lavoro e tempo

Salire di un piano camminando o di corsa richiede lo stesso lavoro contro il peso (per la persona di 60 kg, circa $1{,}8 \times 10^3$ J), ma di corsa lo si compie in meno tempo. La grandezza che misura la rapidità con cui si compie un lavoro è la **potenza**, rapporto fra il lavoro e l'intervallo di tempo impiegato a compierlo:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

Se il lavoro non viene compiuto con un ritmo costante, questo rapporto è una **potenza media**, come la velocità media del capitolo 10. L'unità di potenza del SI è il joule al secondo, chiamato **watt** (W), dal nome dell'ingegnere scozzese James Watt (1736–1819), che perfezionò la macchina a vapore: 1 W = 1 J/s. Attento a non confondere il simbolo W del lavoro, in corsivo, con il simbolo W del watt, in tondo. Se la persona sale il piano in 4,0 s, la sua potenza media è 1764 J / 4,0 s ≈ $4{,}4 \times 10^2$ W; se impiega 12 s, è circa $1{,}5 \times 10^2$ W.

15.5.2 Potenza e velocità

Quando una forza costante F agisce nella direzione e nel verso del moto di un corpo che si muove a velocità costante v, in un intervallo Δt il corpo percorre $s = v\Delta t$ e la forza compie il lavoro $Fv\Delta t$. Dividendo per Δt:

$$P = F \cdot v$$

Un ascensore che porta 800 kg (cabina e passeggeri) verso l'alto a 1,5 m/s costanti è in equilibrio, perché la sua velocità non cambia (primo principio, capitolo 13): il cavo deve esercitare una forza uguale al peso, 800 kg · 9,8 m/s^2 = 7840 N. La potenza che il cavo trasmette alla cabina è 7840 N · 1,5 m/s ≈ $1{,}2 \times 10^4$ W, cioè circa 12 kW. Per lo stesso motivo un'auto in salita rallenta: serve una forza maggiore, e Fv non può superare la potenza del motore.

15.5.3 Chilowattora e cavallo vapore

Poiché il lavoro è potenza per tempo, si può misurare in un'unità pratica molto diffusa: il **chilowattora** (kWh), il lavoro compiuto in un'ora da una macchina che sviluppa la potenza di 1 kW:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3{,}6 \times 10^6 \text{ J}$$

Il chilowattora è dunque un lavoro, o, come vedrai nel capitolo 16, un'energia: è l'unità con cui si contano i consumi sulla bolletta elettrica. Un bollitore da 2,0 kW acceso per 3 minuti, cioè per 0,050 h, consuma 2,0 kW · 0,050 h = 0,10 kWh = $3{,}6 \times 10^5$ J. Per i motori si usa ancora, nel lin-

guaggio comune, il **cavallo vapore** (CV), definito come la potenza necessaria per sollevare 75 kg di un metro in un secondo: 1 CV = 75 kg · 9,806 65 m/s^2 · 1 m / 1 s ≈ 735,5 W.

15.5.4 Il rendimento

Nessuna macchina reale trasforma in lavoro utile tutto il lavoro che riceve: una parte se ne va negli attriti. Si chiama **rendimento** η (lettera greca «eta») il rapporto fra il **lavoro utile**, quello che la macchina compie per lo scopo a cui serve, e il lavoro (o l'energia) che le viene fornito; nello stesso intervallo di tempo, è anche il rapporto fra le potenze:

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{W_{\text{fornito}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{assorbita}}}$$

Il rendimento è un numero puro, spesso espresso in percentuale, ed è sempre minore di 1 (minore del 100%). Se il motore dell'ascensore assorbe dalla rete elettrica 15 kW mentre trasmette alla cabina 11,8 kW, il suo rendimento è 11,8/15 ≈ 0,79, cioè circa il 79%: il resto riscalda il motore, i cavi e le guide.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Lavoro viene dal latino *labor*, «fatica, sforzo», attraverso il verbo *laborare*. L'origine ricorda la fatica, ma il significato fisico, come hai visto, è molto più ristretto.

Potenza viene dal latino *potentia*, da *potens*, participio di *posse*, «potere»: la capacità di fare qualcosa. In fisica è diventata una misura precisa: quanto lavoro si compie in un secondo.

Erg è il nome dell'unità di lavoro di un sistema di unità più antico del SI, basato su centimetro, grammo e secondo: 1 erg = 10^{-7} J. È tratto dal greco ἔργον, «opera, lavoro», la stessa parola che ritroverai, nel capitolo 16, dentro ἐνέργεια.

COLLEGAMENTI

Il corpo umano e gli elettrodomestici

La salita di corsa della persona di 60 kg richiede circa 440 W: una potenza che si sostiene per pochi secondi, non per un'ora. A passo normale bastano 100–150 W contro il peso, e i muscoli ne consumano di più, perché il loro rendimento è molto inferiore al 100%.

Sulla targhetta di un elettrodomestico è indicata la potenza assorbita: qualche watt per una lampadina a LED, uno o due chilowatt per un forno. Il consumo dipende dalla potenza *e* dal tempo: una lampada a LED da 10 W accesa per 100 ore consuma 1 kWh, quanto un forno da 2 kW in mezz'ora.

APPROFONDIMENTO

Coriolis e la parola «lavoro»

L'idea che conti il prodotto di un peso per l'altezza a cui viene sollevato si trova già nei ragionamenti di Galileo sulle macchine; il nome «lavoro», però, è dell'Ottocento. Lo introdusse in francese, *travail*, l'ingegnere e matematico Gaspard-Gustave de Coriolis (1792–1843), che insegnava all'École Polytechnique di Parigi, nel libro *Du calcul de l'effet des machines* («Sul calcolo dell'effetto delle macchine»), pubblicato nel 1829.

Negli stessi anni anche l'ingegnere Jean-Victor Poncelet, nei suoi corsi di meccanica applicata alle macchine, usava la stessa parola nello stesso senso. Coriolis contribuì a dare il significato moderno anche alla grandezza che oggi chiamiamo energia cinetica, che studierai nel capitolo 16. Propose anche un'unità di lavoro, il *dinamodo*: il lavoro necessario per sollevare 1000 kg di un metro, circa $9{,}8 \times 10^3$ J nelle unità di oggi, adatto a confrontare un uomo, un cavallo e una macchina a vapore. L'unità non ebbe fortuna; la parola, invece, è rimasta.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la tua potenza sulle scale

Materiali. Una scala di almeno 15 gradini uguali; un metro a nastro; un cronometro (anche quello di uno smartphone); una bilancia pesapersone.

Procedimento. Misura la tua massa e l'altezza di un gradino; moltiplicata per il numero dei gradini, dà il dislivello h. Un compagno cronometra la salita, dal momento in cui il primo piede lascia il pavimento a quello in cui l'ultimo piede tocca il pianerottolo. Fai cinque salite a passo svelto e cinque di corsa, riposando fra una prova e l'altra. Calcola il lavoro contro il peso mgh e la potenza media $mgh/\Delta t$; propaga le incertezze come nel capitolo 3 (per un prodotto o un quoziente si sommano le incertezze relative) e scrivi la relazione come nel capitolo 4.

Tabella 15.2 Dati tipici: m = (62,0 ± 0,5) kg; 18 gradini da (16,5 ± 0,1) cm, quindi h = (2,97 ± 0,02) m. Il tempo medio ha per incertezza la semidispersione massima.

Salita	Tempi delle cinque prove (s)	t_{medio} (s)	P (W)
a passo svelto	4,12; 3,95; 4,30; 4,05; 4,18	4,1 ± 0,2	440 ± 30
di corsa	2,48; 2,62; 2,55; 2,40; 2,53	2,5 ± 0,1	720 ± 40

Che cosa concludere. Il lavoro è lo stesso nei due casi, $62{,}0\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 2{,}97\ \text{m} \approx 1{,}80 \times 10^3\ \text{J}$; la potenza cambia perché cambia il tempo. A passo svelto l'incertezza relativa della potenza è 0,8% (massa) + 0,6% (dislivello) + 4,2% (tempo) ≈ 6%: domina il cronometraggio manuale; $0{,}06 \cdot 438\ \text{W} \approx 26\ \text{W}$, che con una cifra significativa diventa 30 W. I due risultati non sono compatibili: la potenza di corsa è davvero maggiore.

Sicurezza. Usa una scala con il corrimano, senza ostacoli e non affollata; nella salita di corsa non saltare i gradini. Non fare la prova se hai problemi di salute che sconsigliano uno sforzo intenso.

Per la relazione. Riporta la tabella, il calcolo delle due potenze con l'incertezza propagata e il confronto di compatibilità. Discuti gli errori sistematici: la potenza calcolata è solo quella spesa contro il peso, non quella consumata dai muscoli; i gradini potrebbero non essere tutti uguali; il tempo di reazione di chi cronometra pesa di più quando la salita è breve.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Lavoro di una forza costante: $W = F_{\parallel} \cdot s$: componente della forza lungo lo spostamento per il modulo dello spostamento; positivo se $F_{\parallel}$ ha il verso dello spostamento, negativo se ha verso opposto, nullo se la forza è perpendicolare. Unità: joule, 1 J = 1 N·m.

Lavoro come area: area sotto il grafico forza–spostamento (con il segno). Molla ideale allungata da 0 a x: $W = \frac{1}{2}\, k\, x^2$.

Lavoro del peso: $W_{\text{peso}} = \pm\, mgh$ (+ in discesa, − in salita), qualunque sia il percorso: il peso è una forza conservativa. Il lavoro dell'attrito dinamico, $-F_{\text{d}} \cdot$ (strada percorsa), dipende dal percorso.

Regola d'oro: in una macchina ideale $F_1 s_1 = F_2 s_2$.

Potenza: $P = W/\Delta t$, lavoro compiuto in un secondo; unità watt, 1 W = 1 J/s. Per una forza costante nel verso del moto, a velocità costante: $P = Fv$. 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J (un lavoro); 1 CV ≈ 735,5 W (una potenza).

Rendimento: $\eta = W_{\text{utile}}/W_{\text{fornito}} = P_{\text{utile}}/P_{\text{assorbita}}$, numero puro minore di 1.

SINTESI

- Il lavoro di una forza costante è $W = F_{\parallel} \cdot s$, dove $F_{\parallel}$ è la componente della forza lungo lo spostamento; è una grandezza scalare e si misura in joule (1 J = 1 N·m).
- Per una forza inclinata di 30°, 45° o 60° sullo spostamento la componente utile si ricava dai triangoli notevoli; per una direzione data dalla pendenza, dai triangoli simili.
- Il lavoro è positivo (motore) se la forza ha una componente nel verso dello spostamento, negativo (resistente) se nel verso opposto, nullo se la forza è perpendicolare allo spostamento o se lo spostamento è nullo.
- Il lavoro totale su un corpo è la somma, con i segni, dei lavori delle singole forze, ed è uguale al lavoro della risultante.
- Il lavoro è l'area sotto il grafico forza–spostamento; per allungare una molla ideale da 0 a x serve il lavoro $\frac{1}{2}k\,x^2$.
- Il lavoro del peso è $\pm\, mgh$ e dipende solo dal dislivello, non dal percorso: il peso è una forza conservativa, come la forza elastica.
- Il lavoro dell'attrito è negativo e proporzionale alla strada percorsa, quindi dipende dal percorso: l'attrito è una forza non conservativa (dissipativa). Il lavoro di una forza conservativa lungo un percorso chiuso è zero.
- Le macchine semplici ideali non riducono il lavoro: ciò che si guadagna in forza si perde in spostamento (regola d'oro della meccanica); quelle reali richiedono più lavoro di quello utile.
- La potenza è il lavoro compiuto nell'unità di tempo, $P = W/\Delta t$, e si misura in watt; per una forza costante nel verso del moto a velocità costante, $P = Fv$.
- Il chilowattora è un'unità di lavoro (e di energia), 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J; il chilowatt e il cavallo vapore (≈ 735,5 W) sono unità di potenza.
- Il rendimento di una macchina è il rapporto fra lavoro utile e lavoro fornito: un numero puro sempre minore di 1.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Un joule equivale a:
   - **A.** 1 N/m
   - **B.** 1 N·s
   - **C.** 1 N·m
   - **D.** 1 kg·m/s^2

2. ● Una forza costante compie un lavoro nullo su un corpo che si sposta quando:
   - **A.** è perpendicolare allo spostamento
   - **B.** è molto piccola rispetto al peso del corpo
   - **C.** ha verso opposto allo spostamento
   - **D.** agisce solo per un breve intervallo di tempo

3. ● Tieni fermo, all'altezza delle spalle, uno zaino di 8,0 kg per 5 minuti. Il lavoro che la tua forza compie sullo zaino:
   - **A.** vale 8,0 kg · 9,8 m/s^2 · 300 s
   - **B.** è positivo ma piccolo
   - **C.** è negativo
   - **D.** è zero

4. ●● Un bambino scende da uno scivolo alto 2,0 m e poi da un altro alto 2,0 m, più lungo e meno ripido. Il lavoro del peso:
   - **A.** è maggiore sullo scivolo più lungo
   - **B.** è lo stesso sui due scivoli
   - **C.** è maggiore sullo scivolo più ripido
   - **D.** è nullo su entrambi

5. ● Il chilowattora è un'unità di misura di:
   - **A.** potenza
   - **B.** lavoro (ed energia)
   - **C.** forza
   - **D.** tempo

6. ●● In un grafico che riporta la forza in funzione dello spostamento, il lavoro della forza è rappresentato:
   - **A.** dalla pendenza della curva
   - **B.** dal valore massimo della forza
   - **C.** dall'area compresa fra la curva e l'asse degli spostamenti
   - **D.** dal punto in cui la curva incontra l'asse delle ordinate

7. ●● Una forza il cui lavoro fra due punti è lo stesso lungo qualsiasi percorso si dice:
   - **A.** conservativa
   - **B.** dissipativa
   - **C.** resistente
   - **D.** apparente

8. ●● Con un piano inclinato ideale lungo quattro volte la sua altezza sollevi un carico a velocità costante. Rispetto al sollevamento in verticale, usi:
   A. un quarto della forza e un quarto del lavoro
   B. la stessa forza e un quarto del lavoro
   C. quattro volte la forza e lo stesso lavoro
   D. un quarto della forza e lo stesso lavoro

Vero o falso

9. ● Il lavoro è una grandezza vettoriale, perché è il prodotto di due vettori. V / F

10. ● Il lavoro dell'attrito dinamico su una cassa che striscia sul pavimento è negativo. V / F

11. ●● Nel moto circolare uniforme la forza centripeta non compie lavoro. V / F

12. ●● Un motore da 2 kW compie sempre più lavoro di un motore da 1 kW. V / F

13. ● Trascinando una cassa avanti e indietro fino al punto di partenza, il lavoro dell'attrito è zero. V / F

Applicare

14. ● Spingi un carrello con una forza orizzontale costante di 35 N per 12 m, nel verso del moto. Quanto lavoro compi?

15. ● Completa: 1 kWh = _____ J; 2,5 kW = _____ W; 1 CV ≈ _____ W; 1 J = 1 N · _____ .

16. ●● Trascini una valigia per 50 m su un pavimento orizzontale tirando la maniglia con una forza di 80 N inclinata di 60° sull'orizzontale. Quanto lavoro compie la tua forza?

17. ● Una gru solleva a velocità costante un carico di 450 kg di 12 m. Calcola il lavoro della gru e il lavoro del peso del carico.

18. ●● Una molla ideale ha costante elastica 350 N/m. a) Quanto lavoro serve per allungarla di 8,0 cm, a partire dalla lunghezza a riposo? b) E per allungarla ulteriormente da 8,0 cm a 16,0 cm? Perché il secondo lavoro non è uguale al primo?

19. ●● Usa i dati della Tabella 15.1 e la Figura 15.4. Quanto lavoro serve per allungare l'elastico da 4,0 cm a 8,0 cm?

20. ● Un asciugacapelli da 1800 W resta acceso per 10 minuti. Quanta energia elettrica assorbe? Esprimila in kWh e in joule.

Problemi

21. ●● Una cassa di 40 kg viene trascinata a velocità costante per 6,0 m su un pavimento orizzontale, con una forza orizzontale; il coefficiente d'attrito dinamico è 0,35. a) Quanto vale la forza? b) Calcola il lavoro della forza, dell'attrito, del peso e della forza normale. c) Quanto vale il lavoro totale? Perché?

22. ● Una studentessa di 55 kg sale dal piano terra al quarto piano (quattro piani da 3,2 m) in 1 min 10 s. Calcola il lavoro contro il peso e la potenza media che sviluppa per compierlo.

23. ●●● Un carrello di 25 kg viene spinto a velocità costante fino in cima a una rampa alta 1,2 m e lunga 4,8 m, con una forza parallela alla rampa. a) Se la rampa è liscia, quanto valgono la forza e il suo lavoro? Confronta il lavoro con quello necessario per sollevare il carrello in verticale. b) Se il coefficiente d'attrito dinamico fra carrello e rampa è 0,20, quanto valgono la forza e il lavoro? (Ricava la base della rampa con il teorema di Pitagora.) c) Qual è il rendimento della rampa con attrito, considerando utile il lavoro di sollevamento?

24. ●●● Un ascensore con la cabina e i passeggeri ha una massa di 900 kg e sale a velocità costante di 1,2 m/s. a) Quale forza esercita il cavo? b) Quale potenza trasmette alla cabina? c) Se il rendimento del sistema motore è 0,70, quale potenza assorbe il motore? Esprimila in kW e in CV. d) Quanta energia assorbe il motore per una salita di 30 m? Esprimila in kWh.

25. ●●● Un'auto procede in autostrada a 90 km/h costanti; le forze che si oppongono al moto (attrito dell'aria e resistenza al rotolamento) valgono in tutto 600 N. a) Quale potenza deve fornire il motore alle ruote? Esprimila in kW e in CV. b) Ad alta velocità la resistenza dell'aria cresce circa con il quadrato della velocità. Supponendo che a 180 km/h la forza resistente totale diventi quattro volte maggiore, quale potenza servirebbe?

26. ●● Con una carrucola mobile si solleva di 2,0 m un sacco di cemento di 60 kg. a) Se la carrucola è ideale, quale forza serve, di quanto va tirata la fune e quanto lavoro si compie? b) Se il rendimento della carrucola reale è 0,80, quanto lavoro e quale forza (supposta costante) servono?

Ragionare e argomentare

27. ●● Porti una valigia in mano camminando in piano a velocità costante. Spiega perché la forza con cui la sostieni non compie lavoro sulla valigia, e perché tuttavia ti stanchi.

28. ●●● Stima di Fermi. Stima il lavoro contro il peso e la potenza media di un tuo compagno che, con lo zaino, sale dal piano terra al terzo piano della scuola. Dichiara i valori che scegli. Quanti kWh sono? Che cosa ne concludi sul «costo» energetico della salita?

29. ●● Trova l'errore. «Un libro di 1,0 kg viene sollevato dal pavimento fino a uno scaffale alto 2,0 m e poi riportato sul pavimento. Il lavoro del peso è $2 \cdot (1{,}0\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 2{,}0\ \text{m}) \approx 39\ \text{J}$, perché il libro ha percorso 4,0 m.» Correggi il ragionamento e dai il risultato giusto.

30. ●●● Commenta la fonte. Nelle *Mecaniche* Galileo osserva che un grande peso si può trasportare con una forza piccola anche senza macchine, dividendolo in parti: in quel modo, scrive, «il qual peso diviso in parti, senz'altra machina, dalla medesima forza, dentro al medesimo tempo, per l'istesso intervallo, saria stato trasferito». Che cosa afferma Galileo? In che senso questo argomento anticipa la regola d'oro della meccanica? Come lo verificheresti con una carrucola mobile e un dinamometro?

PER APPROFONDIRE

- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: il capitolo sul lavoro e sull'energia potenziale, con un celebre ragionamento sulle macchine che sollevano pesi.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli sul lavoro e sulla potenza, con molti esercizi sul lavoro come area.
- [RUS] L. Russo, *La rivoluzione dimenticata*: la meccanica ellenistica e le sue macchine.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: come i concetti della meccanica preparano l'idea di energia.

Glossario del capitolo

Cavallo vapore
Unità di potenza non appartenente al SI, ancora usata per i motori: 1 CV ≈ 735,5 W.

Chilowattora
Unità pratica di lavoro e di energia: il lavoro compiuto in un'ora con la potenza di 1 kW; 1 kWh = 3,6 × 10^6 J.

Forza conservativa
Forza il cui lavoro fra due punti non dipende dal percorso seguito ma solo dai punti di partenza e di arrivo; il suo lavoro lungo un percorso chiuso è zero. Esempi: il peso, la forza elastica.

Forza dissipativa
Forza non conservativa il cui lavoro sul corpo in moto è sempre negativo, come l'attrito dinamico.

Forza non conservativa
Forza il cui lavoro fra due punti dipende dal percorso seguito, come l'attrito radente e la resistenza dell'aria.

Joule
Unità di misura del lavoro nel SI: il lavoro di una forza di 1 N che sposta il suo punto di applicazione di 1 m nella propria direzione e nel proprio verso; 1 J = 1 N·m.

Lavoro
Grandezza scalare data, per una forza costante, dal prodotto della componente della forza lungo lo spostamento per il modulo dello spostamento: $W = F_{\parallel}\, s$. Si misura in joule.

Lavoro motore
Lavoro positivo, compiuto da una forza che ha una componente nel verso dello spostamento.

Lavoro resistente
Lavoro negativo, compiuto da una forza che ha una componente nel verso opposto allo spostamento, come l'attrito dinamico.

Lavoro totale
Somma algebrica dei lavori di tutte le forze che agiscono su un corpo; è uguale al lavoro della forza risultante.

Lavoro utile
La parte del lavoro compiuto da una macchina che serve allo scopo per cui la macchina è usata.

Potenza
Rapporto fra il lavoro compiuto e l'intervallo di tempo impiegato a compierlo: $P = W/\Delta t$; si misura in watt.

Potenza media
Rapporto fra il lavoro compiuto in un intervallo di tempo e la durata dell'intervallo, quando il ritmo con cui si compie il lavoro non è costante.

Regola d'oro della meccanica
Principio per cui una macchina ideale non riduce il lavoro: ciò che si guadagna in forza si perde in spostamento.

Rendimento
Rapporto fra il lavoro utile compiuto da una macchina e il lavoro (o l'energia) che le viene fornito; numero puro sempre minore di 1, spesso espresso in percentuale.

Watt
Unità di misura della potenza nel SI: 1 W = 1 J/s.

Soluzioni

1. C. 1 J = 1 N · 1 m. La D è il newton.

2. A. Se la forza è perpendicolare allo spostamento, la sua componente lungo lo spostamento è nulla.

3. D. Lo zaino non si sposta: il lavoro è zero, anche se ti stanchi. La A non è neppure un lavoro (le unità sono N·s).

4. B. Il lavoro del peso dipende solo dal dislivello: mg · 2,0 m in entrambi i casi.

5. B. 1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J: è potenza per tempo, quindi un lavoro.

6. C. L'area (con le unità N · m = J) è il lavoro; la pendenza, per una molla, è la costante elastica.

7. A. È la definizione di forza conservativa.

8. D. Forza = $mg \cdot h/l = mg/4$, ma la strada è quattro volte più lunga: il lavoro resta mgh (regola d'oro).

9. F. Il lavoro è uno scalare: ha un segno ma non direzione né verso.

10. V. L'attrito dinamico è sempre opposto allo spostamento della cassa rispetto al pavimento.

11. V. La forza centripeta è sempre perpendicolare alla velocità, cioè allo spostamento in ogni piccolo tratto.

12. F. Il lavoro è potenza per tempo: un motore da 1 kW acceso per un'ora compie più lavoro di uno da 2 kW acceso per un minuto.

13. F. L'attrito compie lavoro negativo sia all'andata sia al ritorno: il lavoro totale è negativo, non nullo. L'attrito non è conservativo.

14. $W = F\,s$ = 35 N · 12 m = 420 J = $4{,}2 \times 10^2$ J.

15. $3{,}6 \times 10^6$ J; 2500 W; 735,5 W; m (1 J = 1 N·m).

16. Con l'angolo di 60° fra forza e spostamento, la componente lungo lo spostamento è il cateto opposto all'angolo di 30°, metà dell'ipotenusa: $F_{\parallel}$ = 80 N / 2 = 40 N. W = 40 N · 50 m = $2{,}0 \times 10^3$ J.

17. Gru: $W = mgh$ = 450 kg · 9,8 m/s^2 · 12 m ≈ $5{,}3 \times 10^4$ J. Peso: $-5{,}3 \times 10^4$ J (opposto allo spostamento).

18. a) W = ½ · 350 N/m · (0,080 m)^2 = 1,12 J ≈ 1,1 J. b) W = ½ · 350 N/m · [(0,160 m)^2 − (0,080 m)^2] = 3,36 J ≈ 3,4 J, il triplo. Nel secondo tratto la forza è maggiore (da 28 N a 56 N, invece che da 0 a 28 N): nel grafico l'area del trapezio è tre volte quella del triangolo.

19. Somma dei due trapezi fra 4,0 e 8,0 cm: (4,4 + 5,8)/2 N · 0,020 m + (5,8 + 7,0)/2 N · 0,020 m = 0,102 J + 0,128 J = 0,23 J.

20. 1800 W = 1,8 kW; 10 min = 1/6 h. Energia = 1,8 kW · (1/6) h = 0,30 kWh = 0,30 · $3{,}6 \times 10^6$ J ≈ $1{,}1 \times 10^6$ J (oppure 1800 W · 600 s = $1{,}08 \times 10^6$ J).

21. Sulla cassa agiscono il peso, la forza normale, la forza di trascinamento e l'attrito. a) A velocità costante la risultante è nulla (primo principio): la forza è uguale all'attrito, $F = \mu_d\, mg$ = 0,35 · 40 kg · 9,8 m/s^2 ≈ 137 N ≈ $1{,}4 \times 10^2$ N. b) W_{forza} = 137,2 N · 6,0 m ≈ $8{,}2 \times 10^2$ J; $W_{\text{attr}} \approx -8{,}2 \times 10^2$ J; peso e forza normale: 0 (perpendicolari allo spostamento). c) W_{tot} = 0: la risultante è nulla, quindi il suo lavoro è zero.

22. h = 4 · 3,2 m = 12,8 m; $W = mgh$ = 55 kg · 9,8 m/s^2 · 12,8 m ≈ $6{,}9 \times 10^3$ J. Δt = 70 s; P = 6899 J / 70 s ≈ 99 W.

23. Sul carrello agiscono il peso (mg = 25 kg · 9,8 m/s^2 = 245 N), la forza normale, la spinta e (in b) l'attrito. a) $F = mg \cdot h/l$ = 245 N · 1,2/4,8 ≈ 61 N; W = 61,25 N · 4,8 m = 294 J ≈ $2{,}9 \times 10^2$ J, uguale a mgh = 245 N · 1,2 m = 294 J. b) $b = \sqrt{(4{,}8^2 - 1{,}2^2)}$ m = √21,6 m ≈ 4,65 m; forza premente $mg \cdot b/l$ = 245 N · 4,65/4,8 ≈ 237 N; attrito 0,20 · 237 N ≈ 47,4 N. Spinta: 61,25 N + 47,4 N ≈ $1{,}1 \times 10^2$ N; lavoro: 108,7 N · 4,8 m ≈ $5{,}2 \times 10^2$ J. c) η = 294 J / 522 J ≈ 0,56, cioè 56%.

24. Sulla cabina agiscono il peso e la tensione del cavo. a) A velocità costante la risultante è nulla: $F = mg$ = 900 kg · 9,8 m/s^2 = $8{,}82 \times 10^3$ N. b) $P = Fv$ = 8820 N · 1,2 m/s ≈ $1{,}06 \times 10^4$ W ≈ 11 kW. c) $P_{\text{assorbita}} = P_{\text{utile}}/\eta$ = 10 584 W / 0,70 ≈ $1{,}5 \times 10^4$ W = 15 kW; 15 120 W / 735,5 W ≈ 21 CV. d) Δt = 30 m / 1,2 m/s = 25 s; energia

= 15 120 W · 25 s ≈ $3{,}8 \times 10^5$ J = $3{,}78 \times 10^5$ / $3{,}6 \times 10^6$ kWh ≈ 0,11 kWh.

25. a) v = 90 km/h = 25 m/s; a velocità costante la forza motrice è uguale alla resistenza, 600 N. $P = Fv$ = 600 N · 25 m/s = $1{,}5 \times 10^4$ W = 15 kW; 15 000 W / 735,5 W ≈ 20 CV. b) v = 50 m/s, F = 2400 N: P = 2400 N · 50 m/s = $1{,}2 \times 10^5$ W = 120 kW, otto volte di più (doppia velocità, forza quadrupla). Per questo i consumi crescono molto alle alte velocità.

26. a) Sul sacco agiscono il peso (mg = 588 N) e le due tensioni dei tratti di fune. Forza: 588 N / 2 = 294 N ≈ $2{,}9 \times 10^2$ N; la fune va tirata di 2 · 2,0 m = 4,0 m; W = 294 N · 4,0 m ≈ $1{,}2 \times 10^3$ J, uguale a mgh = 588 N · 2,0 m = 1176 J. b) $W_{\text{fornito}} = W_{\text{utile}}/\eta$ = 1176 J / 0,80 = 1470 J ≈ $1{,}5 \times 10^3$ J; la fune va tirata sempre di 4,0 m, quindi F = 1470 J / 4,0 m ≈ $3{,}7 \times 10^2$ N.

27. Traccia di risposta. La forza che esercita la mano è verticale (uguale al peso della valigia, che è in equilibrio), lo spostamento è orizzontale: la componente della forza lungo lo spostamento è nulla, quindi anche il lavoro. La fatica nasce dentro il corpo: i muscoli contratti consumano le riserve dell'organismo anche quando non compiono lavoro su un corpo esterno; un carrello con le ruote, ideale, porterebbe la valigia senza alcun consumo.

28. Traccia di risposta. Per esempio: massa con lo zaino 68 kg; tre piani da 3,5 m, h ≈ 10,5 m; tempo ≈ 30 s. $W = mgh$ ≈ 68 · 9,8 · 10,5 J ≈ 7×10^3 J; P ≈ 7×10^3 J / 30 s ≈ 2×10^2 W. In kWh: 7×10^3 / $3{,}6 \times 10^6$ ≈ 2×10^{-3} kWh, circa quanto consuma una lampada a LED da 10 W accesa per una dozzina di minuti. Il lavoro contro il peso è piccolo; i muscoli ne consumano di più, perché il loro rendimento è ben inferiore al 100%. Sono accettabili valori dello stesso ordine di grandezza.

29. Il lavoro del peso non si calcola sulla strada percorsa ma sul dislivello: in salita vale −1,0 kg · 9,8 m/s^2 · 2,0 m ≈ −20 J, in discesa +20 J. Lungo il percorso chiuso il lavoro del peso è zero, perché il peso è una forza conservativa. Errori nel testo: il segno (il lavoro in salita è negativo) e l'uso della distanza percorsa.

30. Traccia di risposta. Galileo afferma che con una forza piccola si può spostare un grande peso anche senza macchine, portandolo un pezzo alla volta: la forza deve fare tanti viaggi, cioè percorrere un cammino tanto più lungo quanto più il peso la supera. Una macchina non fa nulla di più: permette di spostare il peso tutto insieme, ma la forza piccola percorre comunque un cammino più lungo, nello stesso rapporto. È la regola d'oro: forza per spostamento resta uguale, in termini moderni il lavoro non cambia. Verifica: si solleva un carico con una carrucola mobile, si misurano con il dinamometro la forza (circa metà del peso) e con un righello lo spostamento della fune (doppio di quello del carico); si confrontano Fs e mgh, entro le incertezze, e si osserva che con una carrucola reale il primo prodotto è un po' maggiore a causa degli attriti.