

# TEORIA DELLA MISURA

(Insieme delle regole e delle tecniche che conducono alla misura di grandezze fisiche)

Per operare nella realtà (è il compito degli ingegneri) è necessario descrivere i fenomeni in modo:

- **OGGETTIVO** (non dipendente dalle qualità, sensazioni e/o preconcezioni dell'osservatore)
- **INEQUIVOCABILE** (la valutazione di un osservatore deve essere comprensibile a tutti gli utilizzatori dell'osservazione)
- **RIPRODUCIBILE** (in ogni tempo e luogo la stessa osservazione dello stesso fenomeno deve produrre lo stesso risultato)

Per ottenere tale scopo occorre descrivere i fenomeni solo in termini di grandezze fisiche: entità suscettibili di valutazione quantitativa ed oggettiva, cioè di misurazione.

**Misurazione: determinazione di quante volte "g" la grandezza fisica in esame "G" "contiene" una grandezza di riferimento "[g]" ad essa omogenea**

G: grandezza fisica  
 g: misura  
 [g]: unità di misura

$$G = g [g]$$

Una grandezza viene detta grandezza fisica (g.f.) se è possibile specificare la serie di operazioni (**definizione operativa di g.f.**) che ne consente la misurazione. Pertanto nel momento in cui viene data la definizione operativa di una grandezza fisica viene anche stabilito come misurarla.

Si dicono **omogenee** quelle g.f. che hanno una stessa caratteristica misurabile: lunghezza di un righello, diametro di una circonferenza, altezza di un oggetto ...

È chiaro come per ottenere una grandezza [g] di riferimento occorrono delle convenzioni riconosciute e adottate a livello internazionale.

**Definita una g.f. è possibile effettuare la misura contando quante volte deve essere applicata l'operazione di somma  $\oplus$  all'unità [g] fino ad ottenere esattamente G<sup>(1)</sup>.**

## • CRITERI DI SCELTA PER LE UNITÀ DI MISURA

Ogni grandezza fisica, per essere misurata direttamente, richiede una unità di misura (e quindi un campione di unità di misura). La scelta è illimitata e dettata solo da motivi di praticità. Analizziamo alcuni criteri generali che possono guidare nella scelta delle unità di misura.

1) Analizziamo questa identità:  $1 \text{ m} = 5 \text{ dm} + 50 \text{ cm}$   
 essa è formalmente corretta ma poco pratica:  $1 \neq 5 + 50$   
 Generalizzando, se  $G(C) = G(A) \oplus G(B)$   
 da cui  $g(C) [C] = g(A) [A] + g(B) [B]$   
 generalmente si ha  $g(C) \neq g(A) + g(B)$   
 tuttavia se  $[A]=[B]=[C]$ , allora:  $g(C) = g(A) + g(B)$   
 questo è un **primo criterio di coerenza**

<sup>1</sup> Il simbolo  $\oplus$  definisce le operazioni materiali che portano alla somma di g.f.. Per esempio la somma della lunghezza di due righelli si ottiene allineandoli e ponendo l'estremità sinistra di uno a contatto con l'estremità destra dell'altro.

In base ad esso g.f. omogenee devono essere misurate utilizzando la stessa unità di misura e quindi, se si adottasse questo criterio, per poter misurare tutte le g.f. ci sarebbe bisogno di una sola unità di misura per ogni gruppo di g.f. omogenee.

2) Consideriamo la misurazione derivata della superficie di un rettangolo di area S e lati b e h

$$G(S) = G(b) \otimes G(h)$$

cioè<sup>(2)</sup>  $g(S) [S] = g(b) [b] \times g(h) [h]$

Adottando il precedente criterio di coerenza  $[b]=[h]=[L]$ , si ottiene:

$$g(S) [S] = g(b) [L] \times g(h) [L]$$

In questo caso, anziché scegliere per la misura della superficie una nuova unità di misura, conviene scegliere  $[S] = [L]^2$  così da ottenere:

$$g(S) = g(b) \times g(h)$$

**secondo criterio di coerenza:** conviene utilizzare per la misura di g.f. che sono funzione di altre, unità di misura espresse in termini di queste ultime

Per esempio  $3,6 \text{ km/h} = 1 \text{ m/1 s}$ , ma  $3,6 \neq 1/1$ : è preferibile in questo caso misurare le velocità in m/s.

**Quante unità di misura sono necessarie (fondamentali) per poter misurare tutte le g.f. ?**

Per studiare tutti<sup>(3)</sup> i fenomeni che riguardano la geometria avremo bisogno di poter misurare (e quindi dovremo definire le relative unità di misura e successivamente i relativi campioni di unità di misura):

**lunghezza [L]                      superficie [S]                      volume [V]**

Sappiamo però p.es. che l'area di un rettangolo è pari al prodotto di base per altezza e quella di un triangolo  $1/2$  base per altezza. Al di là del fattore numerico una superficie è pari al prodotto di due lunghezze e quindi, coerentemente, sceglieremo  $[S] = [L]^2$ .

Analogamente per il volume sceglieremo  $[V] = [L]^3$ .

Pertanto sarà sufficiente, per studiare la geometria definire una sola grandezza unitaria: le altre due possono essere ricavate a partire da questa.

Per studiare la cinematica dovremo poter misurare altre g.f.:

**tempo [T]                      frequenza [f]                      velocità [v]                      accelerazione [a]                      ... [...]**

Poiché tutte le grandezze introdotte sono ricavabili l'una dall'altra ricorrendo alle loro definizioni  $f=1/T$ ,  $v=s/t$ ,  $a=v/t$  ... è sufficiente, sfruttando la necessità di un sistema coerente, introdurre una sola grandezza fisica unitaria.

Analogamente per studiare la dinamica dovremo introdurre come g.f. fondamentale solo la massa o la forza o l'energia o altre grandezze meccaniche in quanto anche queste sono collegate le une alle altre da definizioni o leggi fisiche (p.es.  $F= m a$ ).

**Il numero di g.f. fondamentali è pari al numero delle g.f. totali diminuite del numero di relazioni geometriche, definizioni, leggi fisiche, etc. (relazioni base) che le correlano:**

$$N_{\text{fond.}} = N_{\text{g.f.}} - N_{\text{rel}}$$

<sup>2</sup> Il simbolo  $\otimes$  è stato introdotto in analogia con quello che definisce le operazioni materiali di somma  $\oplus$ .

<sup>3</sup> Nel campo della geometria esistono anche due quantità che a rigore non necessitano di unità di misura: l'angolo piano e l'angolo solido. Esse sono rispettivamente il rapporto fra un arco di circonferenza e il suo raggio ( $[L]/[L]$ ) e il rapporto fra una porzione di superficie sferica e il quadrato del suo raggio ( $[S]/[L]^2$ ). Per riconoscere queste due g.f. si utilizzano rispettivamente il radiante (rad) e lo steradiano (sr).

## • NOTAZIONI, EQUAZIONI E CALCOLO DIMENSIONALE

Utilizzando la notazione di Maxwell ogni g.f. può essere espressa in termini delle g.f. scelte come fondamentali; vediamo degli esempi:

- consideriamo la definizione di velocità:  $\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt}$ .

Questa relazione vettoriale corrisponde a tre relazioni scalari; esaminiamo una di queste:  $v_x = \frac{dx}{dt}$

(le altre si comporteranno allo stesso modo).

Essa altri non è che il rapporto fra una lunghezza e un tempo<sup>(4)</sup> e quindi coerentemente verrà misurata utilizzando l'unità di misura  $[v] = [L]/[T]$ .

Dalla relazione  $[v] = [L]/[T]$  si può ricavare immediatamente il **grado di omogeneità** delle grandezze coinvolte, infatti assumendo un'unità di lunghezza  $n_L$  volte più piccola, la misura di  $\vec{v}$  resta moltiplicata per  $n_L$ ; assumendo un'unità di tempo  $n_T$  volte più piccola, la misura di  $\vec{v}$  resta moltiplicata per  $n_T$ ; assumendo infine un'unità di massa  $n_M$  volte più piccola, la misura di  $\vec{v}$  non viene alterata. Ciò si esprime dicendo che una velocità ha una omogeneità di grado 1 rispetto alla lunghezza, di grado -1 rispetto al tempo e di grado 0 rispetto alla massa.

- Altro esempio: se le g.f. fondamentali scelte fossero lunghezza  $[L]$ , massa  $[M]$ , tempo  $[T]$ , temperatura  $[\theta]$  e carica elettrica  $[Q]$ , allora la forza  $[F]$  si esprimerebbe come:  $[F] = [L]^1 [M]^1 [T]^{-2} [\theta]^0 [Q]^0$  cioè la forza avrebbe grado di omogeneità 1 con la lunghezza e la massa, -2 con il tempo e 0 con la temperatura e la carica elettrica.

Infatti la legge  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$  indica che la forza ha omogeneità 1 sia con la massa che con l'accelerazione. Utilizzando la relazione  $a = d^2s/dt^2$  si ha  $[a] = [L]^1 [T]^{-2}$  e quindi il risultato.

Queste equazioni tra unità di misura si dicono **equazioni dimensionali**.

Grandezze fisiche omogenee hanno le stesse dimensioni e sono misurate confrontandole con la stessa unità di misura. Non è sempre vero il viceversa: grandezze di specie diversa possono risultare equidimensionate. Ne sono esempi la pressione e modulo di Young, capacità termica ed entropia, lavoro e momento di una coppia.

Oltre alle grandezze dimensionate esistono anche grandezze adimensionate. Nel sistema di unità di misura che adotteremo (il Sistema Internazionale) ne sono esempi gli angoli piani e solidi, l'indice di rifrazione, i rendimenti e in generale tutte le grandezze definite dal rapporto di grandezze equidimensionate (come ad esempio le costanti dielettriche relative o le permeabilità magnetiche relative).

Il **calcolo dimensionale** permette di condurre un'analisi qualitativa delle varie grandezze che compaiono nello studio dei fenomeni fisici valutando la natura delle grandezze che compaiono in una relazione algebrica, differenziale, vettoriale, ecc. facendo astrazione dal numero che esprime il "valore" delle grandezze.

**Condizione necessaria (ma non sufficiente) per la validità di una formula fisica è che le dimensioni dei due membri di un'equazione, o dei vari addendi di un polinomio, siano le stesse.**

Questo tipo di calcolo è estremamente rapido da effettuare ma si rivela uno strumento assai potente per verificare (in parte) la validità dei risultati ottenuti in qualsiasi tipo di indagine fisica.

<sup>4</sup> Il fatto che  $dx$  e  $dt$  siano quantità infinitesime non altera la sostanza del ragionamento

Sfuggono però a questo controllo dimensionale gli errori dovuti ad errati coefficienti numerici, o a confusione tra grandezze equidimensionate, o alla presenza di grandezze adimensionate.

Esempi/esercizi di calcolo dimensionale:

•  $m \ddot{x} + k x = m g \Rightarrow [m \ddot{x}] = [k x] = [m g] = [F] = [M]^1 [L]^1 [t]^{-2}$  : somma, sottrazione e uguaglianza sono possibili solo fra grandezze omogenee

• Se  $T = T_0 e^{-\alpha x}$ , sviluppando in serie di potenze si ha:  $T_0 e^{-\alpha x} = T_0 \sum_{n=0, \infty} \frac{(-\alpha x)^n}{n!} = T_0 [1 - \alpha x + \frac{(\alpha x)^2}{2} - \dots]$

e quindi  $[\alpha x]^n = 1 \rightarrow [\alpha x] = 1 \rightarrow [\alpha] = [x]^{-1}$  (gli argomenti di funzioni trascendenti, in quanto sviluppabili in serie di potenze, sono adimensionali)

•  $V(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi) = V_0 \cos[\omega(t + \tau)] \rightarrow [\omega t + \varphi] = [\omega(t + \tau)] = 1$  e da  $[\omega] = [t]^{-1} \rightarrow [\varphi] = 1$  e  $[\tau] = [t]$

• Ricavare il valore di  $n$  nell'espressione  $T = 2\pi(l/g)^n$  (periodo di oscillazione di un pendolo)

## • SISTEMI DI UNITÀ DI MISURA

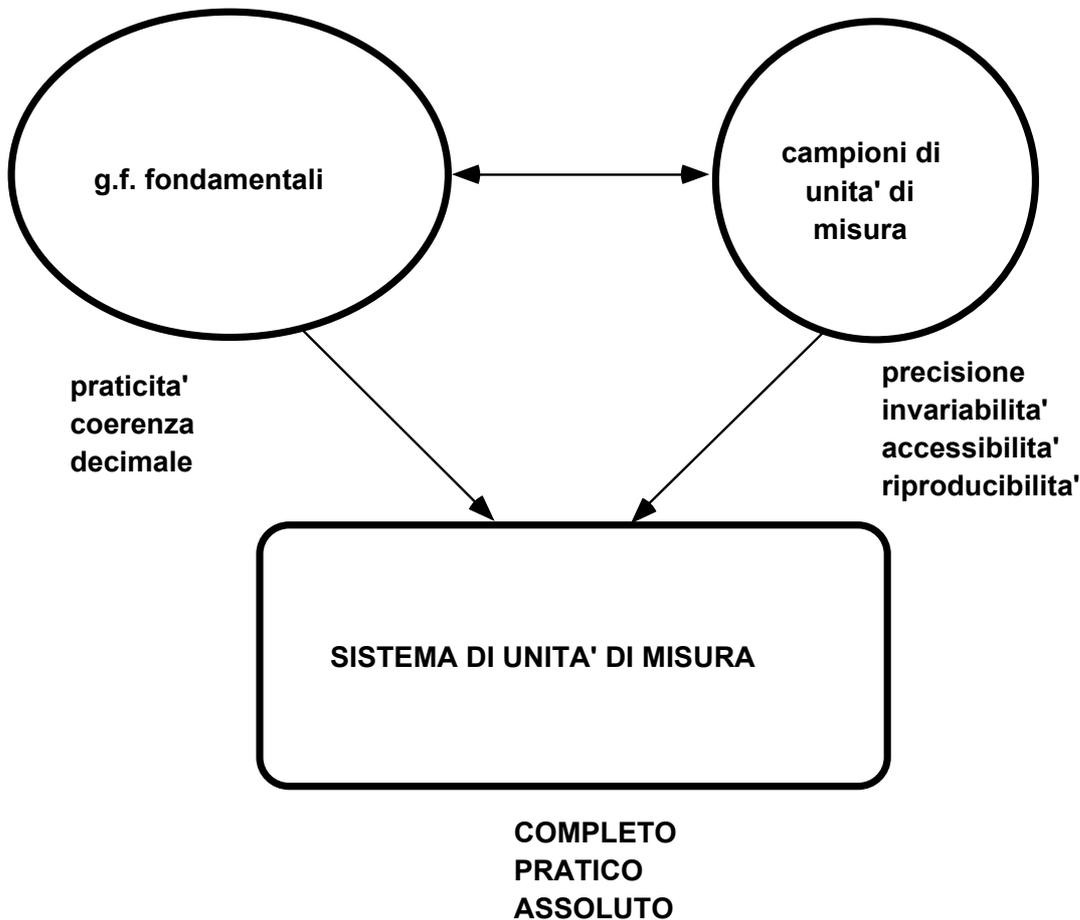
Prima di operare con misure sui fenomeni fisici è importante decidere quale sistema di unità di misura adottare. Infatti, a seconda della scelta, variano non solo i valori numerici dei risultati ma a volte anche la forma delle equazioni che descrivono le leggi fisiche.

Un sistema di unità di misura è caratterizzato dalle grandezze fisiche scelte come fondamentali, dalle eventuali convenzioni di coordinazione <sup>(5)</sup> e dai campioni di unità di misura.

È ispirato da criteri di praticità e deve risultare completo (deve consentire la misurazione di tutte le g.f.), assoluto (le misure non devono variare da luogo a luogo e al trascorrere del tempo).

La praticità si riflette nella scelta delle g.f. fondamentali (p.es. si preferisce la lunghezza alla superficie o al volume), nell'adozione dei criteri di coerenza e del sistema decimale per i multipli e sottomultipli.

L'assolutezza del sistema è invece garantita dalla scelta dei campioni di unità di misura che devono risultare precisi (il valore della loro misura non deve variare da una misurazione all'altra) e invariabili nel tempo e nello spazio. Anche i campioni di unità di misura devono risultare pratici e quindi devono essere o accessibili (presso le opportune istituzioni Nazionali e/o Internazionali) o riproducibili in laboratorio.



**Sistema Internazionale (S.I.) - In Italia legge del 1982**

<sup>5</sup> Si tratta di relazioni fra g.f. scelte convenzionalmente in alcuni settori per motivi di praticità. Per esempio porre la velocità della luce nel vuoto pari al valore adimensionato 1 semplifica i calcoli di cinematica relativistica ma impedisce la verifica dimensionale dei risultati.

Il sistema di unità di misura che oggi meglio risponde a queste esigenze è il Sistema Internazionale (SI). Il D.P.R. 12 agosto 1982 n. 802, specificando le norme per l'attuazione della direttiva CEE n. 80/181 relativa alle unità di misura, obbliga l'uso del SI.

Anche se adotteremo il SI è bene ricordare che molti testi, anche recenti, utilizzano sistemi di unità di misura differenti (spesso il vecchio M.K.S.A) ormai non più consentiti dalla legge.

## Definizioni

Grandezza misurabile (grandezza fisica):

attributo di un fenomeno, corpo o sostanza che può essere distinto qualitativamente e determinato quantitativamente.

P.es.: lunghezza, tempo, massa, temperatura, resistenza elettrica.

Le grandezze che possono essere poste in ordine di grandezza relativo sono grandezze dello stesso tipo (omogenee); esse possono essere raggruppate per categorie:

P.es.: lavoro, calore, energia; spessore, circonferenza, lunghezza d'onda.

Grandezza fondamentale:

una delle grandezze che in un sistema di unità di misura sono convenzionalmente accettate come funzionalmente indipendenti dalle altre.

Nel SI alcune grandezze fondamentali sono lunghezza, tempo, massa, temperatura.

Per ogni grandezza fondamentale è necessario stabilire convenzionalmente un'unità di misura; ad ogni unità di misura deve corrispondere un campione di unità.

Grandezza derivata:

grandezza definita in un sistema di unità come funzione delle grandezze fondamentali di quel sistema.

P.es. nel SI la velocità è una grandezza derivata da lunghezza e tempo.

Dimensione di una grandezza:

espressione che rappresenta una grandezza di un sistema di unità come prodotto di potenze di fattori (detti dimensioni) che rappresentano le grandezze fondamentali di quel sistema.

P.es. nel SI la dimensione della forza è  $[L][M][T]^{-2}$  e  $[L]^2[M][T]^{-2}$  è la dimensione dell'energia, del calore, del momento di una forza.

Condizione necessaria (ma non sufficiente) affinché una relazione fra grandezze fisiche sia corretta è che le dimensioni delle grandezze unite dalla relazione di uguaglianza o dalle operazioni di somma o sottrazione siano le stesse:

p.es.:  $E = m g h + 1/2 m v^2$ ; i 3 termini hanno le dimensioni  $[L]^2[M][T]^{-2}$ .

Gli argomenti di funzioni sviluppabili in serie di potenze (p.es.  $e^x$ ,  $\sin(x)$ ,  $\log(x)$ ,  $\sinh(x)$ , ...) hanno sempre dimensione 1.

Grandezza di dimensione 1 (adimensionale, numero puro):

per esempio: angolo piano, angolo solido, indice di rifrazione, costante dielettrica relativa, numero di Mach.

Unità di misura:

quantità particolare che convenzionalmente è stata adottata come la quantità alla quale vanno comparate le altre grandezze dello stesso tipo per esprimerne la grandezza relativa.

Simbolo di una unità di misura:

segno convenzionale che designa una unità di misura; p.es.: m per metro, K per kelvin, A per ampere, V per volt, W per watt.

I nomi di tutte le unità di misura sono nomi comuni privi di accento e vanno scritti con l'iniziale minuscola; sono invariabili al plurale con l'eccezione di: metro, chilogrammo, secondo, candela, mole, radiante e steradiante.

I simboli delle unità vanno scritti con la maiuscola quando il nome dell'unità è derivato da un nome proprio; minuscola negli altri casi.

Quando l'unità di misura non è accompagnata dal valore numerico deve essere scritta per esteso e non con il simbolo.

Indipendentemente dal testo in cui sono inseriti, i simboli vanno scritti in caratteri verticali lasciando uno spazio fra il valore e l'unità (p.es. 5,4 mA e non 5,4mA o 5,4 mA ); non devono mai essere seguiti dal punto di abbreviazione.

#### Sistema di unità di misura:

insieme di unità fondamentali e unità derivate definito seguendo le regole assegnate per un sistema di grandezze assegnato; per esempio: c.g.s., M.K.S.A., S.I.

Un sistema di unità è coerente se tutte le unità derivate sono coerenti; cioè sono espresse come prodotto di potenze di unità fondamentali.

P.es:  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ ;  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$ ;  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ;  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$

#### Campione (di unità di misura):

materiale o sistema di misura destinato a definire, realizzare, conservare o riprodurre una unità di grandezza per servire da riferimento.

Non appena la tecnologia consente di utilizzare un fenomeno in modo più stabile e riproducibile che in precedenza, si cerca di utilizzarlo per definire un nuovo campione di unità di misura (per un nuovo sistema di unità di misura). Il suo valore, per ovvi motivi di praticità, non dovrà discostarsi dalla vecchia unità di misura per più della sua riproducibilità.

#### Campione (primario e secondario):

il campione (primario) è designato o largamente accettato come avente le più alte qualità metrologiche; il suo valore è stabilito senza riferimento ad altri campioni della stessa specie; può riferirsi indifferentemente a grandezze fondamentali o derivate.

Il campione secondario è un campione il cui valore è determinato per confronto col campione primario della stessa grandezza.

#### Tracciabilità:

proprietà di un campione o del risultato di una misura di essere rapportabile ai campioni locali, nazionali o internazionali mediante una catena ininterrotta di confronti effettuati con incertezze determinate.

I campioni secondari e/o quelli ottenuti a partire da questi ultimi non hanno lo stesso grado di riproducibilità del campione primario: si pensi al campione di lunghezza che da un lato richiede un orologio atomico per sfruttare la definizione di "metro campione" e dall'altro, per poter essere utilizzato, p.es. per la graduazione di un regolo, deve consentire la segnatura di due tacche a distanza di un metro ed è quindi soggetto a dilatazioni termiche, vibrazioni, problemi di planarità, etc. I campioni primari vengono utilizzati rarissimamente: la quasi totalità delle misurazioni tecniche e scientifiche non richiede quella riproducibilità garantita solo dal campione primario.

Sistema Internazionale di unità di misura SI: norma CNR-UNI 10003

sistema coerente basato su 7 unità fondamentali:

grandezza [simbolo <sup>(6)</sup> ]	unità	simbolo dell'unità
lunghezza [L]	metro	m
massa [M]	chilogrammo	kg
tempo [T]	secondo	s
corrente elettrica [I]	ampere	A
temperatura termodinamica [θ]	kelvin	K
quantità di sostanza	mole	mol
intensità luminosa	candela	cd

Campioni delle unità di misura del SI:

**lunghezza: metro (m)**

*Lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di 1/299 792 458 di secondo*

Prima dell'attuale definizione (XVII Conferenza Generale Pesi e Misure –1983) che è parte integrante del S.I. il metro ha avuto le seguenti definizioni:

- **quarantamilionesima parte del meridiano terrestre** (più precisamente la decimilionesima parte della distanza fra il polo della Terra e l'equatore lungo il meridiano passante per Parigi) - la definizione di Laplace-Lagrange risale al 1791)
- **distanza fra due incisioni su di una sbarra di platino-iridio** (conservata nel Bureau International des Poids et Mesures a Sèvres, presso Parigi). La definizione, adottata nel settembre 1889 dalla Prima Conferenza Internazionale di Pesi e Misure, scaturì dalla necessità di fare riferimento a campioni concreti. La riproducibilità di questo campione era di  $0,2 \mu\text{m}/\text{m} = 2 \times 10^{-7}$
- **lunghezza pari a 1 650 763,73 lunghezze d'onda nel vuoto della riga rosso-arancio del kripton 86**. La definizione (XI CGPM - 1960) è parte integrante del vecchio sistema M.K.S.A (La riproducibilità di questo campione era di  $1 \text{ nm}/\text{m} = 10^{-9}$ )

La definizione del metro campione di lunghezza si basa sulla costanza della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto. Nel S.I. tale velocità è per definizione  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ . La riproducibilità del campione di lunghezza coincide, quindi, con quella del campione del secondo  $\Delta L/(L_{\text{metro}}) = \Delta T/(T_{\text{secondo}}) = 10^{-12}$

**massa: chilogrammo (kg)**

*Massa del prototipo internazionale conservato al Pavillon de Breteuil (Sèvres - Francia)*

La definizione (III CGPM – 1901) si riferisce a un cilindro di platino – iridio (90%-10%) alto circa 39 mm e di diametro circa 39 mm. Per il suo utilizzo (confronto con prototipi di campioni secondari) viene impiegata una bilancia (della portata di un chilogrammo) sensibile ai  $10 \mu\text{g}$  che garantisce una riproducibilità  $\Delta M/(M_{\text{chilogrammo}}) = 10 \mu\text{g}/1 \text{ kg} = 10^{-8}$ .

Quello di massa è il campione di unità di misura del S.I. più antico. Si attende una minore incertezza nella determinazione del numero di Avogadro ( $N = 6,022\,045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) per definire un nuovo campione di massa.

<sup>6</sup> Per i simboli delle grandezze fisiche non esiste una convenzione; siete liberi di scegliere la notazione che preferite facendo però molta attenzione: ad esempio con [L] si può indicare una lunghezza ma anche lavoro, momento angolare, induttanza ...

**tempo: secondo (s)**

*Durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo del cesio 133*

Prima dell'attuale definizione del secondo (XIII CGPM – 1967) le precedenti si basavano sulla periodicità del moto terrestre:

- **86400-esima parte del giorno solare medio**, cioè della media sulla base di un anno del **giorno solare**, inteso come intervallo di tempo che intercorre tra due successivi passaggi del Sole sullo stesso meridiano (86 400 = 24 ore/giorno x 60 min/ora x 60 s/min)
- **secondo dell'effemeride** è 1/31 556 925,974 dell'**anno tropico 1900** (intervallo di tempo fra due equinozi di primavera).

Le due unità di misura del secondo erano coincidenti nel 1900, ma ora non lo sono più, a causa delle anomalie nella velocità di rotazione della Terra.

Successivamente la definizione si basò sull'**orologio ad ammoniaca** che sfrutta la costanza della frequenza delle vibrazioni dell'atomo<sup>(7)</sup> di azoto rispetto al piano degli atomi di idrogeno (23,87 GHz).

La riproducibilità del campione di secondo è  $\Delta T/(T_{secondo}) = 10^{-12}$ .

**temperatura termodinamica: kelvin (K)**

*Frazione 1/273,16 della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua*

(XIII CGPM – 1967) Il punto termodinamico dove coesistono le tre fasi solida, liquida e gassosa dell'acqua è alla temperatura di  $-0,01$  °C e alla pressione di 4,58 mm<sub>Hg</sub>.

Con questa definizione l'acqua distillata solidifica, alla pressione atmosferica, a 0,01 K.

La riproducibilità del campione è  $\Delta \theta/(\theta_{kelvin}) = 2 \times 10^{-7}$ .

**intensità di corrente: ampere (A)**

*Intensità di una corrente elettrica costante che, percorrendo due conduttori rettilinei, paralleli, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile, posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro nel vuoto, produrrebbe fra questi conduttori una forza pari a  $2 \times 10^{-7}$  N su ogni metro di lunghezza*

(IX CGPM- 1948) La definizione è astratta. Con le opportune precauzioni è tuttavia possibile approssimare sufficientemente le richieste di conduttori rettilinei, paralleli, di lunghezza infinita e sezione nulla della definizione: il campione è riproducibile a  $\Delta I/(I_{kampere}) = 4 \times 10^{-6}$ . Per altre grandezze elettriche (non fondamentali) sono disponibili campioni più riproducibili.

**quantità di materia: mole (mol)**

*Quantità di materia di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12. Le entità elementari debbono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, altre particelle, ovvero gruppi specificati di tali particelle*

(XIV CGPM – 1971)

**intensità luminosa: candela (cd)**

*Intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  Hz e la cui intensità energetica in tale direzione è  $1/683$  W/sr*

(XVI CGPM – 1979) La frequenza di 540 THz corrisponde, nel vuoto, alla lunghezza d'onda  $\lambda = 555$  nm (colore giallo) che è al massimo della sensibilità spettrale dell'occhio umano.

<sup>7</sup> Per questo motivo questi strumenti vengono detti orologi atomici: il loro periodo di oscillazione è legato ad una particolare vibrazione di un sistema atomico.

Unità derivate:

alcune unità derivate hanno nomi e simboli speciali; ad esempio:

grandezza derivata	unità di misura	simbolo	equivalenza
angolo piano	radiante	rad	1 rad = 1 m/m
angolo solido	steradiane	sr	1 sr = 1 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
frequenza	Hertz	Hz	1 Hz = 1/s
Forza	newton	N	1 N = 1 kg m/s <sup>2</sup>
Pressione	pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
energia, lavoro, calore	joule <sup>(8)</sup>	J	1 J = 1 N m
Potenza	Watt	W	1 W = 1 J/s
carica elettrica	coulomb	C	1 C = 1 A s
potenziale, f.e.m.	Volt	V	1 V = 1 J/C
resistenza elettrica	Ohm	Ω	1 Ω = 1 V/A
flusso magnetico	weber	Wb	1 Wb= 1 V s
induzione magnetica	tesla	T	1 T = 1 Wb/m <sup>2</sup>
capacità elettrica	Farad	F	1 F = 1 C/V
Induttanza	Henry	H	1 H = 1 Wb/A
flusso luminoso	lumen	lm	1 lm = 1 cd sr
Illuminamento	Lux	lx	1 lx = 1 lm/m <sup>2</sup>

Prefissi per indicare multipli e sottomultipli:

femto	f	10 <sup>-15</sup>	peta	P	10 <sup>+15</sup>
pico	p	10 <sup>-12</sup>	tera	T	10 <sup>+12</sup>
nano	n	10 <sup>-9</sup>	giga	G	10 <sup>+9</sup>
micro	μ	10 <sup>-6</sup>	mega	M	10 <sup>+6</sup>
milli	m	10 <sup>-3</sup>	chilo	k	10 <sup>+3</sup>

Notazioni:

Seguendo lo stile dei documenti I.S.O. per marcare la parte decimale di un numero viene utilizzata la virgola e non il punto.

Non può essere usato più di un prefisso.

Per le misure di massa i multipli e sottomultipli vanno riferiti al grammo e non al chilogrammo: mg per milligrammo e non μkg.

Occorre prestare attenzione nei casi in cui un prefisso può essere confuso con una unità; ad esempio: mK = millikelvin; Km = kelvin x metro; km = chilometro; MK= megakelvin.

È opportuno scegliere i prefissi in modo da ottenere valori compresi fra 0,1 e 1 000.

In una tabella va usato un solo prefisso per colonna anche se i valori escono dall'intervallo compreso fra 0,1 e 1 000.

Unità non SI:

minuto (min) ora (h) giorno (d)

1 miglio nautico internazionale = 1 852 m

1 miglionautico/h = 1 knot = 0,514 444 m/s

1 km/h = 1/3,6 m/s

1 bar = 10<sup>5</sup> Pa

1 kWh = 3,6 MJ

1 Ah = 3,6 kC

1 t (tonnellata)= 1 000 kg

<sup>8</sup> Si raccomanda la pronuncia "giul"

**Unità non SI da evitare (anche se ancora di uso comune)**

1" ( 1 inch) = 25,4 mm      1 ft = 12" = 0,304 8 m      1 yd = 3 ft = 0,914 4 m  
 1 kg<sub>f</sub> (chilogrammo forza) = 1 kg<sub>p</sub> (chilogrammo peso) = 9,806 65 N  
 1 atm (atmosfera standard) = 101,325 kPa = 1,013 25 bar  
 1 at (atmosfera tecnica) = 98,066 5 kPa = 0,980 665 bar  
 1 mmHg = 1 Torr = 1,333 22 mbar = 133,322 Pa  
 1 cal = 4,186 8 J      1 Cal = 4,186 8 kJ  
 1 HP = 735,498 75 W      1 CV = 75 kgm/s      1 kgm/s = 9,806 65 W

**• FATTORI DI RAGGUAGLIO**

Supponiamo di avere ottenuto la misura di una grandezza G in un sistema di unità di misura iniziale mediante confronto con l'unità [U<sub>i</sub>] e di voler trasformare la misura in quella che si otterrebbe adottando il sistema di unità finale con l'unità [U<sub>f</sub>].

Poiché, ovviamente,  $G = g_i [U_i] = g_f [U_f]$ , si ottiene  $g_f = g_i [U_i] / [U_f]$ .

Quindi per trasformare il risultato è sufficiente moltiplicare il valore numerico della misura g<sub>i</sub> per il fattore di ragguaglio  $\tau = [U_i] / [U_f]$ :

$$A \text{ quanti m/s corrispondono } 72 \text{ km/h ? } \tau = \frac{1 \text{ km}}{1 \text{ m}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ s}} = \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ m}} = \frac{1}{3,6}; \text{ e quindi } 72 \times 1/3,6 = 20 \text{ m/s.}$$