CAPITOLO

8

Il lavoro e la potenza

Una macchina può ridurre la forza che serve, mai il lavoro che bisogna fare.

OBIETTIVI

1. Distinguere il lavoro in senso fisico dalla fatica, e calcolare il lavoro di una forza costante con $W = F\,s\cos\alpha$.
2. Riconoscere quando il lavoro è positivo, negativo o nullo, e calcolare il lavoro totale di più forze.
3. Calcolare il lavoro del peso e dell'attrito, spiegando perché il primo non dipende dal percorso e il secondo sì.
4. Calcolare il lavoro di una forza variabile come area sotto il grafico forza–spostamento, in particolare per una molla.
5. Spiegare perché le macchine semplici non fanno risparmiare lavoro.
6. Calcolare potenza e rendimento, usare il watt, il kilowattora e il cavallo vapore, e misurare in laboratorio la propria potenza.

INDICE DEL CAPITOLO

8.1 Il lavoro di una forza 2
8.2 Il lavoro del peso e il lavoro dell'attrito 6
8.3 Il lavoro di una forza variabile 7
8.4 Le macchine semplici e il lavoro 10
8.5 La potenza 11

Fisica 2 · Parte III · Lavoro ed energia · versione 1.0
Capitolo 8: Il lavoro e la potenza · pagine 199–220 del volume completo · estratto per lo studio

Dopo un'ora passata a reggere uno zaino pesante in piedi sull'autobus sei stanco; un carrello elevatore solleva in pochi secondi un bancale di mattoni e nessuno direbbe che «fa fatica». Eppure, per la fisica, il carrello compie un lavoro e tu, che tieni fermo lo zaino, no. Nel linguaggio di tutti i giorni lavoro e fatica si confondono; in fisica il *lavoro* è una grandezza precisa, che si calcola con una formula e si misura in un'unità sua.

Con questo capitolo comincia la terza parte del libro. Finora hai descritto il moto con le forze e con il secondo principio, istante per istante. Ora introduciamo un modo diverso di guardare gli stessi fenomeni: chiederci che cosa fa una forza **lungo uno spostamento**. Ne nasce il lavoro, che porterà nei prossimi due capitoli al concetto di energia. Vedremo come si calcola il lavoro di una forza costante e di una forza variabile, perché il lavoro del peso non dipende dal percorso e quello dell'attrito sì, che cosa le macchine semplici possono fare e che cosa non possono fare; infine la *potenza*, che dice quanto rapidamente si compie un lavoro.

8.1 Il lavoro di una forza

8.1.1 Fatica e lavoro

Una forza compie lavoro quando il corpo su cui agisce **si sposta**, e lo spostamento ha una componente nella direzione della forza. Il carrello elevatore spinge il bancale verso l'alto e il bancale sale: lavoro. Tu spingi lo zaino verso l'alto, ma lo zaino non si sposta: nessun lavoro sullo zaino, per quanto tu possa essere stanco. La stanchezza ha un'altra origine, che riguarda i muscoli e non lo zaino: lo vedremo fra poco.

8.1.2 La definizione

Cominciamo dal caso più semplice: una forza costante $\boldsymbol{F}$ che agisce su un corpo nella stessa direzione e nello stesso verso del suo spostamento. Indichiamo con s il modulo dello spostamento (il Δs di *Fisica 1*; qui, per brevità, scriviamo soltanto s). Il **lavoro** W della forza è il prodotto del modulo della forza per il modulo dello spostamento:

$$W = Fs \qquad \text{(forza parallela allo spostamento)}$$

Il lavoro raddoppia se raddoppia la forza oppure lo spostamento: spingere un'auto in panne per 20 m costa il doppio che spingerla per 10 m. L'unità di misura del lavoro nel SI è il newton per metro, che prende il nome di **joule** (simbolo J), in onore del fisico inglese James Prescott Joule, che incontrerai nel capitolo 12: **1 J è il lavoro compiuto da una forza di 1 N il cui punto di applicazione si sposta di 1 m nella direzione della forza**. In unità fondamentali, 1 J = 1 N·m = 1

kg·m^2/s^2. Un joule è poco: è circa il lavoro necessario per sollevare di un metro una mela di 100 g.

Se la forza è inclinata rispetto allo spostamento, come la fune con cui si trascina una cassa nella Figura 8.1, solo una parte della forza agisce lungo lo spostamento. Scomponiamo $\boldsymbol{F}$ in due componenti, come in *Fisica 1*, capitolo 6: $F_{//}$, parallela allo spostamento, e $F_{\perp}$, perpendicolare. La componente perpendicolare solleva un po' la cassa senza farla avanzare: non contribuisce al lavoro. Il lavoro è dato dalla sola componente parallela:

$$W = F_{//}s = Fs\cos\alpha$$

dove α è l'angolo fra la forza e lo spostamento. Il fattore cos α ha un significato semplice: dice **quale frazione della forza agisce lungo lo spostamento**. Se α = 0° la forza è tutta «utile», cos 0° = 1 e $W = Fs$; se α = 60°, cos 60° = 0,5 e lavora soltanto metà della forza. Il lavoro è un prodotto di moduli e di un numero: è una **grandezza scalare**, senza direzione né verso, ma, come vedremo subito, con un segno.

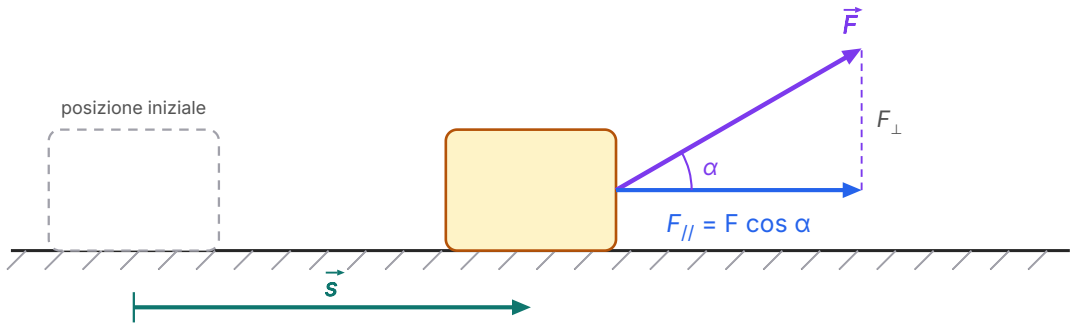


Figura 8.1 Una cassa trascinata da una forza costante $\boldsymbol{F}$ inclinata di un angolo α rispetto allo spostamento $\boldsymbol{s}$. Lavora soltanto la componente $F_{//} = F\cos\alpha$, parallela allo spostamento: $W = Fs\cos\alpha$. La componente perpendicolare $F_{\perp}$ non compie lavoro.

DA RICORDARE

Lavoro di una forza costante. Il lavoro compiuto da una forza costante $\boldsymbol{F}$ su un corpo che compie uno spostamento $\boldsymbol{s}$ è il prodotto della componente della forza lungo lo spostamento per il modulo dello spostamento:

$$W = Fs\cos\alpha \qquad (\mathrm{J} = \mathrm{N\cdot m})$$

α è l'angolo fra la forza e lo spostamento. Il lavoro è una grandezza scalare.

8.1.3 Lavoro positivo, negativo, nullo

Il segno del lavoro dice se la forza aiuta o contrasta il moto (Figura 8.2). Quando la componente $F_{//}$ ha lo stesso verso dello spostamento il lavoro è positivo: si parla di **lavoro motore**, ed è quello delle forze che in *Fisica 1* hai chiamato forze motrici. Quando la componente ha verso opposto allo spostamento il lavoro è negativo, un **lavoro resistente**: è il caso dell'attrito dinamico su un corpo che scivola, o delle mani che frenano la discesa di una cassa calata con una fune. Per $\alpha = 180°$, forza e spostamento hanno la stessa direzione e verso opposto, e $W = -Fs$.

La formula $W = Fs \cos\alpha$ vale per ogni angolo fra 0° e 180°, a patto di leggere cos α come lo dà la calcolatrice: cos 90° = 0, e fra 90° e 180° il coseno è **negativo**, fino a cos 180° = −1. In matematica vedrai come il coseno si estende oltre il triangolo rettangolo; qui ci basta il significato fisico: il segno del coseno è il segno della componente della forza lungo lo spostamento.

Infine, una forza **perpendicolare** allo spostamento non compie lavoro, per quanto sia intensa: cos 90° = 0. Non lavora la reazione normale del pavimento su una cassa che scivola; non lavora il peso di una valigia portata in orizzontale; non lavora la forza centripeta nel moto circolare uniforme, che è sempre perpendicolare alla velocità (capitolo 3) e infatti cambia la direzione della velocità ma non il suo modulo.

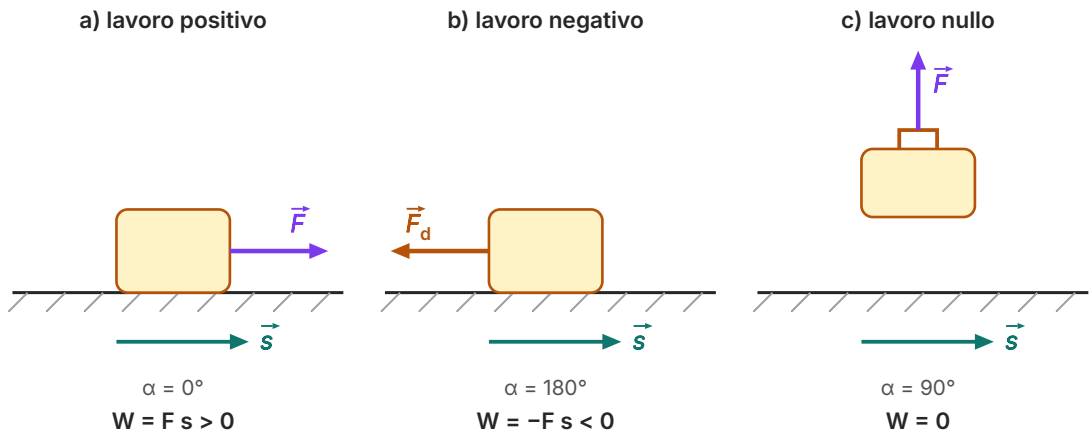


Figura 8.2 Il segno del lavoro. a) La forza ha il verso dello spostamento: lavoro motore, positivo. b) L'attrito dinamico ha verso opposto allo spostamento: lavoro resistente, negativo. c) La forza della mano che regge la valigia è perpendicolare allo spostamento orizzontale: lavoro nullo.

8.1.4 Il lavoro di più forze

Su un corpo agiscono in genere più forze, e ciascuna compie il suo lavoro. Il **lavoro totale** è la somma algebrica dei lavori delle singole forze, con i loro segni; si dimostra che è uguale al lavoro della forza risultante $\boldsymbol{R}$ lungo lo stesso spostamento:

$$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2 + \ldots = Rs\cos\alpha_R$$

I due modi di calcolare danno lo stesso risultato perché la componente della risultante lungo lo spostamento è la somma delle componenti delle singole forze. L'esempio che segue li mette a confronto.

ESEMPIO SVOLTO

I lavori sulla cassa trascinata

Problema. Una cassa di 20 kg viene trascinata per 12 m su un pavimento orizzontale con una fune che forma un angolo di 30° con l'orizzontale e tira con una forza di 80 N. Il coefficiente di attrito dinamico è 0,25. Calcola il lavoro di ciascuna forza e il lavoro totale, e verifica che coincide con il lavoro della risultante.

Soluzione. Sulla cassa agiscono quattro forze: il peso mg = 20 kg × 9,8 N/kg = 196 N verso il basso, la reazione normale $\boldsymbol{N}$ verso l'alto, la forza $\boldsymbol{F}$ della fune e l'attrito dinamico $\boldsymbol{F}_{\text{d}}$ all'indietro. Componenti della forza della fune: $F_{//}$ = 80 N × cos 30° ≈ 69,3 N in orizzontale e 80 N × sen 30° = 40,0 N in verticale. Lungo la verticale la cassa non accelera: N = 196 N − 40,0 N = 156 N, e quindi $F_{\text{d}} = \mu_{\text{d}} N$ = 0,25 × 156 N = 39 N.

Lavori: fune, W_{F} = 80 N × 12 m × cos 30° ≈ 831 J; attrito (α = 180°), W_{d} = −39 N × 12 m = −468 J; peso e reazione normale, perpendicolari allo spostamento, 0 J. Totale: W_{tot} = 831 J − 468 J ≈ 363 J ≈ 3,6 × 10^2 J.

Con la risultante: lungo la verticale le forze si equilibrano, in orizzontale R = 69,3 N − 39 N = 30,3 N, nel verso del moto; $R\,s$ = 30,3 N × 12 m ≈ 363 J.

Controllo. N·m = J. Il lavoro totale è positivo perché la risultante è nel verso del moto: la cassa accelera (a = 30,3 N/20 kg ≈ 1,5 m/s^2). Nel prossimo capitolo scoprirai che il lavoro totale misura esattamente quanto cambia la «velocità» della cassa, in un senso che renderemo preciso.

ERRORE FREQUENTE

«Se faccio fatica, compio lavoro»: **non è detto**. Chi regge fermo uno zaino non compie lavoro sullo zaino (s = 0); chi lo porta camminando in piano a velocità costante esercita una forza verticale mentre lo zaino si sposta in orizzontale, e anche in questo caso il lavoro della sua forza sullo zaino è nullo. La fatica nasce dentro il corpo: per mantenere un muscolo contratto le sue fibre devono essere stimolate di continuo, e consumano energia anche quando il carico resta fermo. Un tavolo regge lo stesso zaino per ore senza consumare nulla.

Attenzione anche alla parola «negativo»: un lavoro di −500 J non è «un lavoro piccolo», ma un lavoro di 500 J compiuto da una forza che si oppone al moto.

8.2 Il lavoro del peso e il lavoro dell'attrito

8.2.1 Il peso: conta solo il dislivello

Un corpo di massa m scende in verticale di un'altezza h. Il peso mg è costante, diretto verso il basso come lo spostamento: il suo lavoro è $mg \cdot h$, positivo. Se il corpo sale di h, il peso è opposto allo spostamento e il lavoro vale $-mgh$.

Che cosa succede se il corpo scende lungo una rampa liscia di lunghezza l e altezza h? Lo spostamento è più lungo, ma il peso forma con esso un angolo: lavora soltanto la componente del peso parallela alla rampa, che in *Fisica 1*, capitolo 9, hai calcolato con i triangoli simili, $mg \cdot h/l$. Il lavoro è $(mg\,h/l) \cdot l = mgh$: **lo stesso della discesa in verticale**. La rampa più lunga è compensata esattamente dalla componente più piccola.

E lungo una scala (Figura 8.3)? Sui tratti orizzontali il peso è perpendicolare allo spostamento e non lavora; sui tratti verticali il lavoro è mg per il dislivello del gradino. Sommando i gradini si ottiene di nuovo mg per il dislivello totale. Ogni percorso, anche curvo, si può approssimare con una scaletta di gradini piccolissimi, e il ragionamento vale ancora. In conclusione, vicino alla superficie terrestre, dove il peso è costante:

$$W_{\text{peso}} = mg\,(h_{\text{iniziale}} - h_{\text{finale}}) \qquad \text{(indipendente dal percorso)}$$

Il **lavoro della forza-peso** dipende soltanto dalla quota iniziale e da quella finale, misurate da un livello qualsiasi: è positivo se il corpo scende, negativo se sale, nullo se torna alla quota di partenza, qualunque giro abbia fatto. Un escursionista di 65 kg che sale da un rifugio a 1200 m a una cima a 1650 m subisce dal peso un lavoro di $-65\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \times 450\ \text{m} \approx -2{,}9 \times 10^5\ \text{J}$, sia che segua il sentiero lungo e dolce, sia che prenda la ferrata ripida, sia che salga in funivia.

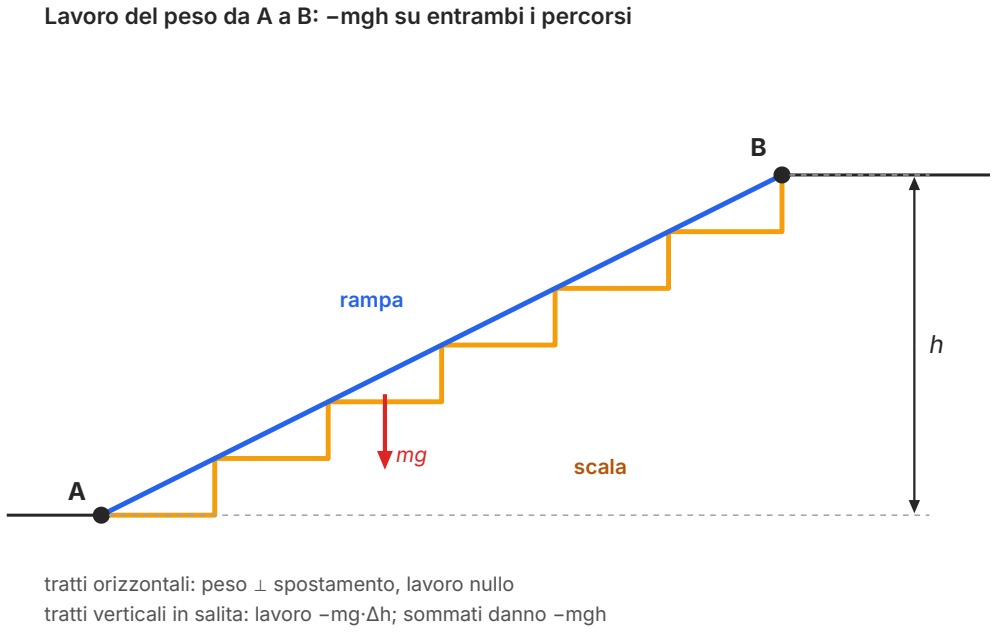


Figura 8.3 Da A a B lungo la rampa o lungo la scala: il dislivello h è lo stesso e lo è anche il lavoro del peso, $-mgh$ in salita. Sui tratti orizzontali della scala il peso è perpendicolare allo spostamento e non compie lavoro.

8.2.2 L'attrito: conta tutto il percorso

L'attrito dinamico si comporta in modo opposto. Su un corpo che striscia ha sempre verso opposto alla velocità, cioè allo spostamento di ogni piccolo tratto: il suo lavoro è sempre negativo. Se il modulo F_d è costante, su un percorso di lunghezza d il **lavoro dell'attrito** vale

$$W_{\text{attrito}} = -F_d d$$

dove d è la lunghezza del cammino percorso, non la distanza in linea retta fra partenza e arrivo. Trascinare una cassa da un angolo all'altro di una stanza lungo il muro costa più lavoro contro l'attrito che trascinarla lungo la diagonale; e se la riporti al punto di partenza il lavoro dell'attrito non si annulla, ma raddoppia. Il lavoro del peso su un percorso chiuso è zero, quello dell'attrito no. Questa differenza è così importante che nel prossimo capitolo divideremo le forze in due famiglie proprio in base a essa.

8.3 Il lavoro di una forza variabile

Finora la forza era costante. Molte forze, però, cambiano mentre il corpo si sposta: la spinta di una molla, la trazione di un elastico, la forza di un motore che accelera. Per loro il prodotto

«forza per spostamento» non basta più.

8.3.1 Il lavoro come area

Disegniamo il grafico della componente della forza lungo lo spostamento in funzione della posizione s. Per una forza costante il grafico è un segmento orizzontale e il lavoro Fs è l'**area del rettangolo** compreso fra il grafico e l'asse delle posizioni (Figura 8.4a). Hai già incontrato un'idea simile in *Fisica 1*, capitolo 15: nel grafico velocità-tempo lo spostamento è l'area sotto la curva.

L'interpretazione come area permette di trattare anche le forze che cambiano durante lo spostamento. Basta dividere il percorso in tratti così brevi che in ciascuno la forza sia praticamente costante: il lavoro di ogni tratto è l'area di un rettangolino stretto, e il lavoro totale è la somma di tutti i rettangolini, cioè l'area sotto il grafico: è il **lavoro di una forza variabile**. Se il grafico è fatto di segmenti, l'area si calcola con rettangoli, triangoli e trapezi; se è curvo, si stima contando i quadretti della carta millimetrata.

lavoro di una forza variabile = area sotto il grafico forza–spostamento

8.3.2 Il lavoro per deformare una molla

L'esempio più importante è la molla. Indichiamo con x la sua deformazione, cioè l'allungamento o la compressione rispetto alla lunghezza a riposo (in *Fisica 1*, capitolo 7, l'avevi chiamata Δx). Per la legge di Hooke, per tenere la molla deformata di x serve una forza $F = kx$, che cresce in proporzione alla deformazione. Se deformiamo la molla lentamente, partendo dalla lunghezza a riposo, la nostra forza passa da zero a kx: il grafico è una retta per l'origine e l'area sotto di essa è un triangolo di base x e altezza kx (Figura 8.4b). Il **lavoro per deformare una molla** di x è dunque

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

Il lavoro cresce con il **quadrato** della deformazione: per allungare la molla del doppio serve un lavoro quadruplo. Durante l'allungamento la *forza elastica* della molla, uguale e opposta alla nostra, ha verso opposto allo spostamento: il suo lavoro è $-\tfrac{1}{2}kx^2$. Quando la molla torna alla lunghezza a riposo, la forza elastica e lo spostamento hanno lo stesso verso, e il suo lavoro è $+\tfrac{1}{2}kx^2$: è il lavoro che una molla compressa compie spingendo una pallina in una pistola giocattolo.

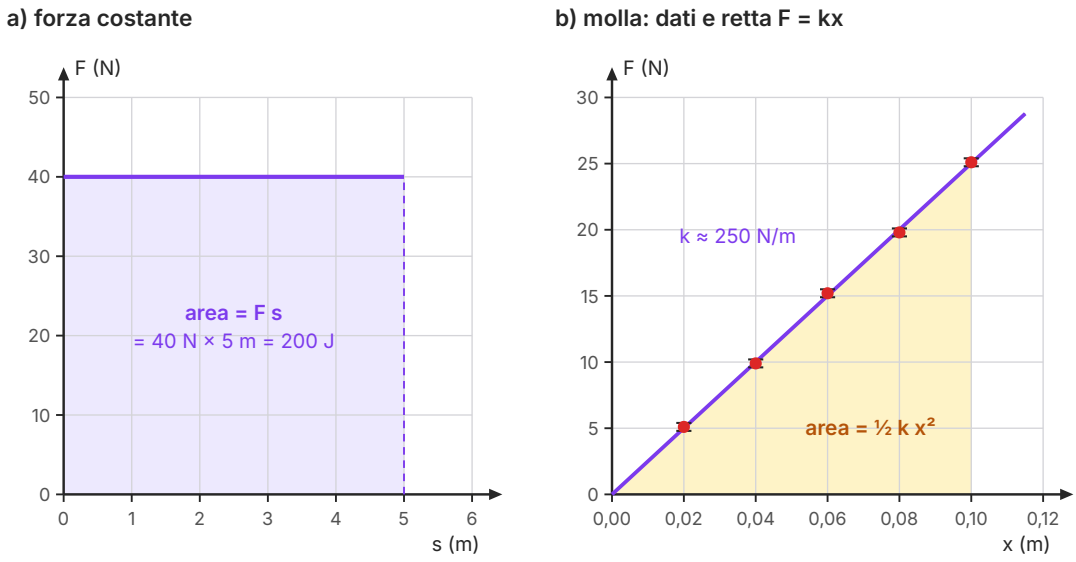


Figura 8.4 Il lavoro come area sotto il grafico forza–spostamento. a) Forza costante di 40 N lungo 5 m: l'area del rettangolo è 200 J. b) Forza necessaria per allungare una molla, misurata con un dinamometro (punti con barre d'incertezza, dati tipici) e retta $F = kx$; l'area del triangolo è il lavoro $\tfrac{1}{2}kx^2$.

ESEMPIO SVOLTO

Il lavoro letto su un grafico

Problema. I punti della Figura 8.4b sono stati ottenuti allungando una molla con un dinamometro (incertezza 0,3 N) e misurando l'allungamento con un righello. a) Ricava la costante elastica dalla pendenza della retta. b) Calcola il lavoro per allungare la molla da 0 a 0,10 m. c) Quanto lavoro serve per i primi 5 cm e quanto per i 5 cm successivi?

Soluzione. a) La retta passa per l'origine e, per $x = 0{,}10$ m, per $F \approx 25{,}0$ N: $k = 25{,}0\ \text{N} / 0{,}10\ \text{m} \approx 250$ N/m. b) L'area del triangolo fino a 0,10 m: $W = \tfrac{1}{2} \times 250\ \text{N/m} \times (0{,}10\ \text{m})^2 \approx 1{,}3$ J (1,25 J). c) Fino a 0,05 m: $W = \tfrac{1}{2} \times 250 \times (0{,}05)^2$ J $\approx 0{,}31$ J; da 0,05 m a 0,10 m: 1,25 J − 0,31 J ≈ 0,94 J.

Controllo. $(\text{N/m}) \cdot \text{m}^2 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$. Sommando direttamente le aree dei trapezi fra un punto misurato e il successivo si ottiene di nuovo 1,25 J, segno che la retta descrive bene i dati. Il secondo tratto di 5 cm costa il triplo del primo: è l'effetto del quadrato. Non avremmo potuto calcolare il lavoro come «forza per spostamento», perché la forza non è costante: usando la forza finale (25 N × 0,10 m = 2,5 J) avremmo ottenuto il doppio del valore corretto.

8.4 Le macchine semplici e il lavoro

In *Fisica 1*, capitolo 11, hai osservato che una macchina semplice permette di usare una forza più piccola, ma lungo un percorso più lungo. Con il lavoro questa osservazione diventa una legge precisa.

Una cassa di 50 kg va portata, a velocità costante, su un rialzo alto 1,2 m (Figura 8.5). Sollevandola in verticale serve una forza uguale al peso, 50 kg × 9,8 N/kg = 490 N, per 1,2 m: il lavoro è 490 N × 1,2 m = 588 J. Spingendola lungo una rampa liscia lunga 4,8 m basta una forza uguale alla componente del peso lungo la rampa, 490 N × 1,2/4,8 = 122,5 N, ma per 4,8 m: il lavoro è 122,5 N × 4,8 m = 588 J. **La forza è diventata quattro volte più piccola, lo spostamento quattro volte più lungo, il lavoro è lo stesso**: è sempre il lavoro necessario per vincere il peso lungo il dislivello, mgh.

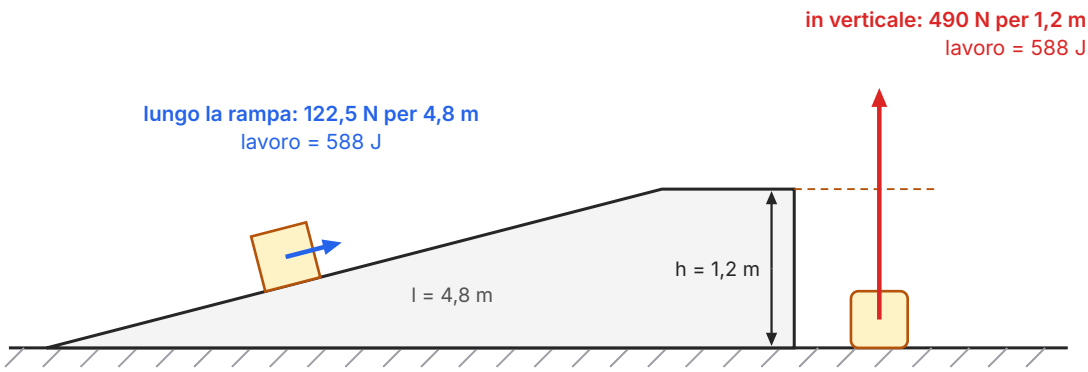


Figura 8.5 Il piano inclinato come macchina semplice: per portare a velocità costante una cassa di 50 kg su un rialzo di 1,2 m, lungo una rampa liscia di 4,8 m basta una forza quattro volte minore del peso, ma il lavoro è lo stesso, 588 J. Le frecce delle forze sono in scala.

Lo stesso vale per la leva. Quando una leva ruota attorno al fulcro, i suoi due estremi descrivono archi proporzionali alla loro distanza dal fulcro, cioè ai bracci: se il braccio della forza motrice è tre volte quello della forza resistente, la mano si sposta tre volte di più del carico. La condizione di equilibrio della leva rende la forza motrice tre volte più piccola; il prodotto forza × spostamento è lo stesso ai due estremi. Anche la carrucola mobile, che dimezza la forza, richiede di tirare il doppio della fune.

È la **regola d'oro delle macchine semplici**: in una macchina ideale, senza attriti e di massa trascurabile, il lavoro della forza motrice è uguale al lavoro compiuto contro la forza resistente. **Le macchine semplici non fanno risparmiare lavoro**: scambiano forza con spostamento, o

spostamento con forza, come l'avambraccio, che rinuncia alla forza per guadagnare ampiezza di movimento. Nelle macchine reali gli attriti aggiungono un lavoro resistente, e la forza motrice deve compiere **più** lavoro di quello utile: misureremo questo spreco con il rendimento, alla fine del capitolo.

8.5 La potenza

8.5.1 Lavoro in fretta e lavoro con calma

Salire tre piani di scale a passo lento o di corsa richiede lo stesso lavoro contro il peso: mgh non contiene il tempo. Eppure correndo ci si affanna di più, e un ascensore che sale in 10 s è «più potente» di uno che impiega 40 s per lo stesso carico. Per descrivere la *rapidità* con cui si compie un lavoro si definisce la **potenza**, il rapporto fra il lavoro e l'intervallo di tempo impiegato a compierlo:

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

Se il lavoro non è compiuto in modo uniforme, questo rapporto è la **potenza media** nell'intervallo Δt. Nel SI la potenza si misura in joule al secondo, unità che si chiama **watt** (W): **1 W = 1 J/s**, la potenza di chi compie un lavoro di 1 J in ogni secondo. Si usano spesso i multipli: kilowatt (1 kW = 10^3 W) e megawatt (1 MW = 10^6 W). Non confondere il simbolo W del watt, in carattere tondo, con il simbolo W del lavoro, in corsivo.

C'è un secondo modo, molto utile, di calcolare la potenza. Se una forza costante F spinge un corpo che si muove a velocità costante v nella direzione della forza, in un tempo Δt il corpo percorre $s = v\Delta t$ e il lavoro è $Fv\Delta t$. Dividendo per Δt:

$$P = Fv \qquad \text{(forza parallela alla velocità)}$$

Un'auto che viaggia a velocità costante su strada orizzontale deve vincere con la forza motrice le resistenze (dell'aria e di rotolamento): la potenza che le serve è il prodotto della forza resistente per la velocità. E poiché la resistenza dell'aria cresce rapidamente con la velocità, la potenza richiesta cresce ancora più rapidamente.

ESEMPIO SVOLTO

La potenza di un ciclista

Problema. Un ciclista pedala in piano a 36 km/h costanti; le forze resistenti, in gran parte dovute all'aria, hanno una risultante di 25 N. a) Quale potenza sviluppa? b) Quanto lavoro compie in un'ora? Esprimilo in joule e in kilowattora.

Soluzione. Sulla bicicletta con il ciclista agiscono il peso e la reazione della strada, che si equilibrano, la forza motrice (la spinta in avanti della strada sulla ruota posteriore) e le resistenze, all'indietro. La velocità è costante, quindi per il primo principio la risultante è nulla: la forza motrice vale 25 N. a) $v = 36$ km/h $= 10$ m/s; $P = Fv = 25\ \text{N} \times 10\ \text{m/s} = 250$ W. b) $W = P\Delta t = 250\ \text{W} \times 3600\ \text{s} = 9{,}0 \times 10^5$ J. In kilowattora: $0{,}250\ \text{kW} \times 1\ \text{h} = 0{,}25$ kWh.

Controllo. N·m/s = J/s = W. Un ciclista allenato può sostenere potenze di questo ordine di grandezza per ore: il valore trovato è plausibile. Che una persona in un'ora di pedalata produca un lavoro pari a un quarto di kilowattora fa capire quanta energia scorra ogni giorno nelle prese di casa.

8.5.2 Il kilowattora e il cavallo vapore

Rovesciando la definizione di potenza, il lavoro è $W = P\Delta t$. Se si misura la potenza in kilowatt e il tempo in ore si ottiene un'unità di lavoro, e più in generale di energia, molto usata: il **kilowattora** (kWh), il lavoro compiuto in un'ora con la potenza di 1 kW:

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

Il kilowattora non è un'unità di potenza, nonostante la parola «watt» che contiene: è un'unità di lavoro e di energia. Per le automobili si usa ancora un'unità di potenza non appartenente al SI, il **cavallo vapore** (CV): 1 CV ≈ 735,5 W. Un motore da 100 CV ha una potenza massima di circa 74 kW; nei documenti dei veicoli la potenza è indicata in kilowatt.

ERRORE FREQUENTE

«Il forno consuma 2 kW all'ora»: **sbagliato**. Il kilowatt è una potenza, cioè già un «quanto in ogni secondo»; non ha senso dividerlo ancora per il tempo. La frase corretta è: «il forno ha una potenza di 2 kW; in un'ora trasforma 2 kWh di energia elettrica». Allo stesso modo un contatore misura kilowattora, non kilowatt: in bolletta si paga l'energia, non la potenza.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la tua potenza sulle scale

Materiali. Una rampa di scale di un piano; un metro a nastro (sensibilità 1 mm); un cronometro (sensibilità 0,01 s); una bilancia pesapersone (sensibilità 0,5 kg).

Procedimento. 1) Misura il dislivello fra il primo e l'ultimo gradino: puoi misurare un gradino e moltiplicare per il numero dei gradini, oppure misurare direttamente con il metro dalla tromba delle scale; qui $h = (3{,}06 \pm 0{,}02)$ m. 2) Misura la tua massa: $m = (58{,}0 \pm 0{,}5)$ kg. 3) Un compagno cronometra il tempo dal primo passo sul primo gradino all'arrivo dei due piedi in cima; ripeti cinque volte salendo a passo normale e cinque volte salendo rapidamente. 4) Il lavoro minimo dei tuoi muscoli è quello contro il peso, mgh; la potenza media è $P = mgh/t$. Per l'incertezza relativa della potenza somma quelle di m, h e t (*Fisica 1*, capitolo 4).

Tabella 8.1 Tempi di salita di una rampa di scale (dati tipici di una prova).

prova	a passo normale t (s)	salendo rapidamente t (s)
1	6,4	2,9
2	6,1	3,2
3	6,5	3,0
4	6,2	2,8
5	6,3	3,1
media ± semidispersione	6,3 ± 0,2	3,0 ± 0,2

Che cosa concludere. Il lavoro è lo stesso nei due casi: $mgh = 58{,}0\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \times 3{,}06\ \text{m} \approx 1739$ J, con un'incertezza relativa dello 0,9% + 0,7% ≈ 1,5%, cioè $W = (1{,}74 \pm 0{,}03) \times 10^3$ J. Le potenze sono diverse. A passo normale $P = 1739\ \text{J}/6{,}3\ \text{s} \approx 276$ W, con incertezza relativa 1,5% + 3,2% ≈ 4,7%: $P = (2{,}8 \pm 0{,}1) \times 10^2$ W. Salendo rapidamente $P = 1739\ \text{J}/3{,}0\ \text{s} \approx 580$ W, con incertezza relativa 1,5% + 6,7% ≈ 8,2%: $P = (5{,}8 \pm 0{,}5) \times 10^2$ W. Gli intervalli non si sovrappongono: la differenza è reale, e la potenza è circa doppia perché il tempo è circa la metà. L'incertezza maggiore viene dal tempo, misurato a mano su intervalli brevi.

Sicurezza. Le prove rapide si fanno solo in presenza dell'insegnante, su scale asciutte e libere, tenendosi al corrimano, con scarpe adatte e senza zaino; chi non se la sente sale a passo normale. Non si scende mai di corsa.

Per la relazione. Segui lo schema di *Fisica 1*, capitolo 5. Riporta la tabella dei tempi, il calcolo del lavoro e delle due potenze con le loro incertezze, e un grafico a barre (con le barre d'errore) che confronti le potenze dei compagni di classe. Discuti gli errori sistematici: il tempo di reazione di chi avvia e ferma il cronometro; il fatto che conti la salita del baricentro, non dei piedi; il lavoro dei muscoli per muovere braccia e gambe e per spingersi in avanti, che non

compare in *mgh*. Spiega perché il valore calcolato è una potenza *minima*: il corpo trasforma molta più energia di quanta ne diventi lavoro contro il peso.

COLLEGAMENTI

Kilowattora in casa

Sull'etichetta di ogni elettrodomestico è indicata la sua potenza. Un forno da 2,0 kW acceso per 45 minuti trasforma 2,0 kW × 0,75 h = 1,5 kWh; una lampadina a LED da 8 W accesa per 5 ore al giorno per un mese di 30 giorni trasforma 8 W × 150 h = 1,2 kWh, meno di una sola cottura in forno. Moltiplicando i kilowattora per il prezzo unitario che si legge in bolletta si ottiene la spesa: con un prezzo, per esempio, di 0,25 euro al kilowattora, la cottura costa circa 0,38 euro.

Per gli stessi motivi si confrontano le lampadine a parità di luce emessa: una lampada a LED dà la stessa luce di una vecchia lampadina a incandescenza con una potenza molto minore, perché ha un rendimento luminoso molto più alto. La lampadina a incandescenza trasforma in calore la maggior parte dell'energia che riceve.

APPROFONDIMENTO

Watt, i cavalli e il cavallo vapore

Lo scozzese James Watt, il cui nome è oggi l'unità della potenza, perfezionò la macchina a vapore e doveva venderla a proprietari di miniere e di fabbriche che fino ad allora usavano anche i cavalli per azionare pompe e macchinari. Per convincerli serviva un confronto comprensibile: quanti cavalli sostituiva una sua macchina? Watt fissò così una potenza di riferimento, l'*horsepower*, che corrisponde a circa 746 W.

Il cavallo vapore usato in Italia e nell'Europa continentale è un'unità leggermente diversa, definita come la potenza necessaria per sollevare un corpo di massa 75 kg alla velocità di 1 m/s. Con il secondo modo di calcolare la potenza: 75 kg × 9,806 65 m/s^2 × 1 m/s ≈ 735,5 W. Un vero cavallo può superare questa potenza per brevi sforzi: l'unità era un riferimento commerciale, non una misura precisa sugli animali.

8.5.3 Il rendimento

Nessuna macchina reale restituisce tutto il lavoro che riceve. Un argano elettrico assorbe energia elettrica dalla rete e solleva un carico, ma una parte dell'energia va persa negli attriti degli ingranaggi e nel riscaldamento del motore. Si chiama **rendimento** η (la lettera greca «eta») di una macchina il rapporto fra il lavoro utile che produce e l'energia che le viene fornita nello stesso tempo, o, in modo equivalente, fra la potenza utile e la potenza assorbita:

$$\eta = \frac{\text{lavoro utile}}{\text{energia fornita}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{assorbita}}} \qquad \text{(numero puro, minore di 1)}$$

L'energia, che studierai nel prossimo capitolo, si misura anch'essa in joule: per ora pensala come il «lavoro disponibile». Il rendimento è un numero puro, spesso espresso in percentuale, ed è sempre minore di 1: un argano che assorbe 1,4 kW e solleva 200 kg a 0,50 m/s (potenza utile 200 kg × 9,8 N/kg × 0,50 m/s = 980 W) ha $\eta = 980\ \text{W}/1400\ \text{W} = 0{,}70$, cioè il 70%. Il restante 30% non scompare: diventa riscaldamento delle parti della macchina. Che cosa sia questo riscaldamento, e perché l'energia non vada mai davvero perduta, lo vedrai nel capitolo 10.

IN SINTESI

Le formule del lavoro e della potenza

$W = Fs\cos\alpha$ — lavoro (J) di una forza costante F (N) lungo uno spostamento s (m); α è l'angolo fra forza e spostamento. Positivo se la forza aiuta il moto, negativo se lo contrasta, nullo se è perpendicolare.

$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2 + \ldots$ — il lavoro totale è la somma dei lavori delle singole forze ed è uguale al lavoro della risultante.

$W_{\text{peso}} = mg(h_{\text{iniziale}} - h_{\text{finale}})$ — lavoro del peso (J): dipende solo dal dislivello, non dal percorso.

$W_{\text{attrito}} = -F_{\text{d}}d$ — lavoro dell'attrito dinamico (J): sempre negativo, proporzionale alla lunghezza d del cammino percorso.

$W = \frac{1}{2}kx^2$ — lavoro (J) per deformare di x (m) una molla di costante k (N/m) a partire dalla lunghezza a riposo; area del triangolo sotto il grafico $F = kx$.

$P = W/\Delta t$; $P = Fv$ — potenza (W = J/s): rapidità con cui si compie un lavoro; per una forza parallela a una velocità costante v (m/s).

1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J (energia); 1 CV ≈ 735,5 W (potenza).

η = lavoro utile / energia fornita = $P_{\text{utile}}/P_{\text{assorbita}}$ — rendimento, numero puro sempre minore di 1.

SINTESI

- In fisica una forza compie lavoro solo se il suo punto di applicazione si sposta e lo spostamento ha una componente lungo la forza: tenere fermo un peso non è lavoro, anche se affatica.
- Il lavoro di una forza costante è $W = Fs\cos\alpha$: lavora soltanto la componente della forza parallela allo spostamento. Si misura in joule: 1 J = 1 N·m.
- Il lavoro è uno scalare con segno: positivo (motore) se la forza aiuta il moto, negativo (resistente) se lo contrasta, nullo se la forza è perpendicolare allo spostamento, come la reazione normale o la forza centripeta.
- Il lavoro totale su un corpo è la somma dei lavori di tutte le forze ed è uguale al lavoro della forza risultante.
- Il lavoro del peso è mg per la differenza di quota fra partenza e arrivo: non dipende dal percorso ed è nullo su un percorso chiuso.
- Il lavoro dell'attrito dinamico è sempre negativo e proporzionale alla lunghezza del cammino: dipende dal percorso e non si annulla su un percorso chiuso.
- Il lavoro di una forza variabile è l'area sotto il grafico forza–spostamento. Per deformare una molla di x serve il lavoro $\frac{1}{2}kx^2$, che cresce con il quadrato della deformazione.
- Le macchine semplici ideali non fanno risparmiare lavoro: riducono la forza allungando lo spostamento nella stessa proporzione. Quelle reali richiedono un lavoro maggiore di quello utile.
- La potenza è il lavoro diviso per il tempo impiegato, $P = W/\Delta t$, e si misura in watt (1 W = 1 J/s); per una forza parallela alla velocità $P = Fv$.
- Il kilowattora è un'unità di energia (1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ J); il cavallo vapore un'unità di potenza non SI (1 CV ≈ 735,5 W).
- Il rendimento di una macchina è il rapporto fra il lavoro utile e l'energia fornita: è sempre minore di 1.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il joule, unità di misura del lavoro, equivale a:
   - **A.** 1 N/m
   - **B.** 1 N·m
   - **C.** 1 N·s
   - **D.** 1 kg·m/s

2. ● Una persona tiene ferma per due minuti una valigia di 15 kg. Il lavoro che compie sulla valigia è:

   A. positivo, perché la persona si stanca
   B. negativo, perché la forza si oppone al peso
   C. proporzionale alla durata
   D. nullo

3. ● Una forza costante è perpendicolare allo spostamento del corpo su cui agisce. Il suo lavoro:

   A. è nullo
   B. è il massimo possibile
   C. è negativo
   D. è uguale a $F\,s$

4. ● Il lavoro dell'attrito dinamico su un corpo che striscia su un piano è:

   A. sempre positivo
   B. sempre nullo
   C. sempre negativo
   D. positivo o negativo a seconda del verso del moto

5. ●● Un corpo viene portato dal punto A al punto B, 3 m più in alto, una volta lungo una scala e una volta lungo una rampa liscia. Il lavoro del peso:

   A. è maggiore lungo la rampa, che è più lunga
   B. è lo stesso nei due casi
   C. è nullo lungo la rampa
   D. è maggiore lungo la scala, che è più ripida

6. ● Il kilowattora è un'unità di misura di:

   A. energia (o lavoro)
   B. potenza
   C. forza
   D. tempo

7. ●● Per allungare di x una molla, partendo dalla lunghezza a riposo, serve un lavoro W. Per allungarla di $2x$, sempre partendo da riposo, serve:

   A. W
   B. $2W$
   C. $3W$
   D. $4W$

8. ●● Per portare un carico in cima a un rialzo si usa un piano inclinato liscio invece di sollevarlo in verticale. Il piano inclinato:
   A. riduce il lavoro necessario
   B. riduce sia la forza sia il lavoro
   C. riduce la forza, ma il lavoro resta lo stesso
   D. aumenta la forza ma riduce il lavoro

9. ●● Due motori sollevano lo stesso carico alla stessa altezza: A impiega 10 s, B impiega 20 s. Quale affermazione è corretta?
   A. A compie un lavoro doppio di quello di B
   B. A ha una potenza media doppia di quella di B e compie lo stesso lavoro
   C. B ha una potenza media doppia di quella di A
   D. A e B hanno la stessa potenza media

Vero o falso

10. ● Il lavoro è una grandezza vettoriale. V / F

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

12. ●● Quando un corpo scende di un'altezza h, il lavoro del peso è $+mgh$, qualunque sia il percorso. V / F

13. ●● Il lavoro dell'attrito per trascinare una cassa da un punto A a un punto B è lo stesso lungo qualunque percorso. V / F

14. ● Una lampadina da 10 W accesa per 100 h e un forno da 1000 W acceso per 1 h trasformano la stessa quantità di energia. V / F

Applicare

15. ● Una forza orizzontale di 45 N sposta una cassa di 4,0 m nella stessa direzione e nello stesso verso della forza. Calcola il lavoro della forza.

16. ● Un carrello della spesa è spinto per 15 m su un pavimento orizzontale con una forza di 30 N, inclinata di 30° verso il basso rispetto all'orizzontale. Quanto lavoro compie la forza?

17. ● Un ascensore porta una persona di 70 kg dal piano terra al quarto piano, 12 m più in alto. Calcola il lavoro del peso della persona.

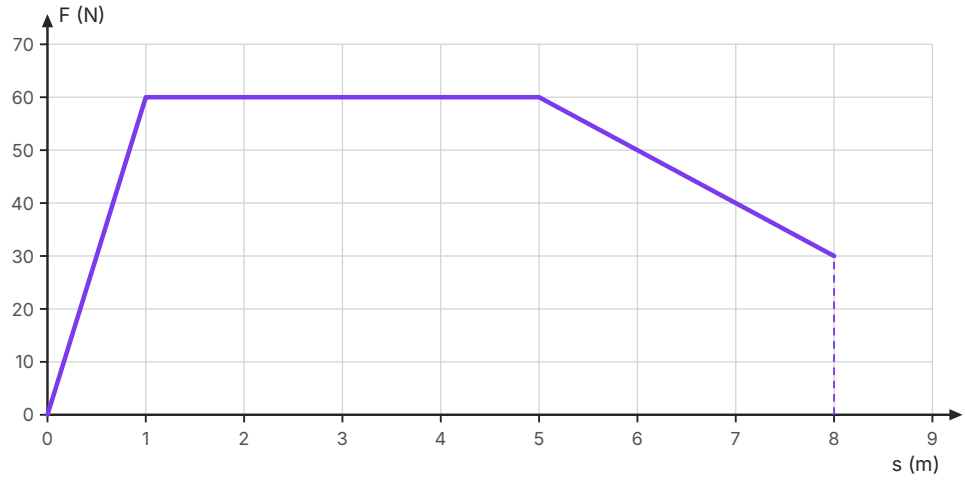


Figura 8.6 Forza parallela allo spostamento con cui un ragazzo tira una slitta, in funzione della posizione (per un esercizio della sezione «Applicare»).

18. ●● La Figura 8.6 mostra la forza con cui un ragazzo tira una slitta, parallela allo spostamento, in funzione della posizione. Calcola il lavoro della forza a) nei primi 5,0 m; b) in tutti gli 8,0 m.

19. ●● Una molla ha costante elastica 400 N/m. Calcola il lavoro necessario per allungarla a) da 0 a 5,0 cm; b) da 5,0 cm a 10,0 cm.

20. ● Converti: a) 3,0 kWh in joule; b) 150 CV in kilowatt; c) 2,5 kW in cavalli vapore.

21. ●● Un montacarichi solleva 200 kg di mattoni di 15 m, a velocità costante, in 30 s. a) Calcola la potenza utile. b) Se il motore assorbe 1,4 kW, qual è il suo rendimento?

22. ● Completa. Il lavoro di una forza è nullo se la forza è _____ allo spostamento. Un watt è uguale a un _____ al secondo. Il kilowattora è un'unità di _____ . Il rendimento di una macchina reale è sempre _____ di 1.

Problemi

23. ●● Una cassa di 35 kg viene trascinata a velocità costante per 8,0 m su un pavimento orizzontale con una fune orizzontale; il coefficiente di attrito dinamico è 0,30. a) Con quale forza tira la fune? b) Calcola il lavoro della fune, dell'attrito, del peso e della reazione normale. c) Quanto vale il lavoro totale? Spiega il risultato con il primo principio della dinamica.

24. ●● Uno studente di 55 kg sale tre piani di scale, ciascuno alto 3,4 m, in 45 s. a) Calcola il lavoro della forza-peso. b) Qual è la potenza media minima che devono sviluppare i suoi muscoli?

25. ●● Un'auto viaggia a 90 km/h costanti su una strada orizzontale; le forze resistenti hanno in tutto un modulo di 600 N. a) Quanto vale la forza motrice? b) Calcola la potenza necessaria, in kilowatt e in cavalli vapore. c) Quanto lavoro compie la forza motrice in 10 minuti? Esprimilo in kilowattora.

26. ●●● Una cassa di 40 kg, inizialmente ferma, viene tirata su un pavimento orizzontale da una fune orizzontale con una forza di 150 N; il coefficiente di attrito dinamico è 0,25. a) Disegna il diagramma di corpo libero e calcola l'accelerazione della cassa (capitolo 5). b) Calcola il lavoro di ciascuna forza e il lavoro totale lungo i primi 6,0 m. c) Calcola la velocità della cassa dopo 6,0 m. d) Calcola $\frac{1}{2}m\,v^2$ e confrontalo con il lavoro totale: che cosa noti?

27. ●●● Un carrello di 60 kg viene spinto a velocità costante lungo una rampa lunga 4,0 m che sale di 0,80 m, con una forza parallela alla rampa. a) Se la rampa è liscia, quanto vale la forza? Quanto lavoro compie? Confrontalo con il lavoro necessario per sollevare il carrello in verticale di 0,80 m. b) Se il coefficiente di attrito dinamico fra carrello e rampa è 0,10, quanto valgono la forza e il suo lavoro? c) Qual è il rendimento della rampa con attrito? (Ricorda da *Fisica 1*, capitolo 9, che la componente del peso perpendicolare alla rampa è $m\,g\,b/l$, con b base della rampa.)

28. ●● Un sollevatore di pesi alza un bilanciere di 100 kg da terra fino a 1,8 m in 1,2 s, con velocità praticamente costante; lo tiene fermo sopra la testa per 3,0 s; poi lo riabbassa lentamente fino a terra. a) Quanto lavoro compiono le sue braccia sul bilanciere nella salita? b) E nei 3,0 s in cui lo tiene fermo? c) Quale potenza media sviluppa nella salita? d) Che segno ha il lavoro delle sue braccia durante la discesa? Quanto vale?

29. ●●● Una pompa solleva acqua da un pozzo profondo 12 m, con una portata di 600 litri al minuto. a) Calcola la potenza utile (densità dell'acqua 1000 kg/m^3; trascura la velocità con cui l'acqua esce). b) Se il rendimento della pompa è il 60%, quale potenza assorbe dalla rete? c) Quanti kilowattora consuma in 2,0 ore di funzionamento?

Ragionare e argomentare

30. ●●● Stima di Fermi. Stima il lavoro che la forza-peso compie (cambiato di segno) quando tutti i 1000 studenti di una scuola salgono dal piano terra al secondo piano, ed esprimilo in kilowattora. Il risultato ti sembra grande o piccolo? Confrontalo con la cottura in forno del box «Kilowattora in casa».

31. ●● Trova l'errore. Un compagno risolve così un esercizio: «Una cassa di 10 kg scivola giù da una rampa liscia lunga 5,0 m e alta 3,0 m. Il lavoro del peso è $W = m\,g \times 5{,}0\text{ m} = 10 \times 9{,}8 \times 5{,}0\text{ J} = 490\text{ J}$». Dov'è l'errore? Qual è il risultato corretto?

32. ●●● Un camion carico affronta una lunga salita con il motore alla massima potenza e rallenta fino a una velocità molto più bassa di quella che teneva in piano. Spiega il fenomeno con la relazione $P = F\,v$. Perché i ciclisti in salita usano rapporti «più agili»?

PER APPROFONDIRE

- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sul lavoro e sull'energia, con il celebre ragionamento sui pesi e le macchine che non possono sollevare «gratis».
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sull'energia, che parte proprio dal lavoro, dalla potenza e dalle macchine semplici, con molti esempi quotidiani.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo su energia cinetica e lavoro, con il lavoro delle forze variabili e della molla calcolato come area.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sul concetto di energia, per vedere come il lavoro abbia aperto la strada a una delle idee più fertili della fisica.

Glossario del capitolo

Cavallo vapore
Unità di potenza non SI (CV) ancora usata per i motori: la potenza necessaria per sollevare 75 kg a 1 m/s; 1 CV ≈ 735,5 W.

Joule
Unità SI del lavoro e dell'energia (J): il lavoro di una forza di 1 N che sposta il suo punto di applicazione di 1 m nella sua direzione; 1 J = 1 N·m = 1 kg·m^2/s^2.

Kilowattora
Unità di energia (kWh), non di potenza: il lavoro compiuto in un'ora con una potenza di 1 kW; 1 kWh = 3,6 × 10^6 J.

Lavoro
Prodotto della componente di una forza lungo lo spostamento per il modulo dello spostamento: per una forza costante $W = F\,s\cos\alpha$. È una grandezza scalare e si misura in joule.

Lavoro dell'attrito
Lavoro dell'attrito dinamico, $-F_d d$: sempre negativo e proporzionale alla lunghezza d del cammino percorso.

Lavoro della forza-peso
Lavoro del peso $m\,g$ fra due posizioni: $m\,g$ per la differenza fra quota iniziale e quota finale; non dipende dal percorso.

Lavoro di una forza variabile
Area compresa fra il grafico della componente della forza lungo lo spostamento, in funzione della posizione, e l'asse delle posizioni.

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

Lavoro per deformare una molla
Lavoro $\frac{1}{2}k\,x^2$ necessario per allungare o comprimere di x una molla di costante elastica k, partendo dalla lunghezza a riposo.

Lavoro resistente
Lavoro negativo, compiuto da una forza che ha una componente opposta 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.

Potenza
Rapporto fra il lavoro compiuto e l'intervallo di tempo impiegato a compierlo, $P = W/\Delta t$; per una forza parallela a una velocità costante $P = F\,v$.

Potenza media
Rapporto fra il lavoro compiuto in un intervallo di tempo e la durata dell'intervallo, quando il lavoro non è compiuto in modo uniforme.

Regola d'oro delle macchine semplici
In una macchina ideale il lavoro della forza motrice è uguale al lavoro compiuto contro la forza resistente: la forza si riduce nella stessa proporzione in cui cresce lo spostamento.

Rendimento
Rapporto η fra il lavoro utile prodotto da una macchina e l'energia che le viene fornita (o fra potenza utile e potenza assorbita); è un numero puro sempre minore di 1.

Watt
Unità SI della potenza (W): 1 W = 1 J/s.

Soluzioni

1. B. Dalla definizione $W = F\,s$: 1 J = 1 N × 1 m.

2. D. La valigia non si sposta: $s = 0$ e quindi $W = 0$.

3. A. cos 90° = 0: la forza non ha componente lungo lo spostamento.

4. C. L'attrito dinamico ha sempre verso opposto allo spostamento: $\alpha = 180°$, lavoro resistente.

5. B. Il lavoro del peso dipende solo dal dislivello: $-m\,g\,h$ in entrambi i casi.

6. A. 1 kWh = 1 kW × 1 h = $3{,}6 \times 10^6$ J.

7. D. $W = \frac{1}{2} k\,x^2$: raddoppiando x il lavoro quadruplica.

8. C. Regola d'oro delle macchine: la forza diminuisce nella stessa proporzione in cui aumenta lo spostamento.

9. B. Il lavoro è lo stesso ($m\,g\,h$); la potenza è inversamente proporzionale al tempo.

10. F. È il prodotto di due moduli e di cos α: è uno scalare, che può essere positivo, negativo o nullo.

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

12. V. Il lavoro del peso dipende solo dalla differenza di quota; scendendo è positivo.

13. F. Il lavoro dell'attrito è $-F_d d$ e dipende dalla lunghezza d del cammino.

14. V. 10 W × 100 h = 1000 Wh = 1 kWh; 1000 W × 1 h = 1 kWh.

15. $W = F\,s$ = 45 N × 4,0 m = 180 J ≈ $1{,}8 \times 10^2$ J.

16. $W = F\,s \cos\alpha$ = 30 N × 15 m × cos 30° ≈ $3{,}9 \times 10^2$ J (389,7 J). Il lavoro è positivo: la componente orizzontale della forza ha il verso del moto.

17. Il peso è opposto allo spostamento: $W = -m\,g\,h$ = −70 kg × 9,8 N/kg × 12 m ≈ $-8{,}2 \times 10^3$ J.

18. Il lavoro è l'area sotto il grafico. a) Triangolo fra 0 e 1,0 m: ½ × 1,0 m × 60 N = 30 J; rettangolo fra 1,0 m e 5,0 m: 4,0 m × 60 N = 240 J; totale 270 J ≈ $2{,}7 \times 10^2$ J. b) Trapezio fra 5,0 m e 8,0 m: ½ × (60 N + 30 N) × 3,0 m = 135 J; totale 405 J ≈ $4{,}1 \times 10^2$ J.

19. a) $W = \frac{1}{2} \times 400$ N/m × $(0{,}050\text{ m})^2$ = 0,50 J. b) ½ × 400 N/m × $(0{,}100\text{ m})^2$ − 0,50 J = 2,0 J − 0,50 J = 1,5 J: il triplo, a parità di allungamento.

20. a) $3{,}0 \times 3{,}6 \times 10^6$ J ≈ $1{,}1 \times 10^7$ J. b) 150 × 735,5 W ≈ $1{,}10 \times 10^5$ W = 110 kW. c) 2500 W / 735,5 W ≈ 3,4 CV.

21. a) A velocità costante la forza del cavo è uguale al peso: $W = m\,g\,h$ = 200 kg × 9,8 N/kg × 15 m = $2{,}94 \times 10^4$ J; $P = W/\Delta t$ = $2{,}94 \times 10^4$ J / 30 s ≈ $9{,}8 \times 10^2$ W. b) η = 980 W / 1400 W = 0,70, cioè il 70%.

22. perpendicolare; joule; energia (o lavoro); minore.

23. Sulla cassa agiscono il peso (343 N, in basso), la reazione normale (in alto), la forza della fune (in avanti) e l'attrito dinamico (all'indietro). a) Velocità costante: per il primo principio la risultante è nulla. In verticale $N = m\,g$ = 343 N; in orizzontale $F = F_d$ = 0,30 × 343 N ≈ 103 N ≈ $1{,}0 \times 10^2$ N. b) Fune: W = 102,9 N × 8,0 m ≈ $8{,}2 \times 10^2$ J; attrito: $-8{,}2 \times 10^2$ J; peso e reazione normale: 0 J (perpendicolari allo spostamento). c) Lavoro totale nullo: la risultante è nulla, e il lavoro totale è il lavoro della risultante. La velocità infatti non cambia.

24. a) Dislivello h = 3 × 3,4 m = 10,2 m; $W_{peso} = -m\,g\,h$ = −55 kg × 9,8 N/kg × 10,2 m ≈ $-5{,}5 \times 10^3$ J. b) I muscoli devono compiere almeno $5{,}5 \times 10^3$ J: P = 5498 J / 45 s ≈ $1{,}2 \times 10^2$ W.

25. Sull'auto agiscono il peso e la reazione della strada, che si equilibrano, la forza motrice in avanti e le resistenze all'indietro. a) Velocità costante: risultante nulla, forza motrice 600 N. b) v = 90/3,6 m/s = 25 m/s; $P = F\,v$ = 600 N × 25 m/s = $1{,}5 \times 10^4$ W = 15 kW; 15 000 W / 735,5 W ≈ 20 CV. c) $W = P\Delta t$ = $1{,}5 \times 10^4$ W × 600 s = $9{,}0 \times 10^6$ J; $9{,}0 \times 10^6$ J / ($3{,}6 \times 10^6$ J/kWh) = 2,5 kWh.

26. a) Sulla cassa agiscono il peso (392 N, in basso), la reazione normale (in alto), la forza della fune (150 N, in avanti) e l'attrito dinamico (all'indietro). In verticale $N = m\,g = 392$ N; $F_d = 0{,}25 \times 392$ N $= 98$ N. $a = (150\text{ N} - 98\text{ N})/40\text{ kg} = 1{,}3\text{ m/s}^2$. b) Fune: 150 N × 6,0 m = 900 J; attrito: −98 N × 6,0 m = −588 J; peso e reazione normale: 0 J. Totale: 312 J $\approx 3{,}1 \times 10^2$ J (oppure $R\,s = 52$ N × 6,0 m). c) $v = \sqrt{(2a\,s)} = \sqrt{(2 \times 1{,}3\text{ m/s}^2 \times 6{,}0\text{ m})} \approx 3{,}9$ m/s. d) $\frac{1}{2}m\,v^2 = \frac{1}{2} \times 40\text{ kg} \times 15{,}6\text{ m}^2/\text{s}^2 \approx 312$ J: coincide con il lavoro totale. Non è un caso: è il teorema che incontrerai nel capitolo 9.

27. Sul carrello agiscono il peso (588 N, in basso), la reazione normale (perpendicolare alla rampa), la spinta (parallela alla rampa, verso l'alto) e, nel caso b), l'attrito dinamico (parallelo alla rampa, verso il basso). a) Velocità costante e rampa liscia: la spinta equilibra la componente del peso lungo la rampa, $F = m\,g\,h/l = 588\text{ N} \times 0{,}80/4{,}0 \approx 118$ N; $W = 117{,}6\text{ N} \times 4{,}0\text{ m} \approx 470$ J, uguale a $m\,g\,h = 588\text{ N} \times 0{,}80\text{ m} \approx 470$ J. b) Base $b = \sqrt{(4{,}0^2 - 0{,}80^2)}\text{ m} \approx 3{,}92$ m; $N = m\,g\,b/l \approx 576$ N; $F_d = 0{,}10 \times 576\text{ N} \approx 57{,}6$ N; $F = 117{,}6\text{ N} + 57{,}6\text{ N} \approx 175$ N; $W = 175{,}2\text{ N} \times 4{,}0\text{ m} \approx 701\text{ J} \approx 7{,}0 \times 10^2$ J. c) $\eta = 470\text{ J} / 701\text{ J} \approx 0{,}67$, cioè il 67%.

28. Sul bilanciere agiscono il peso (980 N, in basso) e la forza delle braccia (in alto). a) A velocità costante la forza delle braccia è uguale al peso, 980 N: $W = 980\text{ N} \times 1{,}8\text{ m} \approx 1{,}8 \times 10^3$ J (1764 J). b) Zero: il bilanciere non si sposta. c) $P = 1764\text{ J} / 1{,}2\text{ s} \approx 1{,}5 \times 10^3$ W. d) Nella discesa lenta la forza delle braccia è ancora verso l'alto e uguale al peso, ma lo spostamento è verso il basso: il lavoro è negativo, $-1{,}8 \times 10^3$ J. Le braccia fanno comunque fatica, ma frenano il moto invece di produrlo.

29. a) In un minuto si sollevano 600 kg di acqua, cioè 10 kg al secondo. Lavoro in 1 s: 10 kg × 9,8 N/kg × 12 m = 1176 J; potenza utile $\approx 1{,}2 \times 10^3$ W. b) $P_{\text{assorbita}} = P_{\text{utile}}/\eta = 1176\text{ W} / 0{,}60 = 1960\text{ W} \approx 2{,}0$ kW. c) 1,96 kW × 2,0 h ≈ 3,9 kWh.

30. Traccia di risposta. Ordini di grandezza: massa media ≈ 60 kg, due piani ≈ 7 m. $W \approx 1000 \times 60\text{ kg} \times 9{,}8\text{ N/kg} \times 7\text{ m} \approx 4 \times 10^6$ J, cioè circa $4 \times 10^6/3{,}6 \times 10^6 \approx 1$ kWh. È un lavoro piccolo rispetto a quanto ci si aspetterebbe dalla fatica di mille persone: è dello stesso ordine di grandezza dell'energia di una sola cottura in forno (1,5 kWh). Il corpo umano, però, per compiere questo lavoro consuma molta più energia, perché il suo rendimento è basso.

31. Traccia di risposta. Il compagno ha moltiplicato il peso per la lunghezza della rampa, come se il peso fosse parallelo allo spostamento. Lavora solo la componente del peso lungo la rampa, $m\,g\,h/l$; il lavoro è $m\,g\,h = 10\text{ kg} \times 9{,}8\text{ N/kg} \times 3{,}0\text{ m} \approx 2{,}9 \times 10^2$ J (294 J), positivo perché la cassa scende. Il lavoro del peso dipende solo dal dislivello.

32. Traccia di risposta. Sul camion in salita agiscono, oltre alle resistenze, la componente del peso lungo la strada, che è grande perché il camion è pesante: per salire a velocità costante serve una forza motrice molto maggiore che in piano. Se la potenza massima del motore è fissata, da $P = F\,v$ segue che a una forza maggiore corrisponde una velocità minore: il camion rallenta finché la forza motrice disponibile, P/v, eguaglia la somma delle forze che si oppongono al moto. Il ciclista ha una potenza limitata dai muscoli: con un rapporto agile ogni pedalata fa avanzare di meno la bicicletta, e la stessa potenza si traduce in una forza maggiore sulla ruota e in una velocità minore, sostenibile in salita.