CAPITOLO

2

Grandezze fisiche e Sistema Internazionale

Un numero senza unità di misura non dice nulla: «tre» che cosa? Tre metri, tre secondi o tre chilogrammi?

OBIETTIVI

1. Riconoscere che cosa rende «fisica» una grandezza e saperne dare una definizione operativa.
2. Conoscere le sette grandezze fondamentali del Sistema Internazionale e le loro unità.
3. Usare multipli e sottomultipli ed eseguire conversioni di lunghezze, aree, volumi, masse e tempi.
4. Definire la densità, usarla per calcolare masse e volumi e riconoscere un materiale.
5. Scrivere correttamente i simboli delle unità secondo le regole del SI.
6. Controllare con l'analisi dimensionale se una formula è coerente.

INDICE DEL CAPITOLO

2.1 Che cosa si può misurare 2
2.2 Il Sistema Internazionale di unità 4
2.3 Lunghezza, massa e tempo 7
2.4 Multipli, sottomultipli e conversioni 9
2.5 La densità 13
2.6 L'analisi dimensionale 17

Fisica 1 · Parte I · Misurare il mondo · versione 1.0
Capitolo 2: Grandezze fisiche e Sistema Internazionale · pagine 45–68 del volume completo · estratto per lo studio

Immagina di chiedere a un amico quanto dista la stazione e di sentirti rispondere: «Venti». Venti minuti a piedi? Venti chilometri? Venti fermate di autobus? Senza un'unità di misura il numero è inutile. Lo stesso vale per una ricetta che chieda «2 di farina» o per un medico che prescriva «5 di sciroppo». Nella vita quotidiana spesso il contesto ci aiuta a indovinare; in fisica, invece, non si indovina: ogni risultato deve dire con precisione *quanto* e *di che cosa*.

Nel capitolo precedente abbiamo visto che la fisica procede per osservazioni, ipotesi ed esperimenti. Ma un esperimento produce dati, e i dati sono numeri accompagnati da unità. Per confrontare i risultati di un laboratorio di Milano con quelli di uno di Tokyo serve un linguaggio comune: è il **Sistema Internazionale di unità**, adottato oggi in quasi tutto il mondo. In questo capitolo impareremo che cosa significa misurare, quali sono le unità del SI, come si passa da un'unità all'altra e come si usa una grandezza molto concreta, la densità, che ci accompagnerà fino allo studio dei fluidi.

2.1 Che cosa si può misurare

2.1.1 Le grandezze fisiche

La lunghezza di un banco, la massa di una mela, la durata di una lezione, la temperatura dell'aria: sono tutte proprietà di un corpo o di un fenomeno che possiamo esprimere con un numero. Si chiama **grandezza fisica** ogni proprietà di un corpo o di un fenomeno che si può misurare. La bellezza di un quadro, la simpatia di una persona o la bontà di un gelato, invece, non sono grandezze fisiche: ognuno può avere la sua opinione, ma non esiste un procedimento che permetta a chiunque di ottenere lo stesso numero.

Proprio questo è il punto. In fisica una grandezza è ben definita quando si descrive il procedimento con cui misurarla: quale strumento usare, come disporlo, come leggere il risultato. Una definizione di questo tipo si chiama **definizione operativa**. Per esempio, la «lunghezza di un banco» è definita operativamente così: si appoggia un metro rigido lungo il bordo, si fa coincidere lo zero con un'estremità e si legge la tacca che corrisponde all'altra estremità. Due studenti che seguono le stesse istruzioni devono ottenere, entro i limiti degli strumenti, lo stesso risultato.

Le grandezze che si possono confrontare tra loro, sommare o sottrarre, si dicono **grandezze omogenee**: l'altezza di una porta e la larghezza di un quaderno sono entrambe lunghezze, quindi sono omogenee e ha senso chiedersi quale sia maggiore. Una lunghezza e una durata, invece, non sono omogenee: chiedersi se 3 metri siano «più» di 2 secondi non ha alcun significato.

2.1.2 Misurare significa confrontare

Che cosa facciamo, esattamente, quando misuriamo? Confrontiamo la grandezza con un'altra grandezza omogenea, scelta una volta per tutte come riferimento, e contiamo quante volte il riferimento è contenuto nella grandezza. Il riferimento si chiama **unità di misura**. Se il banco è lungo quanto 120 volte un centimetro, diciamo che la sua lunghezza è 120 cm.

Il risultato di una misura, cioè la **misura** della grandezza, è quindi formato da due parti inseparabili: un **numero**, che dice quante volte l'unità è contenuta nella grandezza, e l'**unità** stessa. Lo stesso banco può essere lungo 120 cm oppure 1,20 m: il numero cambia perché cambia l'unità, ma la lunghezza è sempre quella. Nel capitolo 4 vedremo che a questa coppia si aggiunge un terzo elemento, l'incertezza, perché nessuna misura è perfetta.

L'idea del confronto si vede molto bene nella **bilancia a bracci uguali** (Figura 2.1). È un'asta rigida, il giogo, appoggiata al centro su un fulcro; alle estremità, alla stessa distanza dal fulcro, pendono due piatti. Su un piatto si mette l'oggetto, sull'altro si aggiungono masse campione finché l'asta non torna orizzontale e l'indice si ferma sullo zero della scala. In quel momento la massa dell'oggetto è uguale alla somma delle masse campione. La bilancia, in altre parole, non «sente» un numero: confronta due masse e ci dice quando sono uguali.

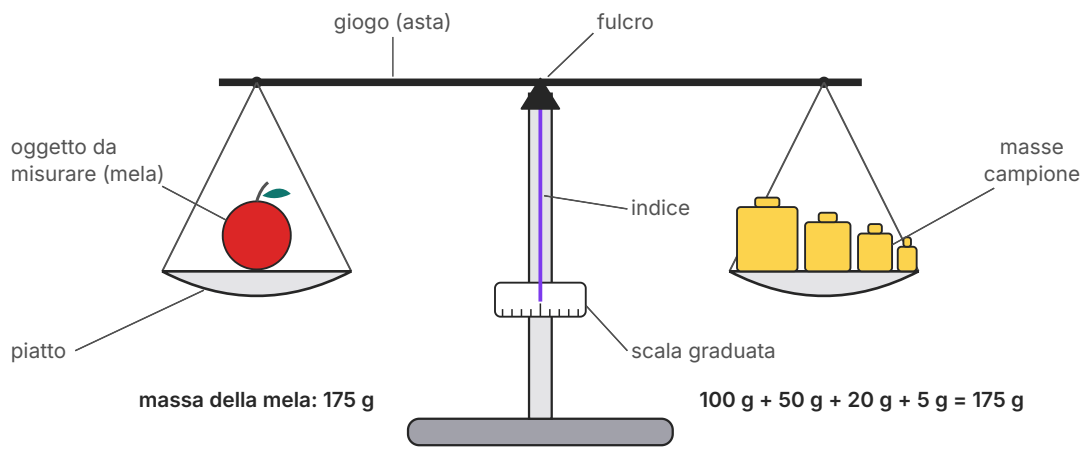

Figura 2.1 Bilancia a bracci uguali in equilibrio. La mela sul piatto di sinistra è bilanciata da masse campione per un totale di 175 g: l'asta è orizzontale e l'indice è sullo zero, quindi la massa della mela è 175 g.

DA RICORDARE

Misura = numero + unità di misura. Scrivere «la lunghezza è 3» è un errore, anche in un passaggio intermedio di un esercizio. Il numero da solo non è una misura: lo diventa solo insieme alla sua unità.

2.2 Il Sistema Internazionale di unità

2.2.1 Grandezze fondamentali e derivate

Le grandezze fisiche sono moltissime, ma non tutte indipendenti. L'area di un rettangolo si ottiene moltiplicando due lunghezze; il volume di una scatola moltiplicando tre lunghezze; la velocità di un'automobile dividendo la distanza percorsa per il tempo impiegato. Basta quindi scegliere un piccolo gruppo di grandezze, dette **grandezze fondamentali**, e definire per ognuna un'unità: tutte le altre, le **grandezze derivate**, si ottengono dalle fondamentali con moltiplicazioni e divisioni, e così anche le loro unità. L'unità dell'area, per esempio, è il metro quadrato ($m^2 = m \cdot m$); quella della velocità è il metro al secondo (m/s).

Il **Sistema Internazionale di unità**, abbreviato **SI**, è l'insieme di unità che la comunità scientifica ha adottato nel 1960 e che in Italia è legale per tutti gli usi. Il SI ha **sette** grandezze fondamentali, elencate nella Figura 2.2. In questo volume ne useremo soprattutto tre, quelle della meccanica: la **lunghezza**, che si misura in metri (m); la **massa**, in chilogrammi (kg); il **tempo**, in secondi (s). La temperatura (kelvin, K) la incontrerai il prossimo anno con la termologia; le altre tre appartengono all'elettricità, alla chimica e all'ottica.



Figura 2.2 Le sette grandezze fondamentali del SI, con l'unità, il simbolo e la costante fisica il cui valore, fissato esattamente, definisce oggi l'unità. In viola le tre unità della meccanica.

Tabella 2.1 Alcune grandezze derivate usate in questo volume.

Grandezza derivata	Come si ottiene	Unità SI
area	lunghezza × lunghezza	m^2
volume	lunghezza × lunghezza × lunghezza	m^3
densità	massa ÷ volume	kg/m^3
velocità	lunghezza ÷ tempo	m/s
accelerazione	velocità ÷ tempo	m/s^2

2.2.2 Come sono definite oggi le unità

Un'unità di misura è utile solo se tutti la intendono allo stesso modo e se chiunque, in qualunque laboratorio del mondo, può riprodurla. Per molto tempo le unità sono state affidate a oggetti campione, custoditi con grande cura. Dal **20 maggio 2019**, invece, tutte le unità del SI sono definite fissando il valore numerico *esatto* di sette costanti della natura. L'idea è semplice da enunciare: le costanti della natura sono le stesse ovunque e non si consumano, quindi un'unità legata a una costante è disponibile a tutti e non cambia nel tempo.

- **Il secondo** è legato alla frequenza di un particolare «battito» dell'atomo di cesio-133: il secondo è la durata di 9 192 631 770 oscillazioni della radiazione emessa in questa transizione. Gli orologi atomici a cesio realizzano questa definizione.

- **Il metro** è legato alla velocità della luce nel vuoto, fissata a $c = 299\,792\,458$ m/s: il metro è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in 1/299 792 458 di secondo.
- **Il chilogrammo** è legato alla costante di Planck h, una costante fondamentale della fisica dell'atomo, il cui valore è stato fissato esattamente. Come si passi da h a una massa lo studierai negli anni successivi; per ora basta sapere che esistono strumenti di altissima precisione che lo fanno.

Non devi ricordare a memoria questi numeri: devi però sapere che le unità del SI non dipendono più da nessun oggetto, e perché questa scelta è vantaggiosa.

COLLEGAMENTI

Una sonda perduta per un errore di unità

Nel settembre 1999 la sonda *Mars Climate Orbiter* della NASA, arrivata vicino a Marte dopo un viaggio di oltre nove mesi, si avvicinò troppo al pianeta e andò perduta. L'inchiesta stabilì che un programma usato a terra forniva alcuni dati in unità anglosassoni (basate sulla libbra), mentre il software che li riceveva si aspettava unità del SI. Nessuno si accorse che i numeri, pur corretti, erano espressi in unità diverse. È l'esempio più famoso di quanto possa costare un numero scritto senza badare all'unità di misura.

APPROFONDIMENTO

Dal meridiano al cilindro di Sèvres, fino alle costanti

Il metro nacque in Francia negli anni della Rivoluzione: nel 1791 fu definito come la decimilionesima parte della distanza tra il Polo Nord e l'equatore, misurata lungo il meridiano di Parigi. Il chilogrammo doveva corrispondere alla massa di un decimetro cubo d'acqua. Poiché nessuno poteva rifare ogni volta quelle misure, le unità furono affidate a campioni di platino. Nel 1875 diciassette Stati, tra cui l'Italia, firmarono a Parigi la *Convenzione del Metro*, e nel 1889 furono adottati i prototipi internazionali del metro e del chilogrammo.

Il prototipo del chilogrammo era un piccolo cilindro di platino e iridio, alto circa 4 cm, conservato sotto tre campane di vetro in una cassaforte del Bureau International des Poids et Mesures a Sèvres, vicino a Parigi. Per definizione la sua massa era esattamente 1 kg. Ma confrontandolo nel corso di un secolo con le sue copie ufficiali, si trovarono differenze di alcune decine di microgrammi: o il prototipo perdeva massa, o le copie ne guadagnavano, e non c'era modo di stabilirlo, perché il prototipo era il riferimento stesso. Il metro era già stato legato alla velocità della luce nel 1983; per il chilogrammo la svolta è arrivata con la ridefinizione del 2019, entrata in vigore il 20 maggio, giorno anniversario della Convenzione del Metro. Il cilindro esiste ancora, ma oggi è solo un oggetto di grande valore storico.

2.2.3 Le regole di scrittura del SI

Il SI non stabilisce soltanto le unità, ma anche il modo di scriverle. Sono regole internazionali, che valgono in un libro di scuola come in un articolo scientifico.

- I simboli sono **simboli**, non abbreviazioni: **non** vogliono il punto (5 m, non «5 m.») e **non** hanno il plurale (20 kg, non «20 kgs»).
- Tra il numero e il simbolo si lascia uno **spazio**: 12 cm, 20 °C. Fanno eccezione gli angoli in gradi e le percentuali, che si scrivono attaccati al numero: 30°, 15%.
- Le maiuscole e le minuscole contano: il prefisso chilo si scrive con la **k minuscola** (kg, km), perché K maiuscola è il simbolo del kelvin; m è il metro, M è il prefisso mega. I simboli derivati da nomi di persona hanno la maiuscola (N del newton, Pa del pascal), ma il nome per esteso dell'unità si scrive minuscolo: «tre newton», «un kelvin».
- Non si mescolano simboli e nomi: «km/h» oppure «chilometri all'ora», mai «km/ora» o «Kmh». Il prodotto di unità si indica con un punto a mezza altezza (N·m), il quoziente con la barra (m/s).
- Non si usano due prefissi uno dopo l'altro: un milionesimo di chilogrammo è un milligrammo (mg), non un «microchilogrammo».

2.3 Lunghezza, massa e tempo

2.3.1 Lunghezze, aree e volumi

La **lunghezza** è la grandezza che misura la distanza tra due punti; la sua unità SI è il **metro** (m). Dalla lunghezza derivano due grandezze di uso continuo. L'**area**, cioè l'estensione di una superficie, si misura in **metri quadrati** (m^2): 1 m^2 è l'area di un quadrato di 1 m di lato. Il **volume**, cioè lo spazio occupato da un corpo, si misura in **metri cubi** (m^3): 1 m^3 è il volume di un cubo di 1 m di lato, un cubo in cui potresti stare seduto, ma non in piedi.

Per volumi più piccoli si usano il decimetro cubo e il centimetro cubo. Un cubo di 1 dm di lato (cioè 10 cm) contiene $10 \times 10 \times 10 = 1000$ cubetti di 1 cm di lato, quindi 1 dm^3 = 1000 cm^3 (Figura 2.3). Nella vita quotidiana per i liquidi si usa il **litro** (L), un'unità non SI ma ammessa, che è esattamente uguale al decimetro cubo. Ne seguono equivalenze che conviene conoscere a memoria:

$$1\ \text{L} = 1\ \text{dm}^3 = 1000\ \text{cm}^3 \qquad 1\ \text{mL} = 1\ \text{cm}^3 \qquad 1\ \text{m}^3 = 1000\ \text{L}$$

Un brick di latte da 1 L, quindi, ha lo stesso volume di un cubo di 10 cm di lato; un cucchiaino da 5 mL contiene 5 cm^3 di sciroppo; una vasca da 1 m^3 contiene mille litri d'acqua.

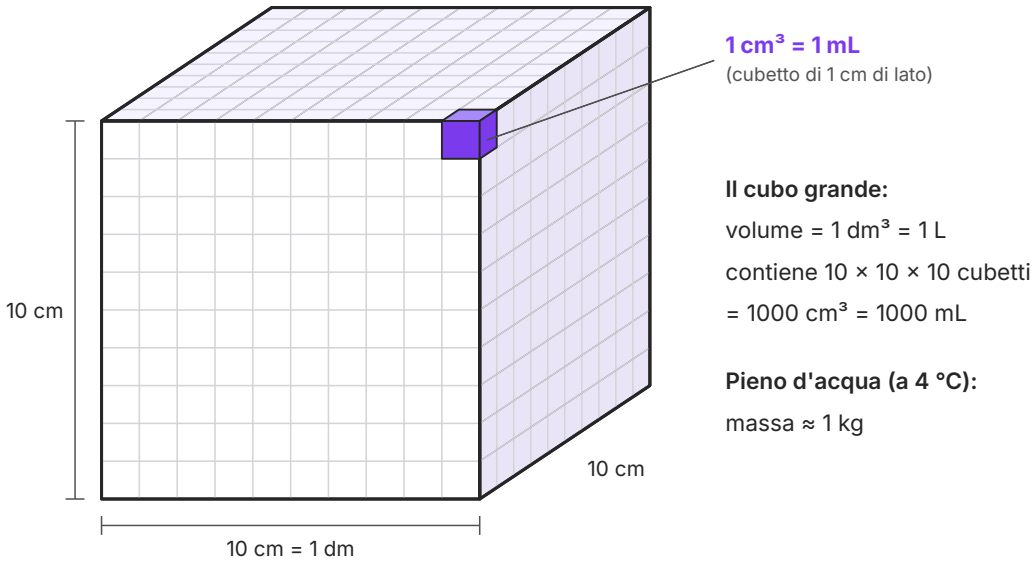

Figura 2.3 Un cubo di 10 cm di lato ha volume 1 dm^3 = 1 L e contiene 10 × 10 × 10 = 1000 cubetti da 1 cm^3; uno di essi, evidenziato in viola, corrisponde a 1 mL. La profondità è disegnata in prospettiva obliqua.

2.3.2 La massa

La **massa** è la grandezza che esprime la quantità di materia di un corpo; la sua unità SI è il **chilogrammo** (kg). È l'unica unità fondamentale che nel nome contiene già un prefisso: per questo i multipli e i sottomultipli si costruiscono a partire dal grammo (1 g = 0,001 kg), e un milligrammo è un millesimo di grammo. Per masse grandi si usa anche la **tonnellata** (t), unità non SI ammessa: 1 t = 1000 kg.

Come abbiamo visto, la massa si misura per confronto con la bilancia a bracci uguali. Questo strumento ha una proprietà notevole: se lo portassimo sulla Luna, darebbe lo stesso risultato che sulla Terra, perché lì l'oggetto e le masse campione sarebbero attratti verso il basso nello stesso modo. La massa di un corpo, infatti, non dipende dal luogo in cui si trova. Nel capitolo 7 vedremo che cosa cambia invece da un pianeta all'altro: il **peso**, che è una forza e si misura in newton.

ERRORE FREQUENTE

Nel linguaggio di tutti i giorni diciamo «peso 60 kg» o «pesa due etti». In fisica è sbagliato: il chilogrammo è l'unità della **massa**, non del peso. La frase corretta è «la mia massa è 60 kg». La differenza, che ora può sembrare una pignoleria, diventerà essenziale nel capitolo 7, quando scopriremo che un astronauta di massa 60 kg ha la stessa massa sulla Terra e sulla Luna, ma un peso molto diverso.

2.3.3 Il tempo

Il **tempo**, inteso come durata di un fenomeno, si misura in **secondi** (s). Per misurare il tempo servono fenomeni che si ripetono sempre uguali: si chiama **fenomeno periodico** un fenomeno che si ripete identico a intervalli regolari, e la durata di ogni ripetizione si chiama **periodo**. L'alternarsi del giorno e della notte, le fasi della Luna, le oscillazioni di un pendolo sono fenomeni periodici, e su ciascuno di essi l'umanità ha costruito un orologio: la meridiana, il calendario lunare, l'orologio a pendolo.

Un orologio, in fondo, è un dispositivo che conta i periodi di un fenomeno periodico. Gli orologi da polso al quarzo contano le vibrazioni di un minuscolo cristallo, che oscilla 32 768 volte al secondo; gli orologi atomici contano le oscillazioni della radiazione del cesio, e i migliori sono così stabili che accumulerebbero un errore di meno di un secondo in milioni di anni. Più il fenomeno è regolare e più è rapido, più l'orologio è preciso. Su orologi atomici si basa anche il sistema GPS del tuo telefono, che ricava la posizione dal tempo impiegato dai segnali dei satelliti per arrivare fino a te.

Per i tempi lunghi usiamo unità non SI ma ammesse: il **minuto** (min), l'**ora** (h) e il **giorno** (d). Attenzione: con queste unità i passaggi non vanno per potenze di dieci, perché 1 min = 60 s e 1 h = 60 min = 3600 s.

2.4 Multipli, sottomultipli e conversioni

2.4.1 I prefissi del SI

La distanza tra Roma e Milano è di circa 480 000 m; lo spessore di un foglio di carta è circa 0,0001 m. Scrivere numeri così lunghi è scomodo e fa sbagliare. Per questo il SI usa i **prefissi**: parole (e simboli) che, messe davanti al nome dell'unità, la moltiplicano per una potenza di dieci. Il chilometro è mille metri, il millimetro un millesimo di metro. La Tabella 2.2 riporta i prefissi più usati; per ora ci basta leggere le potenze di dieci come «un 1 seguito da tanti zeri» (esponente positivo) o «un 1 preceduto da tanti zeri dopo la virgola» (esponente negativo). Nel capitolo 3 impareremo a usarle in modo sistematico.

Tabella 2.2 Prefissi del SI più usati.

Prefisso	Simbolo	Fattore	In cifre	Esempio
tera	T	10^{12}	1 000 000 000 000	1 TB (terabyte)
giga	G	10^{9}	1 000 000 000	1 GHz
mega	M	10^{6}	1 000 000	1 Mm = 1000 km
chilo	k	10^{3}	1000	1 km = 1000 m
etto	h	10^{2}	100	1 hg = 100 g
deca	da	10^{1}	10	1 dam = 10 m
deci	d	10^{-1}	0,1	1 dm = 0,1 m
centi	c	10^{-2}	0,01	1 cm = 0,01 m
milli	m	10^{-3}	0,001	1 mm = 0,001 m
micro	µ	10^{-6}	0,000 001	1 µm = 0,001 mm
nano	n	10^{-9}	0,000 000 001	1 ns
pico	p	10^{-12}	0,000 000 000 001	1 pF

2.4.2 Convertire con il fattore di conversione

Convertire una misura significa esprimerla in un'altra unità senza cambiare la grandezza. Il metodo più sicuro si basa su un'osservazione: se 1 km = 1000 m, allora la frazione (1000 m)/(1 km) vale esattamente 1, perché numeratore e denominatore sono la stessa lunghezza. Una frazione di questo tipo si chiama **fattore di conversione**. Moltiplicare una misura per un fattore di conversione non la cambia (si moltiplica per 1), ma ne cambia l'unità, perché le unità si semplificano come le lettere in algebra:

$$3{,}5\ \text{km} = 3{,}5\ \text{km} \times \frac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}} = 3500\ \text{m}$$

La regola pratica è scegliere il fattore in modo che l'unità da eliminare stia al **denominatore** se nella misura è al numeratore, e viceversa. Quando un solo fattore non basta, se ne mettono in fila più d'uno: è la cosiddetta **catena di fattori**. Per le unità con i prefissi decimali è utile anche la «scala» della Figura 2.4: ogni gradino verso il basso moltiplica per 10, ogni gradino verso l'alto divide per 10.

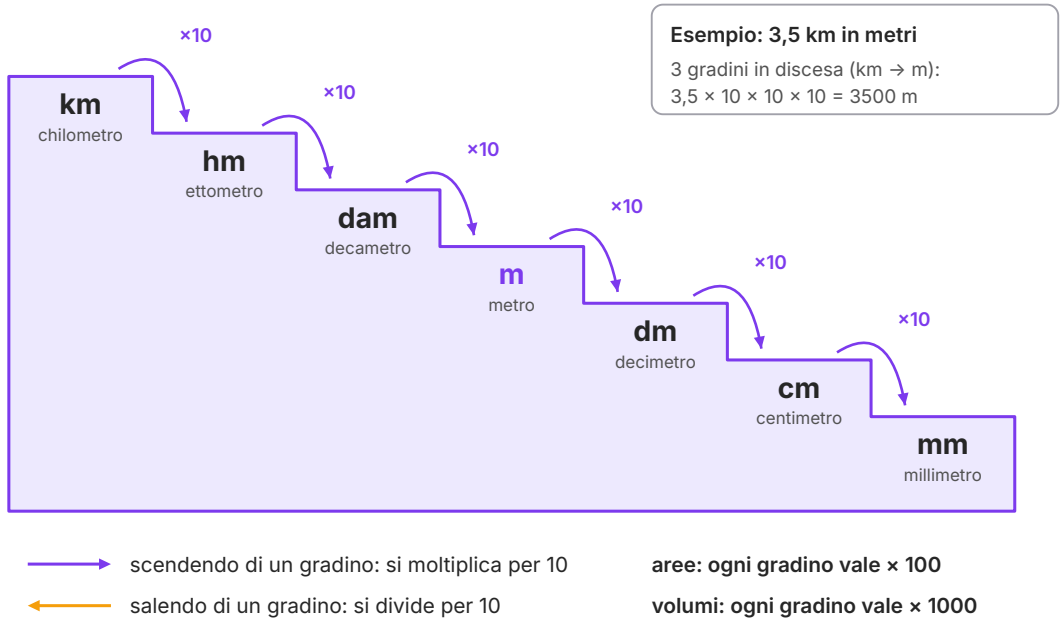

Figura 2.4 La scala dei multipli e sottomultipli del metro. Scendendo di un gradino l'unità diventa dieci volte più piccola, quindi il numero si moltiplica per 10; salendo si divide per 10. Per le aree ogni gradino vale un fattore 100, per i volumi un fattore 1000.

2.4.3 Conversioni di aree e di volumi

Con le aree e i volumi bisogna fare attenzione. Un quadrato di 1 m di lato ha un lato di 100 cm, quindi la sua area è $100\ \text{cm} \times 100\ \text{cm} = 10\,000\ \text{cm}^2$. Allo stesso modo un cubo di 1 m di lato ha volume $100\ \text{cm} \times 100\ \text{cm} \times 100\ \text{cm} = 1\,000\,000\ \text{cm}^3$. In breve:

$$1\ \text{m}^2 = 10^4\ \text{cm}^2 = 10\,000\ \text{cm}^2 \qquad 1\ \text{m}^3 = 10^6\ \text{cm}^3 = 1000\ \text{dm}^3 = 1000\ \text{L}$$

Il fattore di conversione si applica tante volte quante sono le dimensioni: due volte per un'area, tre per un volume. Per esempio $0{,}35\ \text{m}^2 = 0{,}35 \times 100 \times 100\ \text{cm}^2 = 3500\ \text{cm}^2$.

ERRORE FREQUENTE

«1 m = 100 cm, quindi $1\ \text{m}^2 = 100\ \text{cm}^2$»: è sbagliato! L'esponente 2 si applica anche al fattore: $1\ \text{m}^2 = (100\ \text{cm})^2 = 10\,000\ \text{cm}^2$. Per convincerti, disegna un quadrato di 1 m di lato su un pavimento a piastrelle di 1 cm: ne servono 100 file da 100 piastrelle, non una sola fila. Allo stesso modo $1\ \text{m}^3 = (100\ \text{cm})^3 = 1\,000\,000\ \text{cm}^3$.

2.4.4 Unità non SI ancora in uso

Alcune unità non appartengono al SI ma sono così diffuse che il SI ne ammette l'uso accanto alle proprie. Le più comuni sono raccolte nella Tabella 2.3. Una merita attenzione: la velocità delle automobili si esprime in chilometri all'ora (km/h), mentre in fisica si usa il metro al secondo (m/s). Poiché 1 km = 1000 m e 1 h = 3600 s,

$$1\ \text{km/h} = \frac{1000\ \text{m}}{3600\ \text{s}} = \frac{1}{3{,}6}\ \text{m/s}$$

Per passare da km/h a m/s si **divide per 3,6**; per passare da m/s a km/h si **moltiplica per 3,6**. Anche la temperatura si esprime di solito in gradi Celsius (°C), mentre l'unità SI è il kelvin: la temperatura in kelvin si ottiene aggiungendo 273,15 a quella in gradi Celsius (20 °C corrispondono a 293,15 K). Ne riparleremo nel secondo anno.

Tabella 2.3 Unità non SI ammesse e loro conversione.

Grandezza	Unità (simbolo)	Valore in unità SI
tempo	minuto (min)	1 min = 60 s
tempo	ora (h)	1 h = 60 min = 3600 s
tempo	giorno (d)	1 d = 24 h = 86 400 s
volume	litro (L)	1 L = 1 dm^3 = 0,001 m^3
massa	tonnellata (t)	1 t = 1000 kg
velocità	chilometro all'ora (km/h)	1 km/h = 1/3,6 m/s; 1 m/s = 3,6 km/h
temperatura	grado Celsius (°C)	T (in K) = t (in °C) + 273,15

ESEMPIO SVOLTO

Tre conversioni con la catena di fattori

a) Un'auto viaggia a 72 km/h. Quanto vale la sua velocità in m/s?

$72\ \text{km/h} = 72\ \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}} \times \frac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}} = \frac{72\,000\ \text{m}}{3600\ \text{s}} = 20\ \text{m/s}$. Controllo: 72 : 3,6 = 20. ✔

b) Un sacchetto contiene 750 mL di acqua. Quanti m^3 sono?

750 mL = 750 cm^3; poiché 1 m^3 = 1 000 000 cm^3, 750 cm^3 = 750 : 1 000 000 m^3 = 0,000 75 m^3.

c) Un film dura 2 h 18 min. Quanti secondi?

2 h = 2 × 3600 s = 7200 s; 18 min = 18 × 60 s = 1080 s; totale 7200 s + 1080 s = 8280 s.

Strategia: scrivi sempre le unità in ogni passaggio. Se alla fine non si semplificano nel modo giusto, hai capovolto un fattore.

2.5 La densità

2.5.1 Più pesante o più denso?

«Pesa di più un chilo di ferro o un chilo di piume?» È un vecchio indovinello: la risposta è che le due masse sono uguali. Ma l'indovinello funziona perché tutti abbiamo l'impressione che il ferro sia «più pesante» delle piume. Che cosa intendiamo davvero? Che, a parità di volume, il ferro ha una massa molto maggiore. Questa proprietà si chiama densità.

La **densità** di una sostanza è il rapporto tra la massa m di un campione della sostanza e il suo volume V:

$$d = \frac{m}{V}$$

Nel SI la densità si misura in **kg/m³**; in laboratorio si usa spesso il **g/cm³**. In molti testi la densità è indicata con la lettera greca ρ (rho); in questo libro useremo sempre d. La densità dice quanti chilogrammi «pesa», cioè quanta massa ha, un metro cubo di quella sostanza, oppure quanti grammi ha un centimetro cubo. L'acqua ha densità 1000 kg/m³, cioè 1,00 g/cm³: un litro d'acqua ha massa (molto vicina a) 1 kg.

Per passare da un'unità all'altra basta una catena di fattori:

$$1\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1\ \text{kg}}{1000\ \text{g}} \times \frac{1\,000\,000\ \text{cm}^3}{1\ \text{m}^3} = 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Quindi da g/cm³ a kg/m³ si **moltiplica per 1000**, e viceversa si divide per 1000: l'alluminio ha densità 2,70 g/cm³ = 2700 kg/m³.

2.5.2 Una proprietà della sostanza

Se prendi un cubetto di alluminio e poi un cubo di alluminio con volume doppio, anche la massa raddoppia; con volume triplo, triplica. Il rapporto m/V resta sempre lo stesso: la densità non dipende dalla forma né dalle dimensioni del campione, ma solo dalla **sostanza** di cui è fatto (e, in piccola misura, dalla temperatura e dalla pressione). È per questo che la densità è una proprietà caratteristica di un materiale e si può usare per riconoscerlo. La Tabella 2.4 riporta alcuni valori.

Tabella 2.4 Densità di alcune sostanze a 20 °C e a pressione atmosferica normale, salvo diversa indicazione (valori arrotondati).

Sostanza	d (kg/m^3)	d (g/cm^3)	Sostanza	d (kg/m^3)	d (g/cm^3)
aria	1,20	0,001 20	vetro comune	circa 2500	circa 2,5
legno di abete (secco)	circa 450	circa 0,45	alluminio	2700	2,70
alcol etilico	789	0,789	ferro	7870	7,87
olio d'oliva	circa 910	circa 0,91	rame	8960	8,96
ghiaccio (0 °C)	917	0,917	piombo	11 340	11,34
acqua dolce (4 °C)	1000	1,000	mercurio	13 546	13,546
acqua di mare	circa 1025	circa 1,025	oro	19 300	19,3

La Figura 2.5 rende visibile il significato della tabella: cubi di sostanze diverse, tutti con la stessa massa di 1 kg, hanno volumi molto diversi. Il cubo d'oro ha il lato di meno di 4 cm, quello di abete di oltre 13 cm. A parità di massa, più la sostanza è densa, più il volume è piccolo; a parità di volume, più la sostanza è densa, più la massa è grande.

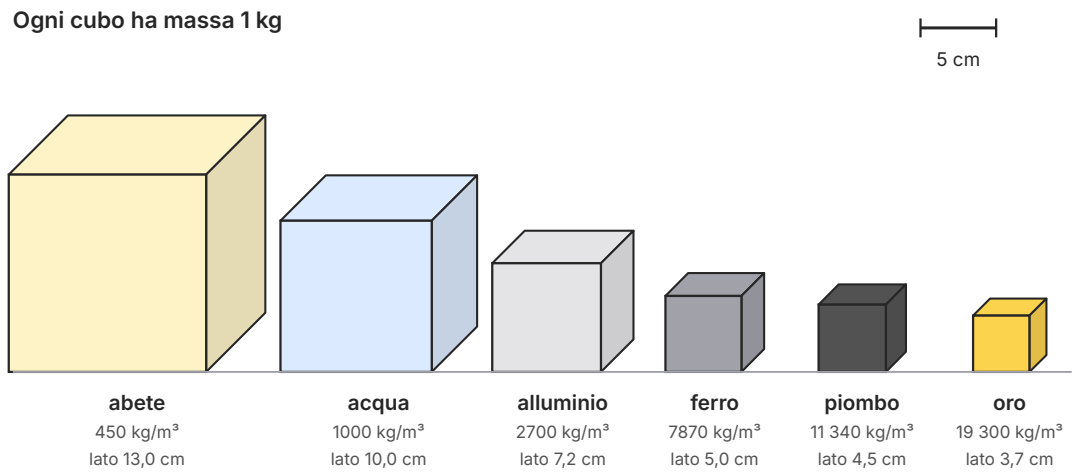

Figura 2.5 Cubi di sei sostanze diverse, ciascuno di massa 1 kg, disegnati in scala (confronta la barra di 5 cm); la profondità è resa in prospettiva obliqua, accorciata. Il lato è calcolato come la radice cubica di $V = m/d$.

2.5.3 Calcolare massa e volume

La relazione $d = m/V$ contiene tre grandezze: conoscendone due, si ricava la terza. Moltiplicando entrambi i membri per V si ottiene la massa, e dividendo poi per d si ottiene il volume:

$$m = d \cdot V \qquad V = \frac{m}{d}$$

Prima di sostituire i numeri controlla che le unità siano coerenti: se la densità è in kg/m^3, il volume va in m^3 e la massa risulta in kg; se la densità è in g/cm^3, il volume va in cm^3 e la massa risulta in g.

ESEMPIO SVOLTO

Quanta aria c'è nella tua camera?

Una camera misura 5,0 m × 4,0 m × 2,7 m. Qual è la massa dell'aria che contiene? (d_{aria} = 1,20 kg/m^3)

Dati: lunghezze in metri, densità in kg/m^3: le unità sono già coerenti.
Volume: V = 5,0 m × 4,0 m × 2,7 m = 54 m^3.
Massa: $m = d \cdot V$ = 1,20 kg/m^3 × 54 m^3 ≈ 65 kg.

Commento: l'aria della camera ha una massa paragonabile a quella di una persona adulta! Non ce ne accorgiamo perché l'aria ci circonda da tutte le parti; nel capitolo 13 vedremo che proprio la massa dell'aria è all'origine della pressione atmosferica.

Al contrario: che volume occupano 500 g di olio d'oliva (d = 0,91 g/cm^3)? $V = m/d$ = 500 g / 0,91 g/cm^3 ≈ 550 cm^3 = 0,55 L: un po' più di mezzo litro, perché l'olio è meno denso dell'acqua.

2.5.4 Il grafico massa-volume

Se misuriamo massa e volume di vari campioni della stessa sostanza e riportiamo i dati su un grafico, con il volume sull'asse orizzontale e la massa su quello verticale, i punti si allineano lungo una retta che passa per l'origine: un volume nullo ha massa nulla, e a volume doppio corrisponde massa doppia. Il rapporto m/V, uguale per tutti i punti della retta, è proprio la densità; quindi **più la retta è ripida, più la sostanza è densa** (Figura 2.6). Nel capitolo 5 chiameremo questo tipo di relazione *proporzionalità diretta* e il rapporto costante *pendenza* della retta.

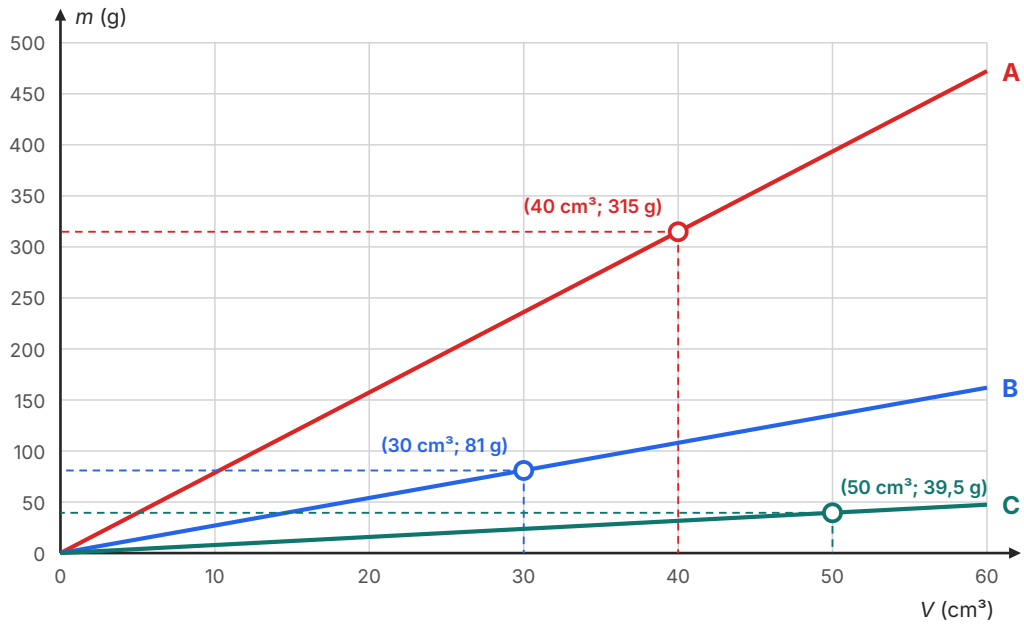

Figura 2.6 Massa in funzione del volume per tre sostanze A, B e C. Per ognuna è evidenziato un punto con le sue coordinate. Le rette passano per l'origine: il rapporto m/V è costante su ciascuna retta ed è la densità della sostanza.

ESEMPIO SVOLTO

Riconoscere una sostanza da un grafico

Sulla retta A della Figura 2.6 è evidenziato il punto (40 cm^3; 315 g). Di quale sostanza si tratta?

Lettura del grafico: un campione di 40 cm^3 della sostanza A ha massa 315 g.
Calcolo: $d = m/V$ = 315 g / 40 cm^3 ≈ 7,9 g/cm^3 = 7900 kg/m^3.
Confronto con la Tabella 2.4: il valore più vicino è quello del ferro (7,87 g/cm^3).

Controllo con un altro punto: sulla stessa retta, a 20 cm^3 la massa è circa metà, cioè circa 157 g: il rapporto è lo stesso. Le rette B e C sono meno ripide, quindi le loro sostanze sono meno dense del ferro; ricavarne la densità sarà il tuo esercizio 21.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: massa e volume dell'acqua

Materiali: un cilindro graduato da 100 mL, una bilancia elettronica, un becher d'acqua, una pipetta.

Procedura: 1) appoggia il cilindro vuoto sulla bilancia e premi il tasto di tara, in modo che la bilancia segni zero; 2) versa acqua fino alla tacca dei 20 mL, rifinendo con la pipetta e leggendo il fondo del menisco con l'occhio alla stessa altezza; 3) annota la massa; 4) ripeti aggiungendo acqua fino a 40, 60, 80 e 100 mL.

Tabella 2.5 Dati tipici dell'esperienza.

V (mL)	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0
m (g)	19,9	40,1	59,8	80,2	99,9
m/V (g/cm^3)	0,995	1,00	0,997	1,00	0,999

Che cosa concludere: il rapporto m/V è sempre circa 1,00 g/cm^3, qualunque sia la quantità d'acqua: è la densità dell'acqua. Le piccole differenze tra le masse misurate e i valori «attesi» (20 g, 40 g…) dipendono dalla lettura del menisco e dalla bilancia: impareremo a trattarle nel capitolo 4. Costruisci il grafico m–V su carta millimetrata e verifica che i punti stiano su una retta passante per l'origine.

Sicurezza: asciuga subito l'acqua versata sul banco e vicino alla bilancia elettronica.

Per la relazione. Riporta la tabella con le colonne V (mL), m (g) e m/V (g/cm^3) e il grafico m–V. Nelle conclusioni scrivi il valore della densità che hai trovato, confrontalo con 1,00 g/cm^3 e indica quale lettura ti è sembrata più difficile, e perché.

2.6 L'analisi dimensionale

2.6.1 Le dimensioni di una grandezza

Ogni grandezza della meccanica si può esprimere a partire da tre grandezze fondamentali: lunghezza, massa e tempo. Le loro **dimensioni** si indicano con lettere maiuscole tra parentesi quadre: [L] per la lunghezza, [M] per la massa, [T] per il tempo. Le dimensioni di una grandezza derivata dicono **come** essa è costruita dalle fondamentali, indipendentemente dall'unità scelta. Un'area, che sia misurata in m^2, in cm^2 o in ettari, è sempre il prodotto di due lunghezze: le sue dimensioni sono [L^2].

Tabella 2.6 Dimensioni di alcune grandezze.

Grandezza	Definizione	Dimensioni	Unità SI
area	lunghezza × lunghezza	$[L^2]$	m^2
volume	lunghezza^3	$[L^3]$	m^3
densità	massa / volume	$[M] / [L^3] = [M \cdot L^{-3}]$	kg/m^3
velocità	lunghezza / tempo	$[L \cdot T^{-1}]$	m/s
accelerazione	velocità / tempo	$[L \cdot T^{-2}]$	m/s^2
numero puro (2, π, ...)	—	adimensionale	—

2.6.2 Controllare una formula

L'**analisi dimensionale** è il controllo delle dimensioni delle grandezze che compaiono in una formula. Si basa su due regole, che discendono direttamente dal concetto di grandezze omogenee.

1. Si possono sommare, sottrarre e uguagliare solo grandezze con le **stesse dimensioni**. «3 m + 2 s» non ha significato.
2. Quindi i due membri di un'uguaglianza devono avere le stesse dimensioni: un'equazione fisica deve essere **dimensionalmente omogenea**.

I numeri puri, come 2, 1/3 o π, non hanno dimensioni e non contano nel controllo. Se una formula non supera l'analisi dimensionale è certamente sbagliata. Se la supera, invece, non è detto che sia giusta: l'analisi dimensionale non può accorgersi di un fattore numerico sbagliato, per esempio di un 2 dimenticato.

ESEMPIO SVOLTO

Volume o superficie?

Marta ricorda che il volume di una sfera di raggio r è «$4\pi r^2$», Luca che è «$\frac{4}{3}\pi r^3$». Chi ha ragione?

Un volume ha dimensioni $[L^3]$. Nella formula di Marta 4 e π sono numeri puri e r^2 ha dimensioni $[L^2]$: il secondo membro è una superficie, non un volume. La formula di Marta è **sbagliata** (in effetti $4\pi r^2$ è l'area della superficie sferica). Nella formula di Luca il secondo membro ha dimensioni $[L^3]$: è **dimensionalmente corretta**, e infatti è giusta.

Un secondo controllo. Il tempo per percorrere una distanza s alla velocità costante v è $t = s/v$ oppure $t = v/s$? Per la prima: $[L] / [L \cdot T^{-1}] = [T]$, un tempo ✔. Per la seconda: $[L \cdot T^{-1}] / [L] = [T^{-1}]$, che non è un tempo ✘.

L'analisi dimensionale è uno strumento che i fisici usano continuamente, anche per controllare i risultati numerici: se alla fine di un esercizio che chiedeva una massa trovi un risultato in m^3, sai subito che qualcosa non va, senza neppure rifare i calcoli. Prendi l'abitudine di portarti dietro le unità in ogni passaggio: è il modo più semplice di fare analisi dimensionale senza accorgertene.

IN SINTESI

Misura = numero + unità: «quante volte» l'unità è contenuta nella grandezza.

Volumi: 1 L = 1 dm^3 = 1000 cm^3; 1 mL = 1 cm^3; 1 m^3 = 1000 L. **Aree:** 1 m^2 = 10 000 cm^2. Per le aree il fattore lineare va al quadrato, per i volumi al cubo.

Tempo: 1 h = 3600 s. **Velocità:** da km/h a m/s si divide per 3,6.

Densità: $d = m/V$ (massa contenuta nell'unità di volume); $m = d \cdot V$; $V = m/d$. Unità: kg/m^3; 1 g/cm^3 = 1000 kg/m^3.

Analisi dimensionale: i due membri di un'equazione fisica devono avere le stesse dimensioni, costruite da [L], [M], [T].

SINTESI

- Una grandezza fisica è una proprietà misurabile; la si definisce in modo operativo, descrivendo come misurarla.
- Misurare significa confrontare con un'unità omogenea; la misura è formata da un numero e da un'unità.
- Il SI ha sette grandezze fondamentali; in meccanica bastano lunghezza (m), massa (kg) e tempo (s). Le altre grandezze sono derivate.
- Dal 20 maggio 2019 le unità SI sono definite fissando il valore esatto di costanti della natura: il secondo dal cesio-133, il metro dalla velocità della luce, il chilogrammo dalla costante di Planck.
- I simboli SI non hanno punto né plurale, sono separati dal numero da uno spazio e rispettano maiuscole e minuscole (kg, non Kg).
- I prefissi moltiplicano l'unità per potenze di dieci; le conversioni si fanno con fattori di conversione, che valgono 1.
- Per aree e volumi il fattore lineare si eleva al quadrato o al cubo: $1\ \text{m}^2 = 10^4\ \text{cm}^2$, $1\ \text{m}^3 = 10^6\ \text{cm}^3 = 1000\ \text{L}$.
- La massa (kg) misura la quantità di materia e si confronta con la bilancia a bracci uguali; non va confusa con il peso.
- Il tempo si misura contando i periodi di fenomeni periodici; 1 h = 3600 s e 1 m/s = 3,6 km/h.
- La densità $d = m/V$ è caratteristica della sostanza; $1\ \text{g/cm}^3 = 1000\ \text{kg/m}^3$. Nel grafico m–V è il rapporto costante, cioè la ripidità della retta.
- Un'equazione fisica deve essere dimensionalmente omogenea; l'analisi dimensionale scopre molti errori, ma non i fattori numerici sbagliati.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale tra queste **non** è una grandezza fisica?
   - **A.** la lunghezza di un banco
   - **B.** la bellezza di un quadro
   - **C.** la massa di una mela
   - **D.** la durata di una lezione

2. ● Quante sono le grandezze fondamentali del Sistema Internazionale?
   A. 3
   B. 5
   C. 6
   D. 7

3. ● Qual è la scrittura corretta del simbolo del chilometro?
   A. Km
   B. km.
   C. km
   D. kms

4. ●● Un metro cubo equivale a:
   A. 1000 L
   B. 100 L
   C. 10 L
   D. 1 000 000 L

5. ●● Il prefisso micro (μ) corrisponde a un fattore:
   A. 10^{-3}
   B. 10^{-6}
   C. 10^{-9}
   D. 10^{6}

6. ●● Dal 20 maggio 2019 il chilogrammo è definito:
   A. dal cilindro di platino e iridio conservato a Sèvres
   B. dalla massa di un decimetro cubo d'acqua
   C. fissando il valore esatto della costante di Planck
   D. dalla frequenza di una transizione del cesio-133

7. ●● Due cubi hanno la stessa massa: uno è di alluminio, l'altro di ferro. Quale affermazione è corretta?
   A. Hanno lo stesso volume.
   B. Il cubo di ferro ha volume maggiore.
   C. Dipende dalla forma dei cubi.
   D. Il cubo di alluminio ha volume maggiore.

8. ● Una densità di 1 g/cm^3 equivale a:
   A. 1000 kg/m^3
   B. 100 kg/m^3
   C. 10 kg/m^3
   D. 1 kg/m^3

9. ●●● Se s è una lunghezza, v una velocità e t un tempo, quale formula è dimensionalmente corretta?

   A. $s = v/t$

   B. $s = v \cdot t$

   C. $s = v \cdot t^2$

   D. $s = v + t$

Vero o falso

10. ● Una proprietà è una grandezza fisica se si può descrivere un procedimento per misurarla. V / F

11. ● La massa e il peso si misurano entrambi in chilogrammi. V / F

12. ●● $1\ m^2 = 100\ cm^2$. V / F

13. ●● La densità di un oggetto di ferro dipende dalla sua forma e dalla sua massa. V / F

14. ● L'espressione «3 m + 2 s» non ha significato fisico. V / F

Applicare

15. ● Converti in metri: 3,5 km; 250 mm; 45 cm.

16. ● Converti in chilogrammi: 750 g; 2,4 t; 35 mg.

17. ● Esprimi in secondi una durata di 2 h 15 min.

18. ●● Converti 1,5 L in cm^3 e in m^3; converti 250 mL in litri.

19. ●● Converti 3,2 m^2 in cm^2 e 450 cm^2 in m^2.

20. ● Un cubetto di rame ha massa 89,6 g e volume 10,0 cm^3. Calcola la sua densità in g/cm^3 e in kg/m^3.

21. ●●● Usa i punti evidenziati sulle rette B e C della Figura 2.6 per calcolare la densità delle due sostanze, poi riconoscile con la Tabella 2.4. Spiega perché la retta B è più ripida della retta C.

22. ● Completa: la densità dell'acqua è _____ kg/m^3, cioè _____ g/cm^3; quindi 1 L d'acqua ha massa di circa _____ .

Problemi

23. ● Un lingotto d'oro ha volume 50,0 cm^3. Qual è la sua massa? (Usa la Tabella 2.4.)

24. ●● Una bottiglia vuota ha massa 320 g; riempita con 1,00 L di olio, ha massa 1,23 kg. Calcola la densità dell'olio in g/cm^3 e in kg/m^3.

25. ●● Una piscina rettangolare misura 25,0 m × 10,0 m ed è profonda 1,80 m in ogni punto. Calcola il volume dell'acqua in m^3 e in litri, e la sua massa in kg e in tonnellate.

26. ●●● Una lastra di vetro misura 1,20 m × 0,80 m e ha uno spessore di 4,0 mm. Calcola la sua massa ($d_{\text{vetro}} = 2500\ \text{kg/m}^3$).

27. ●● Un ciclista percorre 18 km in 45 min. Calcola la sua velocità media in km/h e in m/s (velocità media = distanza percorsa / tempo impiegato).

28. ●●● Un cubo di metallo ha il lato di 3,00 cm e massa 242 g. Calcola la densità e usa la Tabella 2.4 per capire di quale metallo si tratta.

29. ●●● Una matassa di filo di rame ($d = 8960\ \text{kg/m}^3$) ha massa 1,00 kg. La sezione del filo ha area 1,00 mm^2. Quanto è lungo il filo? (Suggerimento: il filo è un cilindro molto lungo, con volume = area della sezione × lunghezza.)

Ragionare e argomentare

30. ●● *Trova l'errore.* Uno studente deve convertire 2,5 m^3 in litri e scrive: «2,5 m^3 = 2,5 × 1000 cm^3 = 2500 cm^3 = 2,5 L». Individua l'errore e scrivi la conversione corretta.

31. ●●● Un compagno ricorda tre formule per il volume V di un cilindro di raggio r e altezza h: $V = \pi r h$, $V = \pi r^2 h$, $V = 2\pi r + h$. Usa l'analisi dimensionale per scartare quelle sbagliate. L'analisi dimensionale basta a dimostrare che la formula rimasta è giusta?

32. ●● Progetta un esperimento per misurare la densità del latte avendo a disposizione una bilancia elettronica e un cilindro graduato. Elenca i passaggi e le grandezze da misurare, e scrivi come calcoli il risultato.

PER APPROFONDIRE

- [BIPM] la «brochure SI», testo ufficiale con le definizioni del 2019 e le regole di scrittura delle unità.
- [FEY] *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sul tempo e sulla distanza, per vedere come un grande fisico ragiona sulla misura.
- [HEW] Hewitt, *Conceptual Physics*: introduzione intuitiva a massa, volume e densità.
- [HRW] Halliday, Resnick, Walker, *Fondamenti di fisica*: il primo capitolo, su misure e unità.

Glossario del capitolo

Analisi dimensionale
Controllo delle dimensioni delle grandezze in una formula, per verificare che i due membri siano omogenei.

Bilancia a bracci uguali
Strumento che misura la massa per confronto: è in equilibrio quando la massa dell'oggetto è uguale a quella delle masse campione.

Definizione operativa
Definizione di una grandezza che descrive il procedimento con cui misurarla: strumento, modalità d'uso, lettura del risultato.

Densità
Rapporto tra la massa e il volume di un campione di una sostanza, $d = m/V$; unità SI: kg/m^3 ($1\ g/cm^3 = 1000\ kg/m^3$).

Dimensioni
Modo in cui una grandezza è costruita dalle fondamentali, indicato con [L], [M], [T]; per esempio la densità ha dimensioni $[M \cdot L^{-3}]$.

Equazione dimensionalmente omogenea
Equazione i cui due membri hanno le stesse dimensioni: condizione necessaria, ma non sufficiente, perché una formula fisica sia corretta.

Fattore di conversione
Frazione uguale a 1 che ha al numeratore e al denominatore la stessa grandezza in unità diverse, per esempio (1000 m)/(1 km).

Fenomeno periodico
Fenomeno che si ripete uguale a intervalli regolari; la durata di una ripetizione è il periodo. Sui fenomeni periodici si basano gli orologi.

Grandezza fisica
Proprietà di un corpo o di un fenomeno che si può misurare con un procedimento definito.

Grandezze derivate
Grandezze che si ottengono dalle fondamentali con moltiplicazioni e divisioni, come area, volume, densità, velocità.

Grandezze fondamentali
Grandezze scelte come base di un sistema di unità; nel SI sono sette, tra cui lunghezza, massa e tempo.

Grandezze omogenee
Grandezze della stessa specie (per esempio due lunghezze), che si possono confrontare, sommare e sottrarre.

Litro
Unità di volume non SI ammessa: $1\ L = 1\ dm^3 = 1000\ cm^3$; $1\ mL = 1\ cm^3$.

Lunghezza
Grandezza che misura la distanza tra due punti; unità SI: metro (m).

Massa
Grandezza che esprime la quantità di materia di un corpo; unità SI: chilogrammo (kg). Non va confusa con il peso.

Misura
Risultato di una misurazione: un numero, che dice quante volte l'unità è contenuta nella grandezza, accompagnato dall'unità.

Prefisso
Parola (e simbolo) che, posta davanti a un'unità, la moltiplica per una potenza di dieci: chilo (k) = 1000, milli (m) = 0,001.

Sistema Internazionale (SI)
Sistema di unità di misura adottato nel 1960 e oggi usato in quasi tutto il mondo; dal 2019 le sue unità sono definite da costanti della natura.

Tempo
Grandezza che misura la durata di un fenomeno; unità SI: secondo (s).

Unità di misura
Grandezza di riferimento, scelta per convenzione, con cui si confrontano le grandezze omogenee a essa.

Soluzioni

1. B. La bellezza è un giudizio soggettivo: non esiste un procedimento di misura che dia a tutti lo stesso numero.

2. D. Lunghezza, massa, tempo, corrente elettrica, temperatura, quantità di sostanza, intensità luminosa.

3. C. km: k minuscola (K è il kelvin), senza punto e senza plurale.

4. A. 1 m^3 = 1000 dm^3 e 1 dm^3 = 1 L, quindi 1 m^3 = 1000 L.

5. B. micro = 10^{-6} = 0,000 001.

6. C. Dal 20 maggio 2019 il chilogrammo è definito fissando il valore esatto della costante di Planck *h*; il cesio (D) definisce il secondo.

7. D. A parità di massa ha volume maggiore la sostanza meno densa: l'alluminio (2700 kg/m^3) è meno denso del ferro (7870 kg/m^3).

8. A. 1 g/cm^3 = (0,001 kg)/(0,000 001 m^3) = 1000 kg/m^3.

9. B. $[L \cdot T^{-1}] \cdot [T] = [L]$. A dà $[L \cdot T^{-2}]$, C dà $[L \cdot T]$, D somma grandezze non omogenee.

10. V. È proprio l'idea di definizione operativa.

11. F. Il kg è l'unità della massa; il peso è una forza e si misura in newton (cap. 7).

12. F. 1 m^2 = $(100\ cm)^2$ = 10 000 cm^2.

13. F. La densità è una proprietà della sostanza: non dipende né dalla forma né dalla massa del campione.

14. V. Si possono sommare solo grandezze omogenee; una lunghezza e un tempo non lo sono.

15. 3,5 km = 3500 m; 250 mm = 0,250 m; 45 cm = 0,45 m.

16. 750 g = 0,750 kg; 2,4 t = 2400 kg; 35 mg = 0,035 g = 0,000 035 kg.

17. 2 h = 7200 s; 15 min = 900 s; totale 8100 s.

18. 1,5 L = 1500 cm^3 = 0,0015 m^3 (1 m^3 = 1 000 000 cm^3); 250 mL = 0,250 L.

19. 3,2 m^2 × 10 000 = 32 000 cm^2; 450 cm^2 : 10 000 = 0,045 m^2.

20. $d = m/V$ = 89,6 g / 10,0 cm^3 = 8,96 g/cm^3 = 8960 kg/m^3.

21. B: d = 81 g / 30 cm^3 = 2,7 g/cm^3 → alluminio. C: d = 39,5 g / 50 cm^3 = 0,790 g/cm^3 → alcol etilico (0,789 g/cm^3). B è più ripida perché a parità di volume ha massa maggiore: il rapporto m/V, cioè la densità, è maggiore.

22. 1000 kg/m^3; 1,00 g/cm^3; circa 1 kg.

23. $m = d \cdot V$ = 19,3 g/cm^3 × 50,0 cm^3 = 965 g = 0,965 kg.

24. Massa dell'olio: 1230 g − 320 g = 910 g; V = 1,00 L = 1000 cm^3; d = 910 g / 1000 cm^3 = 0,910 g/cm^3 = 910 kg/m^3.

25. V = 25,0 m × 10,0 m × 1,80 m = 450 m^3 = 450 000 L; m = 1000 kg/m^3 × 450 m^3 = 450 000 kg = 450 t.

26. 4,0 mm = 0,0040 m; V = 1,20 m × 0,80 m × 0,0040 m = 0,003 84 m^3; m = 2500 kg/m^3 × 0,003 84 m^3 ≈ 9,6 kg.

27. 45 min = 0,75 h; v = 18 km / 0,75 h = 24 km/h; 24 : 3,6 ≈ 6,7 m/s.

28. V = $(3{,}00\ cm)^3$ = 27,0 cm^3; d = 242 g / 27,0 cm^3 ≈ 8,96 g/cm^3 = 8960 kg/m^3: è rame.

29. $V = m/d$ = 1,00 kg / 8960 kg/m^3 ≈ 0,000 112 m^3 (= 112 cm^3). S = 1,00 mm^2 = 0,000 001 00 m^2 (1 m^2 = 1 000 000 mm^2). Lunghezza = V/S ≈ 112 m.

30. L'errore è usare 1 m^3 = 1000 cm^3: in realtà 1 m^3 = $(100\ cm)^3$ = 1 000 000 cm^3. Corretto: 2,5 m^3 = 2 500 000 cm^3 = 2500 dm^3 = 2500 L.

31. Un volume ha dimensioni $[L^3]$. πrh ha dimensioni $[L^2]$ (è un'area): sbagliata. $2\pi r + h$ ha dimensioni [L] (è una lunghezza): sbagliata. $\pi r^2 h$ ha dimensioni $[L^3]$: è l'unica possibile (ed è quella giusta). L'analisi

dimensionale però non basta a dimostrarlo: anche $2\pi r^2 h$ avrebbe le dimensioni corrette, perché i fattori numerici non hanno dimensioni.

32. Traccia: 1) metto il cilindro graduato vuoto sulla bilancia e premo la tara; 2) verso latte fino a un volume noto, per esempio 100 mL, leggendo il menisco con l'occhio alla sua altezza; 3) leggo la massa m; 4) calcolo $d = m/V$ in g/cm^3 (1 mL = 1 cm^3) e lo converto in kg/m^3 moltiplicando per 1000; 5) ripeto con altri volumi (50 mL, 150 mL…) per controllare che il rapporto resti costante. Ci si aspetta un valore di poco superiore a 1 g/cm^3.