

4

Caratteristiche metrologiche degli strumenti di misura

4.1. Caratteristiche metrologiche di un apparecchio

4.1.1. Introduzione. Ogni mezzo, ogni apparecchio, ogni sistema di misura ha delle caratteristiche d'impiego determinate a seguito di taratura.

Dette caratteristiche debbono essere espresse in termini quantitativi chiari e completi; esse sono determinate ricorrendo al confronto con campioni di riferimento di precisione nota; la loro conoscenza costituisce una garanzia sia per il produttore che può fornire il mezzo di misura specificandone la qualità, sia per il consumatore che può controllare le specifiche fornite.

Le prestazioni che può fornire un mezzo, un apparecchio o un sistema di misura e la fiducia che può essere data ai risultati delle misurazioni dipendono dalla conoscenza della maniera e delle condizioni in cui esso deve essere adoperato, e richiedono la conoscenza di quei fattori che contribuiscono alla precisione dei risultati delle misurazioni.

In mancanza di queste conoscenze il fornitore del mezzo di misura non può specificarne adeguatamente le caratteristiche, colui che è addetto al servizio di controllo non può esprimere le effettive possibilità e infine colui che utilizza il servizio non può giudicare della validità dei risultati. Perciò tutti coloro che sono interessati a problemi di misurazioni debbono avere delle conoscenze adeguate sugli errori dei mezzi di misura adoperati e sulle incertezze connesse con i risultati delle misurazioni.

Infine è da tenere presente che le caratteristiche di un mezzo, di un apparecchio o di un sistema di misura rimangono invariate nel tempo fino a quando non intervengono condizioni che le modificano. A questa attitudine del mezzo di misura è associato il concetto di *stabilità*.

Le proprietà che servono a definire in maniera completa uno strumento di misura sono:

1. le caratteristiche delle grandezze in entrata ed in uscita (§ 4.1.2.);
2. la caratteristica di funzionamento (§ 4.1.3.);
3. le caratteristiche ambientali (§ 4.1.4.);
4. le caratteristiche fisiche (§ 4.1.5.).

4.1.2. Le caratteristiche delle grandezze in entrata ed in uscita indicano il tipo di segnale che si deve introdurre nello strumento e quello che si ottiene in uscita. Così in un dinamometro (figg. 3.12, 3.13, 3.22, 3.23) la grandezza in entrata (o *misurando*) è la forza applicata. La grandezza in uscita può essere lo spostamento di un indice su di una scala, oppure una tensione elettrica.

Nel caso di trasduttori passivi interessa conoscere anche le caratteristiche della grandezza ausiliaria necessaria per il funzionamento. Così un trasduttore induttivo di spostamento (fig. 3.16) può richiedere una alimentazione in corrente alternata, oppure in corrente continua (perché un oscillatore miniaturizzato è parte costituente del trasduttore).

Il campo di misura definisce i limiti entro cui lo strumento può essere normalmente usato. Tali limiti sono talvolta rappresentati dall'intera scala dello strumento, tal'altra da una parte della scala.

I limiti superiore ed inferiore del campo di misura determinano rispettivamente la *portata massima* e quella *minima* dello strumento.

Quando di uno strumento è data solo la portata massima od unicamente la portata (ingl. *measuring range* - fr. *portée*) significa che il limite inferiore è prossimo a zero.

I valori che definiscono la portata massima e minima sono quelli entro cui lo strumento può essere adoperato sempre con la stessa precisione. Può accadere talvolta che il campo di misura si componga di due intervalli. Entro ciascun intervallo la misura è fatta con precisione diversa; infatti molti strumenti hanno una più alta precisione nella parte superiore della scala (i $4/5$ o i $2/3$) mentre nella parte inferiore la precisione è più bassa. Bisogna definire due intervalli della scala anche negli strumenti con zero centrale. Oppure basta indicarne uno preceduto dal doppio segno. Si può anche presentare il caso di strumenti che, se usati al di là della portata massima (cioè se sono sovraccaricati) presentano la stessa precisione; ragioni di sicurezza fanno limitare tuttavia il campo di misura entro un valore minore.

Infine quando uno strumento dev'essere impiegato sempre, o quasi sempre, per la misura di un valore costante, allora la scelta dev'essere fatta

in modo che il valore da misurare corrisponda a circa l'80% della portata massima.

4.1.3. La caratteristica di funzionamento. La relazione che lega i valori della grandezza in entrata E e di quella in uscita U definisce la *caratteristica di funzionamento* (o di trasferimento) dello strumento o del trasduttore.

Tale caratteristica può essere determinata a priori, dalla conoscenza del principio fisico su cui si basa il funzionamento del trasduttore. In questo caso si parlerà di *caratteristica ideale*.

La *caratteristica reale* può invece essere determinata per taratura dello strumento, riportando in diagramma le coppie di valori sperimentali della grandezza in entrata e della corrispondente grandezza in uscita. La caratteristica reale può naturalmente discostarsi dalla caratteristica ideale, a causa di effetti dissipativi di cui spesso non si sa tener conto teoricamente (attriti, impedenze, capacità parassite, ecc.) oppure di imperfezioni nella realizzazione del trasduttore.

In modo analogo, nel caso di strumenti prodotti commercialmente, si potrà distinguere tra la *caratteristica nominale* dichiarata dal costruttore per una serie di strumenti dello stesso tipo, e la caratteristica reale determinata su di un singolo strumento, attraverso una taratura.

Nota la caratteristica di funzionamento, si possono determinare le seguenti proprietà del trasduttore: *la sensibilità assoluta, il fattore di taratura, la sensibilità relativa*.

4.1.3.1. La sensibilità assoluta di un trasduttore. E' il rapporto tra un incremento ΔU del valore della grandezza in uscita ed il corrispondente incremento ΔE del valore della grandezza in entrata, per un determinato valore della grandezza in entrata:

$$S_A = \Delta U / \Delta E \quad (4.1)$$

Nel caso di uno strumento ad indice la sensibilità assoluta verrà invece definita come il rapporto tra un incremento $\Delta \ell$ di escursione (o di scostamento) dell'indice ed il corrispondente incremento ΔG della grandezza misurata, in un determinato punto della scala (definizione della norma UNI 4546):

$$S_A = \frac{\Delta \ell}{\Delta G} \quad (4.2)$$

Nel caso in cui la relazione fra E ed U sia rappresentata da una curva

come quella di fig. 4.2, allora la sensibilità assoluta S_A è fornita da

$$S_A = \frac{dU}{dE} \quad (4.3)$$

Si tratta di una relazione in cui il rapporto tra U ed E non è costante, perciò si dice che la sensibilità non è costante ovvero che la caratteristica non è lineare. La caratteristica lineare è quello per cui la (4.3) è costante; la rappresentazione è data da una retta e la (4.3) diventa:

$$S_A = \frac{U}{E} = \text{costante}$$

La condizione in cui la sensibilità assoluta è costante in tutto il campo di misura è quella più favorevole per l'impiego di un trasduttore,

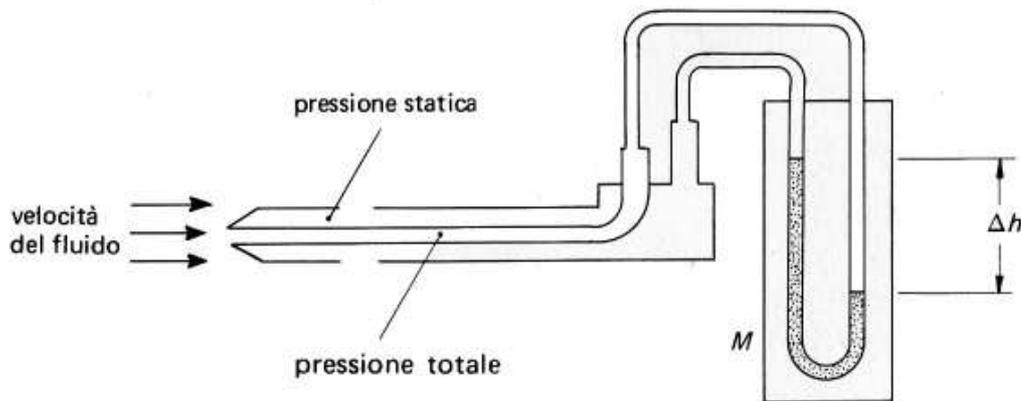


Fig. 4.1 – Tubo di Pitot.

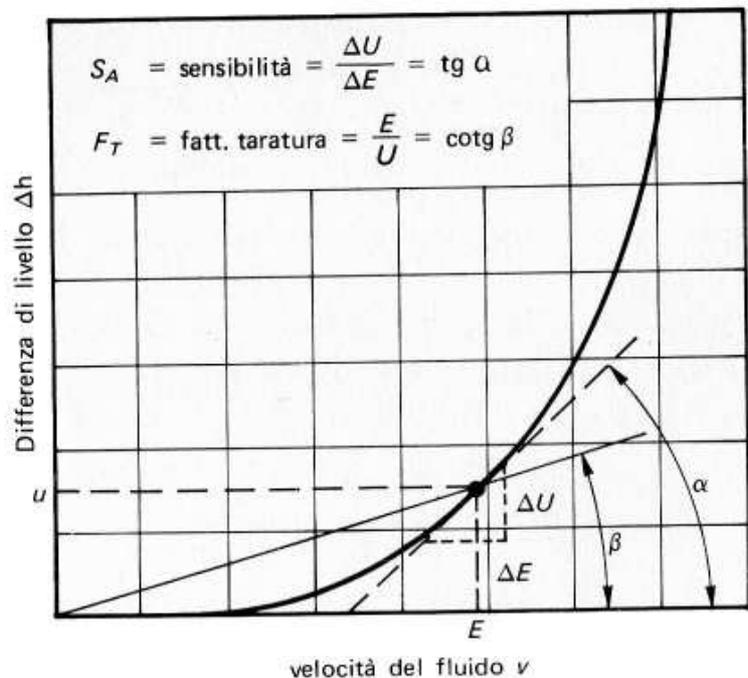


Fig. 4.2 – Caratteristica del tubo di Pitot.

ma in pratica, oltre ai trasduttori con caratteristica lineare, esistono quelli con caratteristica quadratica e logaritmica.

Un esempio di caratteristica quadratica è quello del tubo di Pitot (fig. 4.1). La velocità del liquido si ottiene come differenza fra la pressione totale (pressione statica + pressione dinamica ($1/2 \rho v^2$) dovuta al movimento) e la pressione statica dovuta al liquido in riposo. La prima è ottenuta da una presa perpendicolare alle linee di corrente, la seconda da altre prese laterali. La velocità è in conclusione misurata come differenza di livello Δh tra i due bracci del manometro indicatore M .

Analogamente, nel tubo di Venturi (fig. 4.3) si misura la differenza di pressione (proporzionale al quadrato della velocità) nelle due sezioni A e B , per ricavare la portata nel condotto. La caratteristica è ancora quadratica.

Quando la caratteristica non è lineare le cose, evidentemente, si complicano. Se l'uscita va ad uno strumento indicatore si potrà alterare la scala dello strumento (1) oppure sarà necessario correggere tutte le letture per mezzo di tavole di conversione. Ma se si tratta di inviare il segnale ad un altro strumento, o se si tratta di misure dinamiche, e l'uscita è inviata ad un registratore, allora la correzione diventa molto più problematica.

Quando la relazione tra E ed U non è lineare, ma è rappresentata da una funzione che si avvicina molto ad una retta, allora si potrà ancora dire che la caratteristica del trasduttore è lineare entro certi limiti o che il trasduttore ha un campo di linearità. In tal caso bisogna definire la

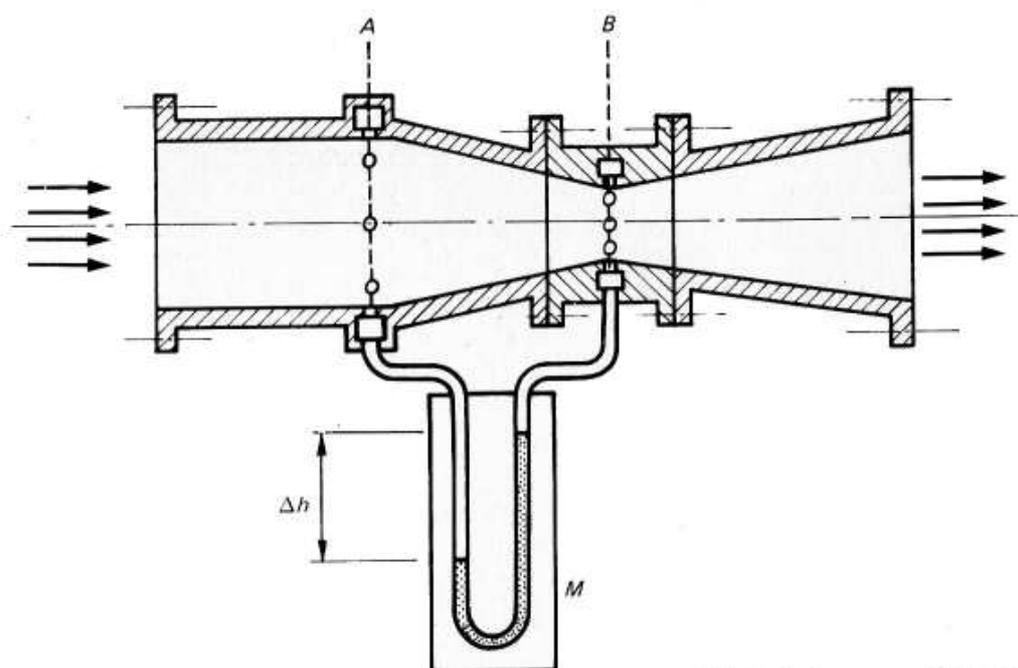
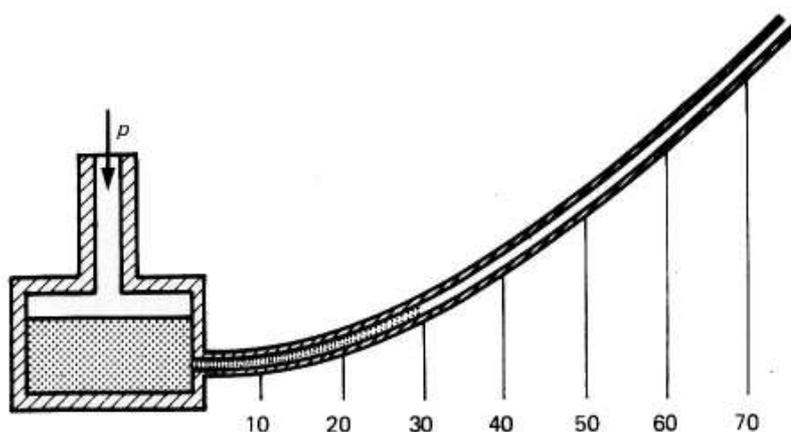


Fig. 4.3 — Tubo di Venturi.

(1) Un caso è quello della fig. 4.4 in cui la colonna di un manometro a liquido è formata da un tubo di forma parabolica, e si graduano le ascisse, anziché le ordinate, in modo da avere una scala lineare.

Fig. 4.4 — Manometro a liquido con tubo parabolico.



sensibilità media, la quale è rappresentata dalla pendenza della retta tracciata in maniera che gli scarti massimo e minimo, rispetto alla curva, siano fra loro eguali ed i più piccoli possibile.

Il trasduttore usato entro un certo campo di linearità ha perciò una sensibilità media con uno scarto relativo di linearità che è il quoziente tra il valore assoluto dello scarto ed il campo di misura.

Ciò è rappresentato in fig. 4.5. Si noti che in figura la retta tracciata con il criterio di rendere minimo lo scarto (positivo e negativo) non passa

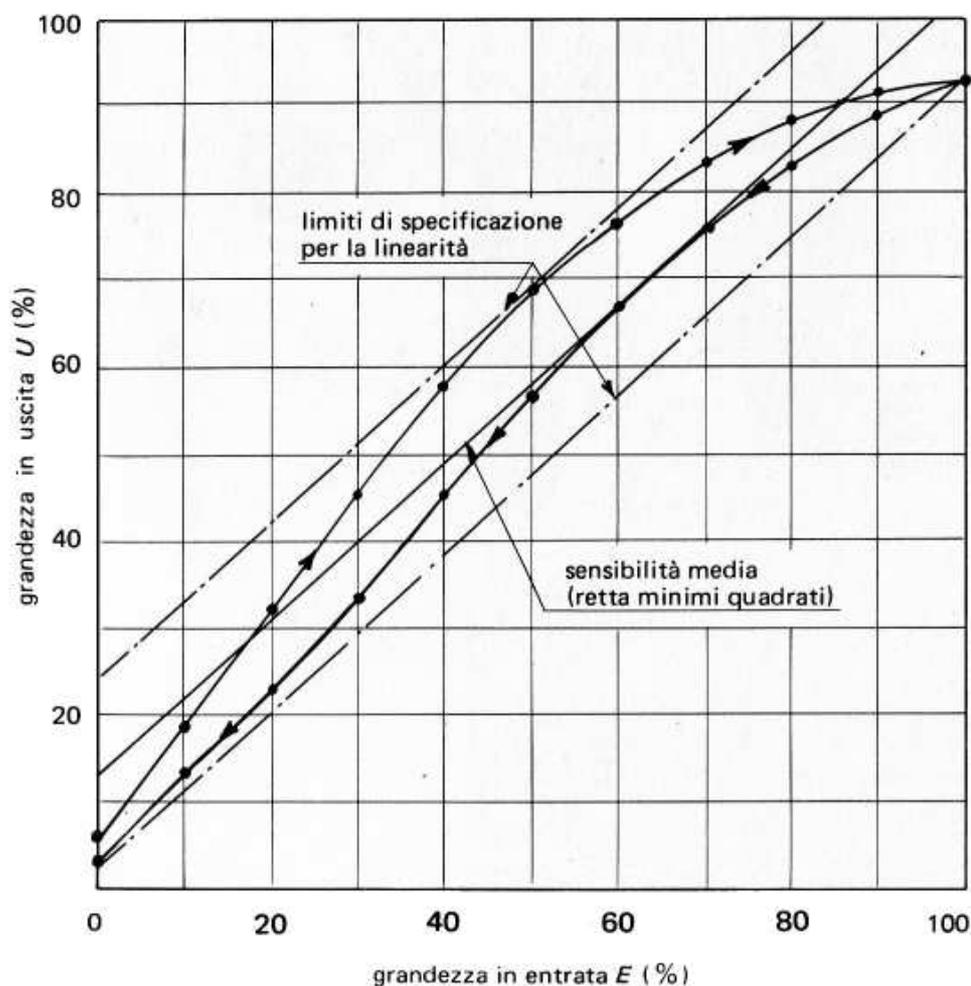


Fig. 4.5 — Deviazione dalla linearità di un trasduttore.

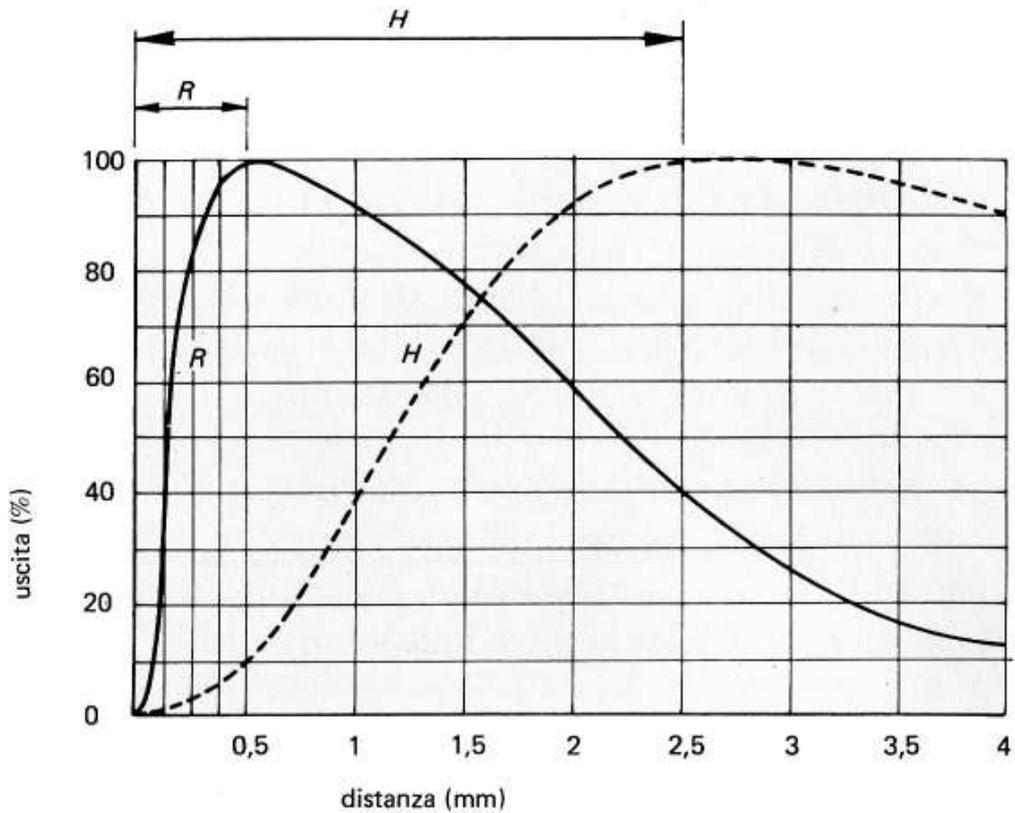


Fig. 4.6 – Trasduttore di spostamento fotoelettrico a fibre ottiche (MTI) – Caratteristiche di funzionamento e campo di misura (R = disposizione casuale delle fibre; H = disposizione 50–50).

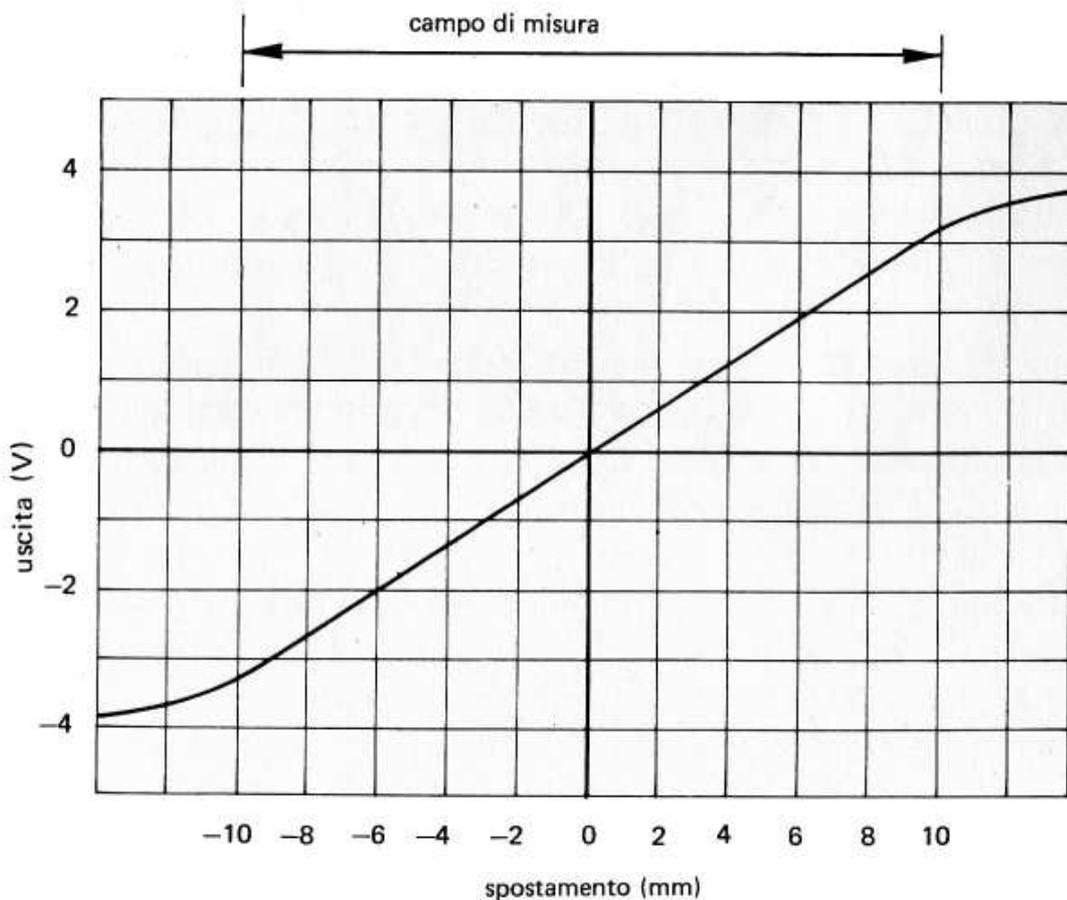


Fig. 4.7 – Trasduttore induttivo differenziale di spostamento. Caratteristica di funzionamento.

per l'origine; ciò significa che la scala dello strumento indicatore non è lineare a partire dallo zero, cioè che la portata dello strumento non comincia da zero. Se si vuole usare lo strumento con una portata che comincia da zero, allora bisogna tracciare la retta della sensibilità media imponendo la condizione di passare per lo zero; ma non potrà essere rispettata l'altra condizione che lo scarto sia minimo.

In molti casi si utilizza, come campo di misura di un trasduttore, la zona in cui la sua caratteristica è lineare (entro certi limiti). Due esempi sono quelli di figg. 4.6 e 4.7. In fig. 4.6 si tratta di un trasduttore di spostamento fotoelettrico a fibre ottiche, la cui caratteristica dipende dall'orientamento delle fibre, e presenta un massimo più o meno marcato. Si utilizza come campo di misura la parte sinistra della caratteristica. In fig. 4.7 si tratta di un trasduttore differenziale di spostamento, il cui schema è quello della casella in alto a destra della fig. 3.16. La caratteristica è lineare nella parte centrale, e piega poi agli estremi, per fenomeni di saturazione. Si utilizza come campo di misura, dunque, la sola parte centrale.

Il considerare, comunque, lineare o meno la caratteristica di un trasduttore, dipende dalla precisione con cui il trasduttore viene tarato ed utilizzato.

Un altro esempio di deviazione dalla linearità, è quello di un dinamometro ad anello. Se la forza viene misurata attraverso la deformazione nelle sezioni diametrali orizzontali, dove sono incollati gli strain-gages (fig. 3.22) la caratteristica si può ritenere — in prima approssimazione — lineare (2). Se invece la forza viene misurata da un micrometro, come schiacciamento diametrale dell'anello, allora il rapporto schiacciamento/forza applicata non è più costante e la caratteristica non è più lineare.

In questi casi, ed in generale quando si vogliono mettere in evidenza, nel corso di una taratura di precisione, piccole deviazioni della caratteristica dalla linearità, non converrà più riportare in diagramma la funzione $U = f(E)$, cioè la caratteristica di funzionamento, così come è stato fatto nelle figg. 4.5, 4.6 e 4.7.

Si prenda il caso di un dinamometro ad anello Morehouse, la cui forma è visibile in fig. 3.23 ed in cui la forza applicata viene misurata attraverso lo schiacciamento diametrale (divisioni sul tamburo graduato). Il diagramma di fig. 4.8 rappresenta la caratteristica di funzionamento, ma su di esso non si possono mettere in evidenza piccole deviazioni della caratteristica dalla linearità.

(2) In seconda approssimazione si dovrebbe tener conto della variazione di diametro dell'anello sotto carico.

Si potrebbe pensare di riportare in diagramma la sensibilità assoluta definita in (4.3) $S_A = dU/dE$ in funzione della grandezza in entrata E . In questo modo un andamento parabolico della caratteristica darebbe luogo ad un andamento lineare della sensibilità.

Ciò non è pratico sia perché nella misura di $S_A = dU/dE$, ottenuta con piccoli incrementi del misurando, gli errori di misura possono divenire importanti, sia perché l'utilizzatore vuol risalire dal valore assoluto di U letto sullo strumento al valore assoluto di E . Conviene quindi introdurre un fattore di taratura definito come:

$$F_T = \frac{E}{U} \quad \text{oppure} \quad \frac{E - E_0}{U - U_0} \quad (4.4)$$

(vedi anche la fig. 4.2).

Il fattore di taratura ha, come dimensioni, l'inverso delle dimensioni della sensibilità (assoluta).

In fig. 4.9 abbiamo un tipico diagramma di taratura di un dinamometro. Un andamento parabolico della caratteristica diventa un andamento lineare del fattore di taratura. I limiti di specificazione, che erano due rette parallele in fig. 4.5 diventano due rami di iperbole.

Se infatti la caratteristica nominale (ottenuta linearizzando la caratteristica reale, in modo da render minimi i quadrati degli scarti, come in fig. 4.5) è del tipo

$$U = k E \quad (k = \text{costante}) \quad (4.5)$$

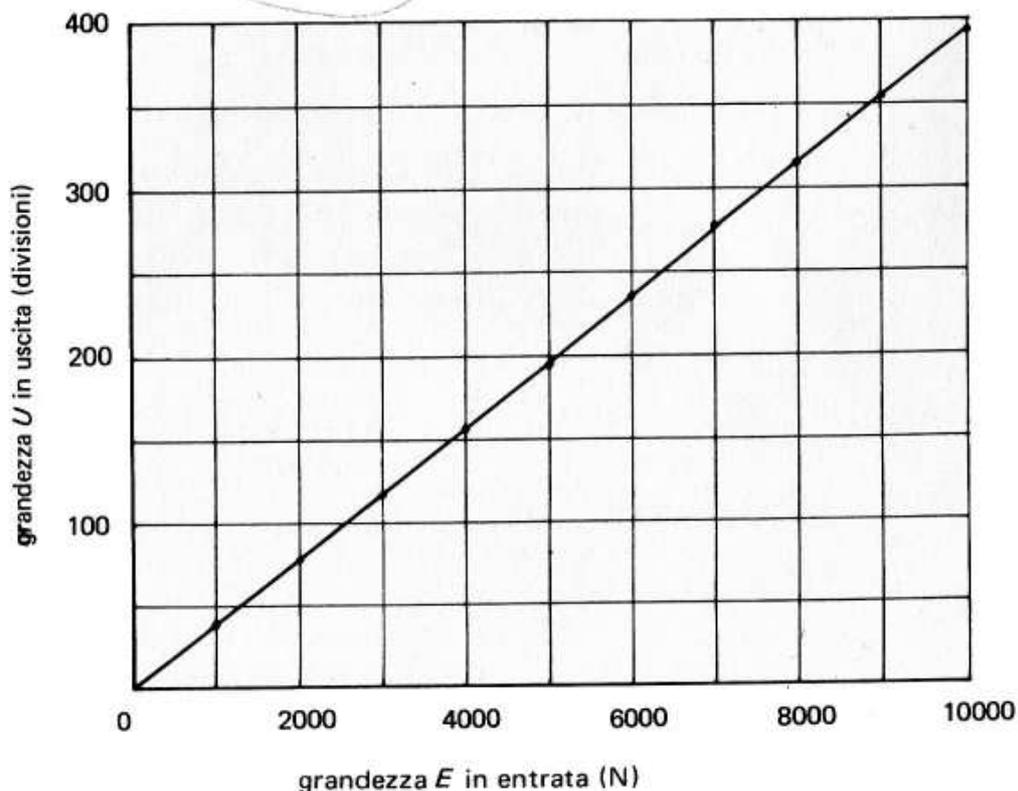


Fig. 4.8 — Dinamometro ad anello Morehouse (vedi fig. 3.23) portata 10 kN — Caratteristica di funzionamento.

l'equazione delle due curve corrispondenti ai due limiti di specificazione $U_{1,2}$, per un errore assoluto costante in tutto il campo di misura (e_{fs}) diventa:

$$U_{1,2} = k E \pm e_{fs} \quad (4.6)$$

Con le scale della fig. 4.9, e secondo la definizione della (4.4):

$$F_T = \frac{E}{U} = \frac{1}{k} \quad (4.7)$$

(con una caratteristica lineare F_T è costante: linea orizzontale in fig. 4.9). Le curve corrispondenti ai due limiti di specificazione diventano, in fig. 4.9:

$$\frac{E}{U_{1,2}} = \frac{1}{k} \mp \frac{e_{fs}}{k(kE \pm e_{fs})} \quad (4.8)$$

cioè due iperboli con curvature opposte e simmetriche rispetto alla F_T .

Si può anche considerare la sensibilità assoluta globale di uno strumento di misura costituito da più trasduttori in serie. E' il caso in cui, ad esempio, la grandezza da misurare, prima di essere applicata allo stadio rivelatore (indicatore o registratore) è inviata ad un amplificatore.

La sensibilità dello strumento diventa il prodotto delle sensibilità dei

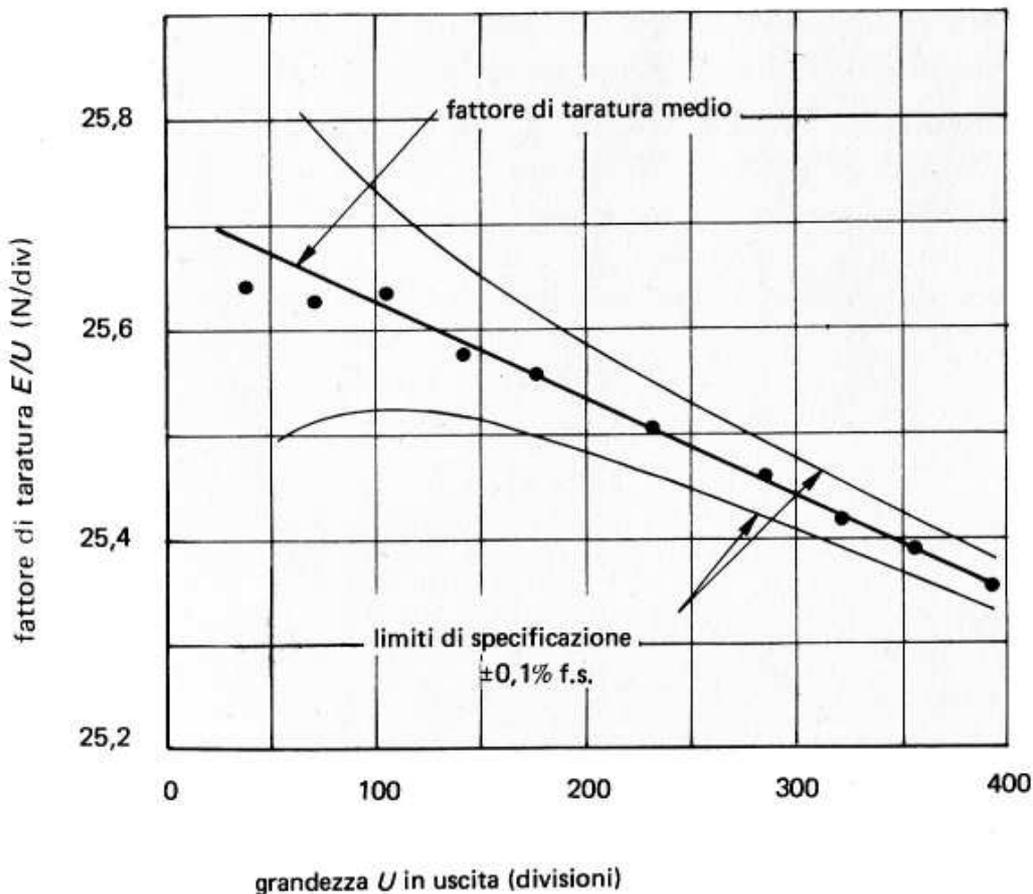


Fig. 4.9 – Dinamometro ad anello Morehouse portata 10 kN – Diagramma di taratura.

trasduttori attraverso cui la grandezza passa. Allora la (4.3) diventa:

$$S_A = \frac{dU_1}{dE_1} \frac{dU_2}{dE_2} \quad (4.9)$$

e nel caso in cui si tratti di trasduttori con caratteristica lineare, la (4.9) diventa:

$$S_A = \frac{U_1}{E_1} \frac{U_2}{E_2}$$

Un esempio semplice, già esaminato, di trasduttore costituito da diversi stadi in serie è quello del dinamometro ad estensimetri elettrici della fig. 3.13.

La sensibilità dello strumento globale è il prodotto delle sensibilità dei singoli stadi che lo compongono. Così in questo caso, per un dinamometro di portata 10 kN, si potrà avere:

- elemento elastico: sensibilità $0,14 \mu\epsilon$ (def. lineica)/N
- strain gage: sensibilità $240 \mu\Omega/\mu\epsilon$ (3) (resistenza $R=120\Omega$)
- ponte di Wheatstone: sensibilità $0,045 \mu\text{V}/\mu\Omega$ (3) (alimentazione $V=5 \text{ V}$).

La sensibilità dello strumento risulta dunque:

$$0,14 \frac{\mu\epsilon}{\text{N}} \cdot 240 \frac{\mu\Omega}{\mu\epsilon} \cdot 0,045 \frac{\mu\text{V}}{\mu\Omega} = 1,5 \frac{\mu\text{V}}{\text{N}}$$

La *sensibilità assoluta* è dunque, in generale, il rapporto tra due grandezze fisiche di specie differente, e non bisognerà quindi dimenticare di esprimere le sue dimensioni. Nell'esempio citato la sensibilità (assoluta) del dinamometro è di $1,5 \mu\text{V}/\text{N}$. In un altro dinamometro con strumento indicatore ad indice essa può essere indicata come $0,5 \text{ mm}/10\text{N}$ (o meno bene come $1 \text{ mm}/20\text{N}$ o $1 \text{ div}/20\text{N}$ specificando il passo della divisione).

Si deve invece evitare — perché contrario a tutte le norme italiane e straniere — di indicare per sensibilità il suo inverso (ad es. $20\text{N}/\text{div}$). Quando poi si legge che il costruttore dichiara che una bilancia “ha la sensibilità di 1 g” o che un micrometro “ha la sensibilità di $1 \mu\text{m}$ ” non si

(3) Si noti che, in questo caso, per lo stesso trasduttore, la sensibilità è direttamente proporzionale, rispettivamente, alla resistenza R (strain gage) ed alla tensione di alimentazione V (ponte di Wheatstone). Dal punto di vista metrologico è dunque più significativo parlare di sensibilità *relativa* “alla resistenza iniziale” (qui $2 (\mu\Omega/\Omega)/\mu\epsilon$) oppure “alla tensione di alimentazione” (qui $0,009 (\mu\text{V}/\text{V})/\mu\Omega$). Dal punto di vista dello strumento globale si potrà indicare una sensibilità globale “relativa alla tensione di alimentazione” che sarà di $3 (\text{mV}/\text{V})/(10 \text{ kN})$. (Si veda quanto indicato di seguito sulle diverse sensibilità relative).

sa veramente più se “1 g” o “1 μm ” corrispondono all'*errore assoluto massimo* o all'*errore massimo di lettura* o a quello di *mobilità*. Alcuni, esprimendosi così, intendono dire che “una divisione della scala di misura corrisponde a 1 g (o 1 μm)”. Ma queste confusioni devono essere evitate.

In alcuni casi particolari la grandezza all'uscita può essere della stessa specie di quella all'entrata. E' il caso in genere degli estensimetri meccanici, quando vengano usati come misuratori di piccoli spostamenti. Riferiamoci all'estensimetro Huggenberger (fig. 7.7). In esso lo spostamento ΔL del coltello mobile è amplificato da un sistema di leve, e dà luogo, in uscita, ad uno spostamento meccanico dell'indice $\Delta L'$. Se uno spostamento $\Delta L'$ di 1 μm dà luogo ad uno spostamento dell'indice di 1,2 mm, ciò corrisponde ad una sensibilità (assoluta) di $1,2 \text{ mm}/1 \mu\text{m} = 1200$ (numero puro).

In questo caso si parla volentieri di *rapporto di amplificazione* (o semplicemente di *amplificazione*: UNI 4546) qui eguale a 1200. La stessa situazione si ha in altri sistemi di leve o ingranaggi (comparatore, fig. 3.19 ad es.) e nel caso degli strumenti ottici (microscopio, cannocchiale) dove però si preferisce parlare di *ingrandimenti lineari* di 100, 1000 volte ...

E' ancora il caso di tutti gli amplificatori elettronici, che forniscono all'uscita una tensione proporzionale alla tensione d'ingresso. In questo caso si parla generalmente di *guadagno*.

Negli strumenti utilizzati in campo dinamico la sensibilità assoluta è spesso chiamata con il nome di *rapporto di trasferimento* o *rapporto di risposta*.

Uno strumento può poi possedere diverse sensibilità; ciò accade quando esso ha più portate e perciò più scale di misura. Ciascuna scala ha una sensibilità ed anche una portata diversa.

Esempi di strumenti con più sensibilità sono costituiti da una macchina universale di prova dei materiali, da un ponte di Wheatstone a più decadi, da molti degli strumenti elettrici (voltmetri, amperometri ...) di uso corrente.

4.1.3.2. Sensibilità relativa a... In alcuni trasduttori, pur rimanendo costante il valore della grandezza all'entrata, il valore all'uscita cambia in dipendenza del valore iniziale del misurando. In questo caso appare utile parlare di una *sensibilità relativa al valore iniziale del misurando* (S_R) definita come il rapporto tra l'incremento ΔU del valore della grandezza in uscita ed il corrispondente incremento relativo $\Delta E/E$ del valore della grandezza in entrata:

$$S_R = \frac{\Delta U}{\Delta E/E} \quad (4.10)$$

In questo senso si esprime anche la norma UNI 4546.

E' questo il caso della livella. Se ad esempio lo spostamento di 2 mm della bolla d'aria corrisponde al sollevamento di $1\ \mu\text{m}$ di una base di misura di 1 m, la sensibilità relativa sarà:

$$S_R = \frac{2\ \text{mm}}{1\ \mu\text{m}/\text{m}}$$

E' poi ancora il caso di tutti gli estensimetri, quando questi vengano usati per misurare non già piccoli allungamenti, ma deformazioni lineiche. Così nella tab. 7.2. è scritto che il già citato estensimetro Huggenberger ha, ad esempio, una sensibilità di:

$$\frac{1\ \text{div}}{30\ \mu\epsilon} = \frac{1\ \text{div}}{30 \cdot 10^{-6}\ \text{mm}/\text{mm}}$$

In altri casi sarà utile introdurre la sensibilità relativa al valore della grandezza in uscita, definita come rapporto tra l'incremento relativo $\Delta U/U$ del valore della grandezza in uscita ed il corrispondente incremento ΔE del valore della grandezza in entrata:

$$S_R = \frac{\Delta U/U}{\Delta E} \quad (4.11)$$

Esempio: in un termometro a resistenza, a parità d'incremento di temperatura (in $^{\circ}\text{C}$) il segnale di uscita (in Ω) è proporzionale alla resistenza iniziale, perciò la sensibilità risulta univocamente determinata dall'incremento relativo della resistenza rispetto al corrispondente incremento di temperatura ed è espressa in

$$\frac{\Omega/\Omega}{^{\circ}\text{C}}$$

In altri trasduttori infine il segnale all'uscita è dipendente — a parità di segnale all'entrata — dal valore della grandezza ausiliaria. Così ad esempio un estensimetro elettrico a resistenza dà un segnale che è proporzionale alla tensione di alimentazione del circuito in cui l'estensimetro è inserito. In tali tipi di trasduttori conviene parlare di sensibilità relativa al valore della grandezza ausiliaria. Nel caso dunque della misura della deformazione con un estensimetro elettrico inserito su di un lato di un ponte di Wheatstone, la sensibilità (relativa) sarà espressa da:

$$\frac{\text{mV (di squilibrio del ponte)}}{\text{V(alimentazione ponte) } \mu\epsilon \text{ (deformazione estensimetro)}}$$

A ben guardare questa è una sensibilità doppiamente relativa, perché è riferita sia al valore della grandezza ausiliaria (tensione di alimentazione),

sia alla base di misura iniziale dell'estensimetro (deformazione lineica, cioè relativa, espressa in $\mu\epsilon$). Non deve dunque stupire se le norme non sono tra loro concordi nella definizione e nell'uso di questi diversi tipi di sensibilità relative. Ciò che importa notare è come, per diversi tipi di trasduttori, sia necessario riferire il valore della grandezza in uscita a quello della grandezza in entrata o di una grandezza ausiliaria. Resta l'importanza di indicare sempre chiaramente cosa si intende esprimere, e non dimenticare di indicare l'unità di misura della sensibilità, assoluta o relativa che essa sia.

4.1.4. Le caratteristiche ambientali. Queste caratteristiche sono determinate dalle condizioni dell'ambiente in cui può funzionare il trasduttore (temperatura, umidità, pressione atmosferica, disturbi elettrici e meccanici, radiazioni, effetti elettrici e magnetici) senza che le caratteristiche di funzionamento varino oltre i limiti specificati. Talvolta però le condizioni dell'ambiente variano in misura elevata ed allora se non si può compensare in qualche modo l'effetto della grandezza d'influenza G_i , bisogna determinarlo quantitativamente a mezzo della sensibilità della grandezza in esame alla grandezza d'influenza, che è espressa da:

$$S_{G_i} = \frac{\Delta U}{\Delta E} / \Delta G_i \quad (4.12)$$

Così ad esempio nel caso di un dinamometro ad estensimetri elettrici, adoperato in un determinato campo di temperatura, si parlerà di sensibilità alla temperatura in quel campo, o anche di *coefficiente di temperatura del dinamometro*. In quei casi dove l'effetto della grandezza di influenza non può essere compensato, bisogna conoscere la sensibilità alla grandezza di influenza, cioè misurare il valore di detta grandezza e correggere i risultati delle misure della grandezza in esame. Cioè nel caso del dinamometro si misura la temperatura e poi — conoscendo il coefficiente di temperatura — si correggono i valori della forza misurati.

Quando la grandezza in esame G è funzione di più grandezze, la grandezza d'influenza altera ciascuna grandezza nella maniera che può essere così determinata. Supponiamo che la relazione fisica che lega la G , ad esempio a tre grandezze x_1, x_2, x_3 , sia della forma

$$G = \frac{x_1^2 x_2}{x_3} \quad (4.13)$$

La grandezza di influenza sia y . Passando attraverso i logaritmi e derivando la (4.13) si ha:

$$\ln G = 2 \ln x_1 + \ln x_2 - \ln x_3$$

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dy} = \frac{2}{x_1} \frac{dx_1}{dy} + \frac{1}{x_2} \frac{dx_2}{dy} - \frac{1}{x_3} \frac{dx_3}{dy} \quad (4.14)$$

Cioè dalla (4.14) si può dedurre che la grandezza d'influenza agisce separatamente su ciascuna grandezza da cui dipende G e che l'effetto totale è la somma degli effetti singoli: col segno positivo quando nella (4.13) le grandezze singole appaiono al numeratore e col segno negativo quando appaiono al denominatore, ciascuna moltiplicata per l'esponente della potenza quando la grandezza si presenta sotto forma di potenza.

Facciamo l'esempio riguardante l'influenza della temperatura sul modulo di elasticità dinamica E_d , cioè determiniamo la variazione di E_d con la temperatura, che si chiama anche *coefficiente di temperatura del modulo elastico*. Come è noto, E_d può essere determinato con un metodo non distruttivo basato sulla misura della velocità c di propagazione di un'onda elastica nel provino in esame e sulla misura della sua massa volumica ρ , a mezzo della relazione

$$E_d = c^2 \rho \quad (4.15)$$

Nel caso di un provino cilindrico di lunghezza ℓ , raggio r e massa m , eccitato da una vibrazione di frequenza f , la (4.15) diventa:

$$E_d = \frac{4m\ell f^2}{\pi r^2} \quad (4.16)$$

Per effetto della temperatura t , a mezzo della (4.14) la (4.16) diventa:

$$\frac{1}{E_d} \frac{dE_d}{dt} = \frac{1}{\ell} \frac{d\ell}{dt} - \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} + \frac{2}{f} \frac{df}{dt} \quad (4.17)$$

Se si pone:

$$\gamma = \frac{1}{E} \frac{dE_d}{dt} \quad \beta = \frac{1}{\ell} \frac{d\ell}{dt} = \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{1}{f} \frac{df}{dt}$$

dove β è noto come il coefficiente di dilatazione lineare, allora la (4.17) diventa:

$$\gamma = 2\alpha - \beta \quad (4.18)$$

In pratica per determinare γ , bisogna fare misure di α , assoggettando il provino a diverse temperature, col metodo sopra descritto, e misure di β con un dilatometro.

4.1.5. Le caratteristiche fisiche. Queste caratteristiche sono costituite da: dimensioni, peso, tipo di connessioni, maniera di montaggio, materiali adoperati per la costruzione, vita del trasduttore in determinate condizioni di funzionamento.

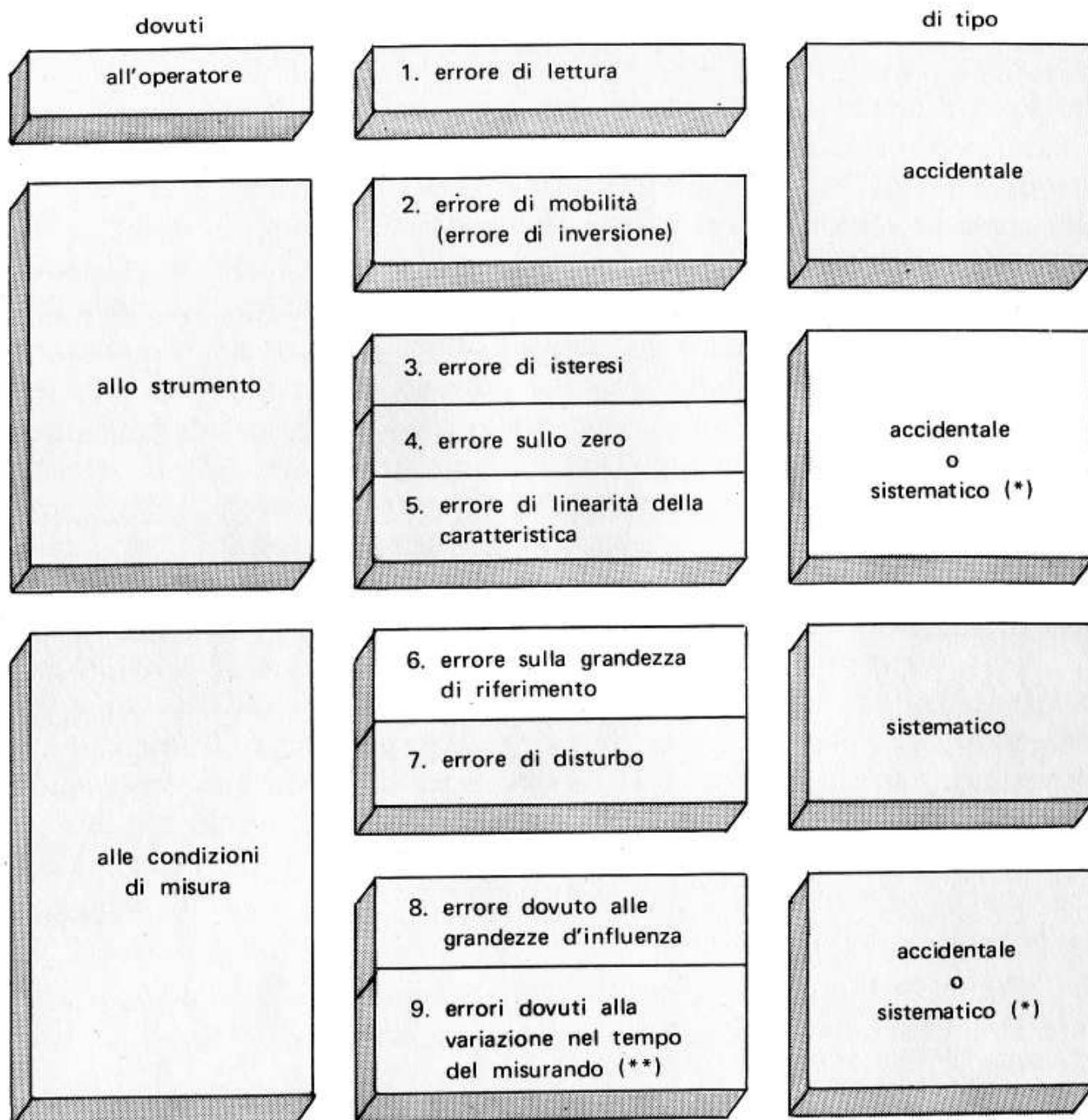
Ciascuna di dette caratteristiche può avere una sua influenza a seconda dell'impiego del trasduttore, così ad esempio:

- dimensioni e peso giocano un ruolo importante quando la struttura o l'organo da esaminare sono piuttosto piccoli: il trasduttore può introdurre un errore di disturbo nella misura;
- il tipo di connessioni può essere importante per il collegamento ad altri trasduttori;
- la maniera di montaggio dev'essere ben definita poiché un trasduttore montato non correttamente può introdurre un errore sistematico;
- i materiali adoperati per la costruzione sono importanti sia in relazione all'ambiente in cui il trasduttore è usato (l'ambiente corrosivo richiede materiali speciali) sia in relazione agli effetti che il trasduttore può procurare nell'ambiente in cui lavora: un trasduttore di ferro può provocare variazioni di flusso in un campo magnetico;
- la vita del trasduttore è importante soprattutto in relazione a prove ripetute cioè al suo limite di fatica: un estensimetro elettrico a resistenza ha una vita media corrispondente a qualche milione di cicli di deformazione. La sua vita può dipendere anche dalle condizioni di sovraccarico che talvolta il trasduttore è chiamato a sopportare.

4.2. Gli errori

4.2.1. Classificazione degli errori di un apparecchio e di una misurazione - Taratura - Verifica. L'analisi degli errori di un apparecchio o di una misurazione, che è questione fondamentale dal punto di vista metrologico, si può prestare ad equivoci e confusioni per il fatto che la terminologia nelle diverse lingue e tra norme di uno stesso Paese è discorde.

Noi ci riferiamo allo schema della fig. 4.10, che ci pare sufficientemente completo, con l'avvertenza però che in esso e nelle pagine seguenti abbiamo adoperato soprattutto il termine di *errore* anche quando sarebbe stato più appropriato il termine di *incertezza*. Tuttavia, in accordo con il *Vocabolario di Metrologia Legale* (vedi bibliografia), l'*errore* è definito come "la discordanza tra il risultato della misurazione ed il valore della grandezza misurata". Detta discordanza è dovuta o ad incompleta conoscenza o ad una imperfezione, o insieme di imperfezioni, del mezzo di



(*) a seconda che vengano corretti oppure no

(**) si riferiscono a misure di tipo dinamico

Fig. 4.10 – Errori di misura.

misura; l'*incertezza* è la "caratteristica della dispersione dei risultati della misurazione definita dagli errori limiti".

Perciò mentre l'errore è espresso da un valore numerico dotato di segno, l'incertezza è espressa da un intervallo di valori entro cui trovasi il valore accettato, per il quale si può esprimere la probabilità di verificarsi.

Ritornando allo schema di fig. 4.10 possiamo ancora aggiungere che:

a) la lista degli errori può essere ridotta o ulteriormente ampliata; b) la classificazione di un tipo di errore come *sistematico* o *accidentale* può variare a seconda che di questo errore si sappia o si possa tenere conto, oppure no; c) l'analisi degli errori è diversa a seconda che si tratti di una grandezza la cui misura si esegue con un solo apparecchio di misura, o di una grandezza la cui misura si esegue con più apparecchi di misura.

Nel caso di un apparecchio si possono fare un'analisi degli errori *a priori* ed una *a posteriori*. In un'analisi *a priori* (che ha interesse solo per il costruttore, o per il metrologo che cerca di perfezionare le prestazioni degli apparecchi a sua disposizione) si possono considerare, con una serie di prove parziali, e studiando il contributo che i singoli componenti hanno sul funzionamento globale dell'apparecchio, le diverse cause di errore (mobilità, isteresi, non linearità della caratteristica ecc.). Questi errori elementari si combinano insieme durante il funzionamento dell'apparecchio, e per gli errori con distribuzione di tipo casuale (*accidentali*) la previsione dell'effetto globale deve essere fatta con criteri statistici.

Così, ad esempio, l'errore risultante da una somma di errori elementari è contenuto (ad un certo livello di probabilità) entro limiti $\pm \epsilon_t$ che *non* sono la somma dei limiti $\pm \epsilon_i$ entro cui variano i singoli errori elementari. Per quell'effetto di compensazione che è dovuto al gioco delle probabilità tale intervallo risulta minore, e pari a

$$\epsilon_t = \pm \sqrt{\sum_i (\pm \epsilon_i)^2} \quad (4.19)$$

Questa analisi e questi calcoli *a priori* conducono dunque a determinare la imprecisione dell'apparecchio e di conseguenza a fissarne la scala. Ad esempio, nel caso di un comparatore a quadrante (fig. 3.19) attraverso l'analisi *a priori* si può stabilire se l'imprecisione dello strumento può essere di 0,01 oppure di 0,001 mm, in dipendenza delle possibilità che ha lo strumento (in base alle sue qualità costruttive) di misurare lungo tutto il campo di misura i valori con l'una o l'altra approssimazione. Da ciò deriva la scelta delle dimensioni del quadrante, dell'intervallo di graduazione della scala e della sua ampiezza.

L'utilizzatore sarà invece più interessato ad una valutazione globale dell'errore dell'apparecchio durante il suo funzionamento, e potrà eseguirla con una analisi *a posteriori*. Questa si esegue mediante una *verifica della taratura* (4) che consiste nel confrontare le indicazioni dell'apparecchio in

(4) La UNI 4546 distingue chiaramente tra taratura (ingl. *calibration* - fr. *étalonnage*) (= determinare la relazione tra un tratto della graduazione ed il valore corrispondente del misurando) e verifica (= procedimento di controllo per determinare gli errori dello strumento). La taratura è fatta generalmente dal costruttore, che gradua la scala dello strumento, oppure fornisce diagrammi di taratura nel caso di scale non graduate. La verifica è fatta successivamente, da parte di un Ente Ufficiale o dello stesso utilizzatore. Si eviti dunque il termine taratura nel senso di verifica.

esame con quelle fornite da un campione o da un apparecchio campione, di classe più elevata, tale che si possa ritenere che le differenze tra le due indicazioni siano dovute ad errori dell'apparecchio sotto controllo. Così si inseriranno in serie due dinamometri sotto lo stesso carico, o due amperometri sul medesimo conduttore, o due misuratori di portata sulla stessa condotta, così vicini che si possa ritenere che essi misurino la stessa cosa, ma così lontani che si possa ritenere che la misura dell'uno non sia influenzata dalla presenza dell'altro.

I campioni di riferimento debbono essere almeno 5 volte più precisi degli strumenti da tarare. Un esempio è quello di una macchina di prova tarata con una scatola di taratura: questa ha una precisione di $\pm 0,2\%$, rispetto al $\pm 1\%$ della macchina di prova.

Ripetendo più volte la misura si potranno determinare, oltre che gli errori sistematici (differenza fra indicazioni medie dello strumento sotto controllo e valori indicati dallo strumento campione) anche quelli accidentali (ripetibilità delle indicazioni dello strumento sotto controllo per un valore costante della grandezza in entrata).

Nel caso invece di *una misurazione* che si esegue con più apparecchi le cose sono lievemente differenti. Si pensi al caso di un modulo di elasticità E che viene ottenuto dalla misura delle dimensioni geometriche di un provino, del carico applicato, della sua deformazione. L'analisi a priori dell'errore che si commette nella misurazione è sempre necessaria per poter indicare, accanto al valore della misura, l'intervallo di incertezza. In questa analisi si deve tener conto degli errori dei singoli apparecchi e di come essi influiscono sul valore della misura, ed in più dell'influenza delle condizioni di prova (errore di disturbo, grandezze d'influenza, ecc.). Si veda cosa è detto nel § 4.1.4. (relativamente agli effetti delle grandezze d'influenza) e nel § 4.4. (relativamente alla scelta dei singoli elementi che compongono una catena di misura).

Una suddivisione concettualmente importante è poi quella che distingue gli errori in *sistematici* ed *accidentali*. Si abbia sempre presente la fig. 4.10.

Gli *errori sistematici* (ingl. *systematic error* - fr. *erreur systématique* - ted. *systematisch Fehler*) sono quelli legati alla causa che li produce da una legge fisica determinabile. Nell'ipotesi che si sappia tenere sotto controllo o misurare la causa che li produce, il loro effetto si può quindi prevedere in segno e valore, e di conseguenza correggere (5).

Gli *errori accidentali* (ingl. *random error* - fr. *erreur aléatoire* - ted. *zufällig Fehler*) sono invece definiti in questo modo (UNI 4546 § 4.4.):

(5) La UNI 4546 ne dà questa definizione al § 4.3.: "l'errore sistematico è quello provocato di volta in volta sempre dalla stessa causa, e di valore e segno costanti".

“errori provocati da cause occasionali, il cui singolo contributo non può venir stabilito a priori ed agisce di volta in volta con diversa entità e segno”. Il modello teorico che si assume è solitamente questo: nel provocare un errore accidentale si sommano un numero infinito di termini elementari, ciascuno con distribuzione statistica qualunque, ma con media zero. Sotto queste ipotesi l'errore risultante ha una *distribuzione gaussiana*, in cui gli errori più piccoli hanno maggior probabilità di verificarsi, e gli errori di segno positivo e negativo hanno eguale probabilità di verificarsi. Nella pratica, ripetendo numerose volte una operazione di misura in condizioni che si possono supporre costanti e a distanza di tempo ravvicinata (stesso apparecchio, operatore, condizioni ambientali...) si ottengono dei risultati la cui distribuzione è in accordo con il modello della gaussiana. In conclusione gli errori accidentali sono caratterizzati dal fatto che essi non possono essere previsti in valore e segno, ma si può soltanto dire che essi hanno una certa probabilità di essere compresi in un certo intervallo.

4.2.2. Errori accidentali dovuti all'operatore ed allo strumento. Con riferimento alla fig. 4.10 si inizia l'esame dagli errori di lettura (dovuti all'operatore) avvertendo che oggi si tenta di ridurre questi tipi di errore automatizzando la misura, e soprattutto con l'uso di strumenti indicatori numerici.

4.2.2.1. Errori di lettura. Gli *errori di lettura* sono costituiti da: *a)* il potere separatore dell'occhio e del sistema ottico che esso utilizza nello strumento; *b)* l'errore di parallasse; *c)* l'errore di interpolazione; *d)* l'errore dovuto al rumore di fondo (tremolio dell'indice).

a) Il *potere separatore* medio convenzionale dell'occhio è di $0,001 d$, dove d è la distanza a cui si fa la lettura. In buone condizioni d'illuminazione il coefficiente diminuisce fino a $0,0003$ ed in condizioni non buone sale a $0,003$. Tuttavia ogni lettura o puntata su un diagramma registrato si fa al decimo di millimetro.

b) L'*errore di parallasse* si determina valutando la distanza dell'indice dal quadrante e gli scarti angolari che l'osservatore può fare per rapporto alla normale al quadrante. Supposto che la distanza sia di 3 mm e l'angolo di $\pm 12^\circ$, l'errore è $d \cdot \text{tg} \alpha = 3 \text{ mm} \text{ tg } 12^\circ = \pm 0,6 \text{ mm}$, equivalente all'errore dovuto al potere separatore di un occhio posto alla distanza di 600 mm . Per ridurre tale errore si possono usare diversi tipi di scale: ad esempio una scala riflessa o un indice molto spesso (normalmente al piano della scala).

c) L'*errore di interpolazione* è dell'ordine di $\pm 10\%$ della larghezza

della divisione a condizione che la scala sia lineare. Esistono diversi tipi di scale: con reticolo a croce, reticolo a 2 linee parallele, reticolo con linee a spirale.

d) *Il rumore di fondo* si determina valutando la doppia ampiezza dell'oscillazione ed aggiungendo alla posizione media dell'indice di lettura $\pm 10\%$ della doppia ampiezza.

4.2.2.2. Errori di mobilità e di inversione. Una seconda causa di errori accidentali nasce dalle discontinuità di funzionamento di uno strumento, provocate dai giochi, attriti secchi, discontinuità (ad es. spire di un potenziometro), ecc. Si tratta di valutare l'attitudine dello strumento a reagire alle piccole variazioni della grandezza in entrata. Questa caratteristica metrologica è detta *mobilità*.

La *soglia di mobilità* (6) è la più piccola variazione di grandezza all'entrata capace di modificare la condizione di equilibrio dell'indice, in un determinato punto della scala. Essa può dunque variare nei diversi punti della scala in corrispondenza dei quali si effettua la misura, ed è indipendente dagli effetti accumulati dall'indice nello spostamento dalla sua posizione iniziale. Questa soglia può infine dipendere dalle eventuali vibrazioni a cui è sottoposto lo strumento nel corso della prova. Supponiamo di avere una bilancia in equilibrio sotto un carico di 200 g. Se, aggiungendo una massa di 0,1 o 0,2 g l'indice sembra rimanere immobile, mentre una massa di 0,3 g ne provoca un lieve spostamento, si dirà che la soglia di mobilità della bilancia in quel punto della scala ed in quelle condizioni è di 0,3 g.

Per determinare invece l'*errore di mobilità* si può procedere in questo modo (fig. 4.12): si sottopone successivamente lo strumento (che si trova nel punto X della scala) alle due grandezze in entrata $X - \Delta X$ ed $X + \Delta X$ (con ΔX superiore alla soglia di mobilità) e si fa tendere nei due casi ΔX a zero. Lo strumento si fermerà nelle due posizioni A e B . Lo scarto tra le due posizioni d'arresto ($B - A$) è il doppio dell'errore di mobilità.

L'errore di mobilità è diverso da quello che la norma UNI 4546 definisce come *errore di inversione*: "differenza, in valore assoluto, tra il valore rilevato con lo strumento allorché la posizione dell'indice viene raggiunta col crescere della grandezza, ed il valore rilevato col diminuire di essa". L'errore di inversione è rappresentato in fig. 4.13. La linea continua rappresenta il caso di una ripresa di gioco che si manifesta, istantaneamente, quando si inverte il senso di variazione del misurando. I meccanici

(6) La UNI 4546 parla invece di *soglia di sensibilità* che definisce come "la più piccola variazione di grandezza capace di modificare la condizione di equilibrio dell'indice, in un determinato punto della scala".

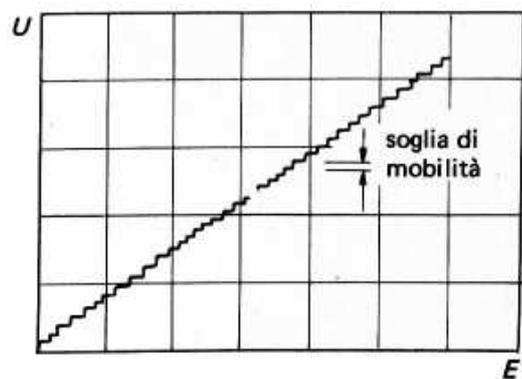


Fig. 4.11 –
Rappresentazione della soglia di mobilità. La presenza di una soglia di mobilità si vede come una seghettatura nella registrazione della caratteristica di funzionamento di un trasduttore.

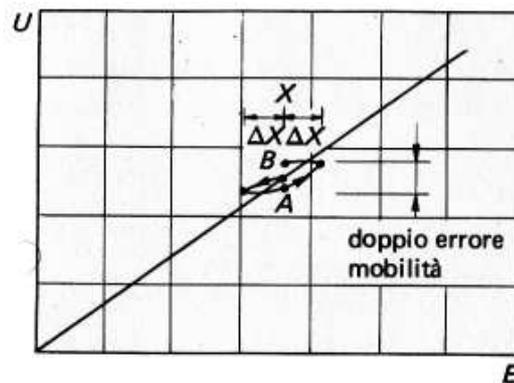


Fig. 4.12 –
Rappresentazione dell'errore di mobilità. Esso è il doppio dello scarto tra le due posizioni d'arresto dello strumento, per il medesimo valore del misurando, raggiunto una volta in discesa ed una in salita, e muovendosi nell'intorno del punto di misura.

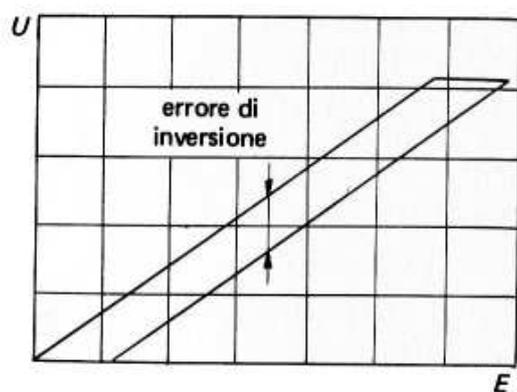


Fig. 4.13 –
Rappresentazione dell'errore d'inversione. E' dovuto ai giochi meccanici, si presenta quando si inverte il senso di variazione del segnale misurando. Con una traslazione degli assi si possono sovrapporre le caratteristiche di funzionamento in salita ed in discesa.

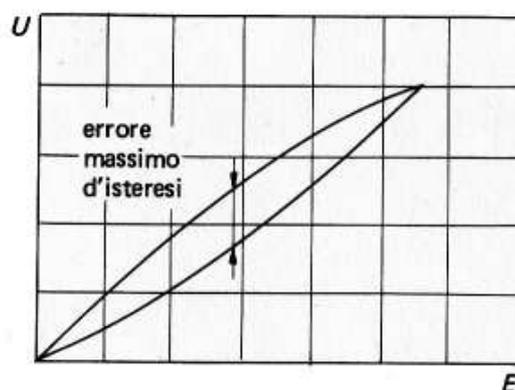


Fig. 4.14 –
Rappresentazione dell'errore d'isteresi. E' dovuto agli attriti secchi e viscosi. Le caratteristiche di funzionamento in salita ed in discesa sono tra loro diverse, e non si possono sovrapporre con una traslazione degli assi.

conoscono bene questo fenomeno, che si può osservare nel caso di collegamento vite-madrevite con gioco dovuto all'usura, o nel caso di strumenti che contengono ingranaggi (come il manometro della fig. 3.12 oppure il comparatore della fig. 3.19). Si noti che nelle figg. 4.11, 4.12 e 4.13 gli errori di mobilità ed inversione sono espressi in unità della grandezza in uscita. Sarebbe altrettanto legittimo esprimerli in unità della grandezza in entrata.

4.2.2.3. Errore di isteresi. Non si confonda l'errore di inversione con l'*errore di isteresi*, che si manifesta come diversità della caratteristica di funzionamento in salita rispetto a quella in discesa. L'isteresi può essere di natura elastica, oppure dovuta ad attriti secchi o viscosi, o ad effetti di vincolo. Il valore dell'errore di isteresi si misura generalmente in corrispondenza al 50% della portata, dove esso è di solito massimo.

Per meglio comprendere questi diversi tipi di errori, si confrontino le figg. 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, in cui si vedono le registrazioni della caratteristica di funzionamento $U=f(E)$ per trasduttori che manifestano diversi tipi di errori.

Si noti però che nei casi pratici diversi tipi di errori possono essere presenti insieme sullo stesso trasduttore. Non è raro infatti che fenomeni di mobilità, inversione ed isteresi si presentino insieme. Le seghettature della fig. 4.11 si sovrapporranno dunque alle caratteristiche di figg. 4.13 e 4.14.

Si noti infine che in tutte queste considerazioni noi abbiamo escluso l'effetto del tempo, che renderebbe necessario introdurre altri concetti, e darebbe luogo a forme diverse delle registrazioni. Così nel caso di misure dinamiche si parlerà della *prontezza* di uno strumento = capacità di sentire "rapidamente" le variazioni del misurando. Essa non ha ovviamente alcun rapporto con la *mobilità* di cui abbiamo parlato = capacità di sentire le *piccole* variazioni del misurando.

4.2.3. Errori sistematici dovuti all'apparecchio ed alle condizioni di misura.

4.2.3.1. Errore sullo zero. Una misura è quasi sempre la differenza tra due letture, di cui una è quella di riferimento. Sovente si sceglie come lettura di riferimento lo zero. Quando l'organo indicatore non ritorna dopo ogni lettura alla posizione di riferimento allora si commette un errore che è appunto l'errore di zero.

Alcuni apparecchi — per ridurre l'errore di zero — hanno un riscontro a mezzo del quale si costringe il dispositivo indicatore a raggiungere sempre la stessa posizione di riferimento.

Questa non sembra una maniera vantaggiosa in quanto non permette di vedere se — per via di un guasto — la posizione di riferimento sia fuori dalla sua giusta posizione. Così ad esempio se la molla di trazione di un indice è fuori taratura, allora applicando la grandezza all'ingresso l'indice si sposterà egualmente, però indicherà una lettura sbagliata. Si noti che a seconda dei casi questo può essere un errore sistematico, costante nel tempo per lo stesso strumento, oppure un errore accidentale variabile di volta in volta con legge gaussiana.

4.2.3.2. Errore di linearità della caratteristica. A questo termine si possono aggiungere tutte quelle deviazioni sistematiche della caratteristica reale rispetto alla caratteristica nominale che vengono messe in evidenza dalla taratura, e permettono poi di eseguire eventualmente delle correzioni sui valori ottenuti nel corso del funzionamento.

4.2.3.3. Errore sulla grandezza di riferimento. Abbiamo visto come l'esecuzione di una misura si riduca al confronto, mediante uno strumento, di un campione e del misurando. Anche negli strumenti a deviazione il campione (non presente nello strumento) interviene nella misura: si ricordi che lo strumento è *tarato* e questa taratura è stata fatta per confronto con un campione.

Abbiamo detto che per tarare uno strumento si sceglie un campione di precisione più elevata di quella che si presume possa dare lo strumento, in modo che l'errore che nasce dall'imperfezione del campione sia trascurabile rispetto a quello dello strumento. Ciò non toglie che si possa valutare un errore sulla grandezza di riferimento (campione) ed in alcuni casi se ne debba tener conto. Questo errore si somma a quello sistematico messo in evidenza in taratura come deviazione dalla caratteristica, nel senso che come quest'ultimo rappresenta differenze tra l'indicazione dello strumento e quelle del campione, così l'errore sulla grandezza di riferimento rappresenta la differenza tra l'indicazione del campione, ed il valore *vero* (= più probabile) del campione.

Si noti poi che in molti casi pratici di misura si considera convenzionalmente come valore *di riferimento* quello proveniente da uno strumento o dispositivo particolare (ad es. una frequenza campione proveniente da un oscillatore). In questo caso è ben evidente che nell'errore della misura interviene quel termine sistematico dovuto alla non perfetta conoscenza che noi abbiamo del valore del campione (ed eventualmente anche il termine accidentale che proviene ad es. dalle variazioni del valore del campione nel tempo).

4.2.3.4. Errore di disturbo(7). E' l'alterazione del valore della grandezza (misurando), provocato dallo strumento, in determinate condizioni di impiego (UNI 4546).

(7) Le norme e gli autori francesi lo chiamano *erreur de réaction*. Per questo si sente talvolta parlare di *errore di reazione*, per quanto il termine *reazione* non si ritrovi nelle norme italiane. I francesi definiscono poi come *finesse* la qualità metrologica di uno strumento di presentare un piccolo errore di disturbo. Nelle norme italiane non si parla di *finezza* , ma questo termine viene talvolta usato in testi italiani.

Si noti infatti che anche quando si siano compensati gli errori sistematici provenienti dalle grandezze d'influenza, e si siano corretti quelli messi in evidenza dalla taratura, una causa almeno di errore sistematico resta in ogni caso nella misura, per le perturbazioni dovute alla presenza dello strumento.

Senza strumento non si può misurare, ma con lo strumento si osserva sempre un fenomeno che è diverso da quello ideale che si ha in sua assenza.

I seguenti esempi chiariranno tale tipo di errore: un micrometro a molla usato come strumento di misura in un dinamometro influenzerà la grandezza da misurare per via della forza esercitata dalla sua molla; un micrometro Palmer influenzerà le dimensioni del corpo da misurare a mezzo della sua pressione; un accelerometro varierà la risposta di un corpo a causa della massa propria; un voltmetro influenzerà la misura di una tensione per la caduta da esso procurata; un termometro assorbirà calore dall'ambiente in cui è immerso per misurare la temperatura.

Questo errore di disturbo può presentare diversi aspetti. Da una parte, ad esempio, quando si tratti di misura di grandezze fisiche che non hanno valore uniforme in tutto il campo di misura, non essendo lo strumento puntiforme, esso agisce in maniera da misurare la media ponderale della grandezza, come risulta dai seguenti esempi: un estensimetro, di qualsiasi tipo esso sia, misura la media degli allungamenti che un corpo subisce lungo la base di misura dell'estensimetro; un termometro a resistenza fa la media delle temperature nella zona in cui esso è applicato.

Da un punto di vista più generale, lo strumento modifica però forma e valore del segnale misurando. Ad esempio un trasduttore di pressione per motori, se è montato sulla testata del motore tramite un condotto che non lo mette a contatto diretto della camera di combustione, misura delle onde di pressione che si sovrappongono alla pressione del motore e ne modificano il ciclo; un trasduttore della detonazione in un motore modifica la forma del fenomeno se non ha una frequenza propria molto elevata ed in ogni caso più grande della frequenza del fenomeno da rilevare; un tubo di Pitot modifica le linee di flusso del liquido di cui vuole misurare la velocità, e così via.

Molte volte si può prevedere quale influenza ha la presenza dello strumento e quindi fare la correzione della misura, perciò è necessario conoscere quella parte o caratteristica dello strumento che ha tale influenza. In un voltmetro è la resistenza interna; in un accelerometro la massa; in un dinamometro la frequenza propria; in un micrometro la forza da esso esercitata; in un termometro a resistenza, come in un estensimetro elettrico a filo resistente, la lunghezza della base di misura.

4.2.3.5. Errore dovuto alle grandezze d'influenza. Uno strumento di misura (o in generale un trasduttore) dovrebbe, in teoria, esser molto sensibile ad una sola grandezza fisica, quella appunto che si vuol misurare, e per nulla sensibile alle altre grandezze fisiche che possono contemporaneamente presentarsi.

Così non è nei casi pratici. Sappiamo che nella classica esperienza di Torricelli, ad esempio, l'altezza della colonna di mercurio varia sia con la temperatura che con la pressione, tanto che non si sa dire se, in sostanza, questo sia un termometro oppure un barometro. La variazione di resistenza di uno strain gage dipende fortemente dalla temperatura, anziché solo dalla deformazione applicata, che si vuole misurare.

La UNI 4546 definisce come *grandezza d'influenza* una grandezza, diversa da quella da misurare, che influenza le indicazioni dello strumento.

Per cercare di ridurre gli effetti (errori) che queste grandezza d'influenza introducono nella misura, si possono seguire diverse strade.

Una prima tattica è la *compensazione* degli effetti dovuti alla grandezza d'influenza. Con un artificio qualsiasi si introduce nello strumento un organo sensibile alla grandezza d'influenza, che dia luogo ad un segnale uguale e di segno contrario a quello che si osserverebbe in sua assenza.

Nel caso dell'orologio (fig. 4.15) la temperatura può provocare un allungamento del bilanciere (pendolo) e dunque un aumento del periodo di oscillazione. Il bilanciere sarà dunque composto da una griglia in cui le due aste (quelle che fanno scendere, col loro allungamento, e quelle che fanno salire il baricentro) sono di due metalli differenti. La lunghezza delle aste è calcolata in funzione dei coefficienti di dilatazione lineare, in modo che gli spostamenti verso l'alto e verso il basso si compensino a vicenda.

Un altro esempio: negli strumenti sottoposti a vibrazioni (ad es. i galvanometri) si possono ottenere delle forze d'inerzia di compensazione attraverso un ingegnoso dispositivo. Immergendo l'equipaggio mobile in un liquido di densità tale che la spinta di Archimede sia pari al peso dell'equipaggio, e passi per il suo centro di gravità, l'equipaggio si comporta come se non avesse peso proprio, e le tre componenti della forza di accelerazione sono di conseguenza eliminate. L'equipaggio resta però sensibile ad accelerazioni angolari, che si potrebbero anch'esse compensare collegando con una bielletta l'equipaggio mobile ad un'altra massa ruotante intorno ad un asse parallelo (fig. 4.16).

Nel caso della misura di deformazioni con estensimetri elettrici a resistenza e ponte di Wheatstone la compensazione della temperatura si può ottenere con un estensimetro compensatore (*dummy*) inserito nel ponte sul lato adiacente a quello dell'estensimetro attivo.

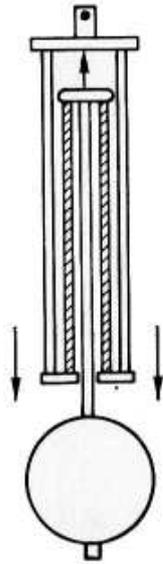


Fig. 4.15 –
Bilanciere compensato di un orologio

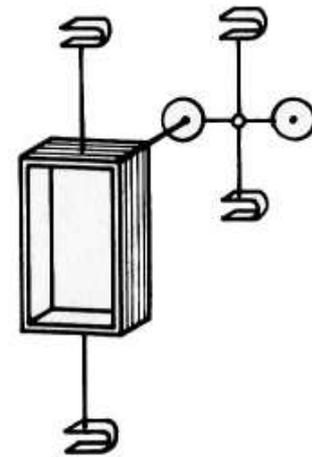


Fig. 4.16 –
Compensazione dell'inerzia di rotazione
(secondo M. Bassière)

Un altro metodo per ridurre gli errori dovuti alle grandezze d'influenza è quello dell'*insensibilizzazione* dello strumento, sovente attraverso una scelta appropriata dei materiali. Nel caso di strumenti per la misura di lunghezze o di strumenti elettrici, è comunissimo l'uso dell'invar (debole dilatazione) o della costantana (resistività poco sensibile alle variazioni di temperatura) per evitare le perturbazioni dovute alla temperatura.

Un altro metodo è quello della *correzione* dell'effetto della grandezza d'influenza, quando si conosca la legge che lega la grandezza d'influenza ai suoi effetti sulla misura, e si possa misurare il valore della grandezza d'influenza durante la prova. Ad esempio nel caso dell'errore introdotto in una misura di lunghezza dalla variazione di temperatura, si potrà correggere il risultato della misura di una quantità calcolata partendo dal coefficiente di dilatazione lineare e dalla misura della temperatura durante la prova.

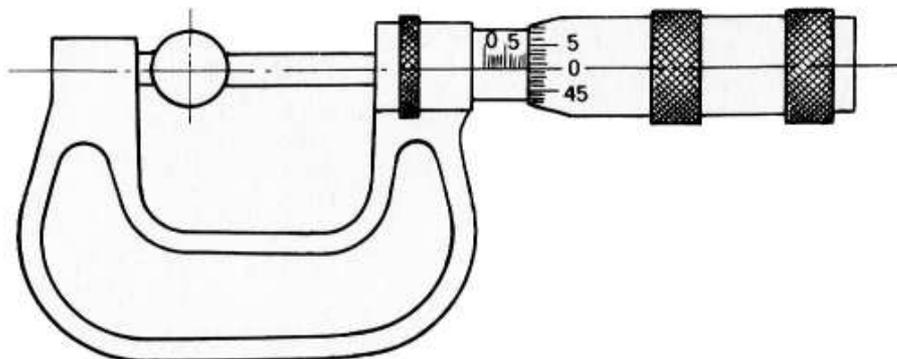


Fig. 4.17 – Misura del diametro di un cilindretto di rame, a mezzo di un micrometro con nonio

In altri casi si potrà pensare ad una *eliminazione* della grandezza d'influenza, sopprimendola, od attenuandone almeno le variazioni. Questo specie quando l'effetto delle grandezze d'influenza assume l'aspetto di un errore accidentale, in quanto queste non si possono tenere sotto controllo. (Si pensi ad esempio al rumore di fondo nelle misure elettriche, od alle influenze che in sistemi di telemisura con frequenza portante hanno i fenomeni atmosferici (uragani), parassiti industriali (motori elettrici) o l'intermodulazione dovuta all'emissione di altre frequenze portanti. Si conoscono le cause di disturbo, ma non potendole in generale tenere sotto controllo, esse introducono effetti di tipo accidentale).

Così, per l'eliminazione di grandezze d'influenza, gli strumenti elettrici saranno protetti dai campi elettrici ponendoli in gabbie di Faraday, le tensioni di alimentazione saranno stabilizzate mediante autotrasformatori a ferro saturo, ecc. Per mettersi al riparo dalle vibrazioni, si farà uso di sospensioni elastiche, e così via. Inutile notare che comunque l'eliminazione delle grandezze d'influenza non sarà mai completa.

Infine, in molti casi, si potrà pensare di *trascurare* l'effetto delle grandezze d'influenza, quando, previsto l'effetto, si giudichi che esso non modifica, in modo apprezzabile, il fenomeno in esame. Così, ad esempio, nel caso della misura di una forza statica, realizzata mediante pesi, si potranno in generale trascurare le variazioni di forza prodotte dalla variazione della spinta di Archimede sui pesi, a causa delle variazioni della pressione atmosferica.

Per valutare, in qualche modo, l'effetto che le grandezze d'influenza hanno sulle misure, si potranno ad esempio indicare i limiti estremi di variazione della grandezza d'influenza entro cui lo strumento conserva ancora la precisione dichiarata dal costruttore (in quanto l'errore dovuto alle grandezze d'influenza non supera certi limiti). Così si dirà ad esempio che un certo calibro può essere utilizzato tra 15 °C e 25 °C.

In altri casi, anche per permettere all'utilizzatore di eseguire, sulle sue misure, la correzione (di cui abbiamo parlato sopra) dovuta alla presenza di grandezze d'influenza, e di riportare le sue misure alle condizioni *normali* o *nominali* d'impiego, si potrà definire una *sensibilità ad una grandezza esterna d'influenza* (8). Essa si determina eseguendo una serie di misure sulla grandezza in uscita, conservando costante la grandezza in entrata, e facendo variare la grandezza d'influenza. Essa verrà indicata dalla *variazione apparente* del misurando, che corrisponde a una data variazione della grandezza d'influenza.

(8) Questo ulteriore tipo di sensibilità non si trova nelle norme UNI ed ISA italiane, tuttavia può essere talvolta utile, come indicato negli esempi, ed anche indicato dai costruttori.

Così in un estensimetro elettrico la sensibilità alla temperatura si determina misurando la resistenza dell'estensimetro, con deformazione applicata costante (o nulla) e temperatura variabile. Questa sensibilità alla temperatura si esprimerà dunque come

$$\frac{\Delta R / R \text{ (variazione apparente di resistenza)}}{\Delta T \text{ (di variazione di temperatura)}}$$

E' ovvio che la sensibilità ad una grandezza esterna d'influenza costituisce una qualità negativa di un trasduttore, perciò il suo valore è bene sia il più piccolo possibile.

4.2.3.6. Errori dovuti alla variazione del misurando con il tempo.

Nel caso di misure dinamiche lo strumento segue con una certa difficoltà le variazioni del misurando, a causa della sua inerzia (meccanica ed elettrica) e degli smorzamenti (meccanici, elettrici e magnetici). Il segnale di uscita presenta, in generale, rispetto al segnale di ingresso, una differenza sia di ampiezza che di fase. La legge che lega il segnale di uscita a quello di ingresso dipende dal tipo di trasduttore. Le misure dinamiche costituiscono un capitolo molto importante della metrologia, che però non sarà trattato in questo volume.

4.2.4. Un esempio (9). Un esempio può aiutarci a meglio riconoscere le differenti cause d'errore in una misurazione. Supponiamo di effettuare la misura del diametro di un provino cilindrico di rame, a mezzo di un micrometro con nonio (1 divisione = 0,002 mm) (fig. 4.17).

1. Valore letto sulla scala dello strumento 37,472 mm
2. Errori accidentali:
 - a. dovuti all'operatore: incertezza nella lettura (errore di lettura) ± 0,002 mm
 - b. dovuti al misurando: indeterminazione della superficie di misura (rugosità, ovalità ...) ± 0,010 mm
 - c. dovuti al metodo di misura: incertezza nell'ortogonalità tra l'asse del provino e l'asse delle aste di misura; pressione di misura variabile con la velocità di serraggio della vite micrometrica ± 0,010 mm
3. Errori sistematici:
 - a. errore di disturbo: ovalizzazione del provino di rame dovuta al serraggio (± 0,010 ± 0,002) mm

(9) Tratto da Portalupi (vedi bibliografia).

b.	errori dovuti alle condizioni ambientali: correzione per l'influenza della temperatura (26 °C anziché 20 °C)	(±0,006 ± 0,001) mm
	(errore dovuto alle grandezze d'influenza)	
c.	errori dello strumento: correzione per tener conto dell'errore del micrometro, controllato con una pila di blocchetti di riscontro con incertezza (errore assoluto) totale della misura di ± 0,001 mm	(-0,015 ± 0,001) mm
	(errore sulla grandezza di riferimento)	
	Misura corretta	(37,473 ± 0,015) mm (10)

Si può notare che l'incertezza (errore) totale nella misura (0,015 mm) è di ordine di grandezza più elevata che il valore di una divisione dello strumento. Nel valore del diametro calcolato dopo la correzione (37,473 mm) l'ultima cifra è illusoria e la penultima dubbiosa. D'altra parte si noti che la ripetizione delle misure, e l'eliminazione (o compensazione) delle cause di errore sistematico può diminuire l'errore totale, ma giammai annullarlo. Restano dei limiti insuperabili dovuti al tipo di strumento ed al metodo di misura.

4.3. Fedeltà, accuratezza, precisione

Abbiamo già visto come gli errori accidentali distribuiscano i valori di una misura, che si possono ottenere con successive ripetizioni, secondo una gaussiana. I due parametri caratteristici della distribuzione (scarto tipo e media) sono in relazione con due caratteristiche metrologiche dello strumento: la qualità di dare valori poco dispersi in misurazioni successive, e la qualità di dare una media delle misure il più possibile vicina a quella che si otterrebbe da un gran numero di misure con l'apparecchio più perfetto di cui si può disporre (11).

(10) Per tener conto di una probabile compensazione tra i diversi errori accidentali (colonna a destra, con doppio segno) noi abbiamo calcolato l'intervallo globale di approssimazione ($\pm 0,015$ mm) non già come la somma dei valori assoluti dei singoli errori accidentali (0,026 mm), bensì come la media quadratica degli intervalli di confidenza delle differenti sorgenti d'errore, considerate come statisticamente indipendenti (vedi Appendice) secondo la formula:

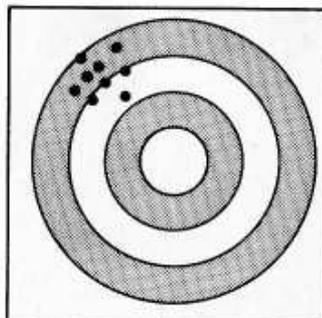
$$\sigma_{\epsilon_{\text{tot}}} = \sqrt{\sigma_{\epsilon_1}^2 + \sigma_{\epsilon_2}^2 + \dots + \sigma_{\epsilon_n}^2}$$

(11) Questo è il *valore più probabile* del misurando. Oggi pochi soltanto lo chiamano ancora *valore vero*.

Nel § 4.3.1. parleremo della prima qualità metrologica, che è in relazione con gli errori accidentali. Nel successivo § 4.3.2. parleremo della seconda, in relazione con gli errori sistematici. Nel § 4.3.3, infine, parleremo di quella qualità metrologica che risulta dalla somma delle due precedenti. Inoltre ci riferiremo alla fig. 4.18 e alla tabella relativa.

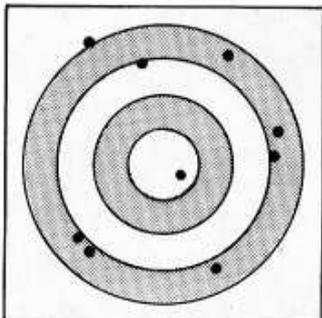
4.3.1. Fedeltà o ripetibilità - Fidélité (fr.) - Precision (ingl.). (Errori accidentali). La *fedeltà* (o *ripetibilità*) è dunque la qualità metrologica in relazione con gli errori accidentali. Secondo le norme uno strumento è

	qualità metrologica di una misurazione in relazione a:		
	errori accidentali	errori sistematici	errore globale
inglese	precision	(un) bias	accuracy
francese	fidélité	justesse	précision
italiano	fedeltà o ripetibilità (UNI 4546)	accuratezza (UNI 5968-67)	precisione (progetto ISA)



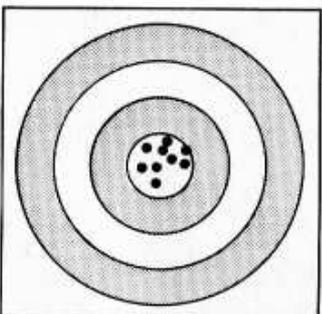
a) Primo fucile

it. ripetibile ma non accurato
fr. fidèle mais pas juste
ingl. precise but biased



b) Secondo fucile

it. accurato ma non ripetibile
fr. juste mais pas fidèle
ingl. unbiased but imprecise



c) Terzo fucile

it. accurato e ripetibile = preciso
fr. juste et fidèle = précis
ingl. unbiased and precise = accurate

Fig. 4.18 — Rappresentazione delle qualità metrologiche degli strumenti attraverso il comportamento al tiro a segno di uno stesso tiratore con tre diversi fucili.

tanto più fedele quanto più — misurando una stessa grandezza in condizioni costanti — dà delle indicazioni che concordano tra loro (fig. 4.18a). Seguendo i criteri introdotti dalla teoria degli errori e dalla statistica, l'*errore di fedeltà* può essere valutato attraverso il calcolo dello scarto tipo s di una serie di misure in condizioni costanti. Poiché però in molti casi, non si vogliono o si possono eseguire troppe misure di una stessa grandezza, le norme considerano anche la differenza tra il valor massimo e quello minimo (*range* in statistica) di un certo numero di misure. Così è ad esempio nel caso della taratura di una macchina di prova dei materiali, in cui le norme chiedono, per la classificazione della fedeltà della macchina, che la differenza tra il valor massimo e quello minimo di cinque letture successive non superi un determinato valore.

Ecco le definizioni della norma UNI 4546:

Fedeltà

Attitudine dello strumento a fornire misure poco disperse in molte misurazioni della stessa grandezza, effettuate successivamente in un breve intervallo di tempo e nelle medesime condizioni. E' espressa per mezzo dello scarto tipo di ripetibilità o dell'errore limite di ripetibilità o del campo di ripetibilità.

Scarto tipo di ripetibilità

Media quadratica degli scarti tra n misure x_i della stessa grandezza, ottenute nelle medesime condizioni ed in un breve intervallo di tempo, ed il loro valore medio \bar{x}

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Errore limite di ripetibilità

Scarto che presenta il 95% di probabilità di non essere superato in numerose misurazioni della stessa grandezza, effettuate nelle medesime condizioni ed in un breve intervallo di tempo, nella ipotesi di una distribuzione normale delle misure

$$s'_R = 2s_R$$

Campo di ripetibilità

Differenza tra il valore massimo $v_{\text{mass.}}$ ed il valore minimo $v_{\text{min.}}$ ottenuti in n misurazioni della stessa grandezza effettuate successivamente in un breve intervallo di tempo, utilizzando lo strumento nelle medesime condizioni

$$\epsilon_R = v_{\text{mass.}} - v_{\text{min.}}$$

Al concetto di *fedeltà* di uno strumento, le norme associano poi il concetto analogo di *stabilità*. Eccone la definizione secondo la UNI 4546:

Stabilità

Attitudine dello strumento a fornire misure poco disperse in molte misurazioni della stessa grandezza, effettuate ad intervalli di tempo lunghi rispetto alla durata di esse, utilizzando lo strumento nelle medesime condizioni. E' espressa per mezzo dello scarto tipo di stabilità o dell'errore limite di stabilità o del campo di stabilità.

Mentre dunque la *fedeltà* è l'attitudine a fornire valori di misura poco dispersi in misurazioni effettuate in un *breve periodo di tempo* in condizioni ambientali supposte costanti, la *stabilità* è invece l'attitudine a fornire valori poco dispersi in *intervalli di tempo lunghi* rispetto alla durata delle misure.

Questa caratteristica di *stabilità* è dunque importante quando esistano delle cause che possono provocare una *deriva* nel tempo, cioè una variazione a lungo termine del valore della misura. Così, ad esempio, in un dinamometro con estensimetri elettrici a resistenza vi può essere l'errore di *stabilità* o la *deriva* causata dal rilassamento conseguente al cattivo incollaggio degli estensimetri. Negli strumenti elettrici indicatori o registratori vi può essere una *deriva* dello zero dovuta ad effetti termici.

La stessa norma UNI 4546 dà poi delle definizioni di scarto tipo di *stabilità*, errore limite di *stabilità*, campo di *stabilità*, del tutto analoghe a quelle sopra riportate per la *ripetibilità*. C'è da aggiungere però che è sempre necessario fornire l'intervallo di tempo entro cui l'errore di *stabilità* si è manifestato. Così ad esempio si dirà che l'errore di *stabilità* o la *deriva* di un determinato dinamometro, ad un determinato carico è di $x N$ lungo il periodo di 1 h o di 1 d.

Nella terminologia francese ed inglese al concetto di *fedeltà* fa riscontro quello di *fidélité* (fr.) e di *precision* (ingl.). Su questa terminologia non ci sono equivoci, tranne naturalmente quando qualche autore traduce in italiano *precision* con *precisione*, anziché con *ripetibilità*.

4.3.2. Accuratezza - Justesse (fr.) - Bias (ingl.). (Errori sistematici).
La *justesse* francese è la qualità metrologica in relazione con gli errori sistematici dello strumento, o della misura. Secondo le norme francesi uno strumento è tanto più "giusto" quanto più la media delle misure che esso dà, per uno stesso valore del misurando, si avvicina al valore più probabile dello stesso misurando (fig. 4.18b).

L'*errore di justesse* dello strumento (sempre secondo le norme francesi) viene dunque calcolato, per un dato valore del misurando, come la differenza tra la media aritmetica di un gran numero di misure effettuate con l'apparecchio in questione, e la media che si otterrebbe da un gran numero di misure con l'apparecchio più perfetto di cui si può disporre.

A priori l'*errore di justesse* potrebbe essere invece calcolato come la somma algebrica di tutti gli errori sistematici a cui lo strumento è sensibile, in condizioni determinate d'impiego.

Nella nomenclatura italiana non vi è purtroppo altrettanta chiarezza come in quella francese. In relazione alla qualità metrologica della *justesse* le norme italiane tacciono, oppure (UNI 4546, § 4.3.1.) la chiamano con il nome di "precisione" che deve essere invece riservato a quanto definito nel prossimo paragrafo.

Noi proponiamo di accettare la norma sperimentale UNI 5968-67 (*Metodi statistici per il controllo della qualità*) che introduce il termine "accuratezza" al § 4.1.1.:

Accuratezza

Differenza, in valore e segno, tra il valor vero e la media di una serie di osservazioni.

Questo termine, nuovo per l'Italia, va diffondendosi sempre più. Esso deriva dall'inglese *accuracy*, che è anch'esso usato talvolta in modo equivoco. C'è infatti chi usa *accuracy* per indicare sia quanto espresso in questo paragrafo sia quanto sarà espresso nel prossimo.

Noi preferiamo seguire per quanto riguarda la terminologia inglese, R.E. Kemp (vedi bibliografia) che chiama *bias* l'*errore di justesse* (fr.) e riserva *accuracy* per indicare la qualità descritta nel prossimo paragrafo.

4.3.3. Precisione - Precision (fr.) - Accuracy (ingl.). (Errore globale) - Classe di precisione. La *precisione* è la qualità globale dello strumento, che risulta (fig. 4.18c) dalla sintesi delle altre due appena definite: fedeltà (§ 4.3.1.) e accuratezza (§ 4.3.2.).

La precisione viene dunque valutata dall'*errore assoluto* dello strumento, definito come la più grande differenza possibile (ad un certo livello di probabilità) tra un *risultato singolo* ottenuto dallo strumento, ed il valore più probabile del misurando, in quelle stesse condizioni.

Spesso (ed in particolare per gli strumenti elettrici) si parla della *classe di precisione* dello strumento, definita come il quoziente dell'*errore assoluto* (supposto costante in tutto il campo di misura) diviso per la portata massima.

Quando il venditore di un dinamometro con portata massima di 5.000 g garantisce la precisione (12) di ± 5 g nell'intervallo 1.000 – 5.000 g (campo di misura) (= classe di precisione 0,1% nei 4/5 superiori della scala) ciò significa che il venditore ci deve garantire che, in qualsiasi punto del campo di misura, e nelle condizioni normali d'impiego (e noi aggiungiamo, con visione statistica del problema, "... e nel 99% dei casi, almeno ...) la differenza tra l'indicazione dello strumento correttamente adoperato ed il valore più probabile del misurando non potrà mai superare ± 5 g.

Analogamente, se un amperometro di portata massima 20 A è di classe $\pm 1,5$, ciò significa che ogni misura effettuata con questo strumento (sia essa 5, 10 o 20 A) può essere affetta da un errore assoluto (massimo) di $\pm 1,5\% \cdot 20 \text{ A} = 0,3 \text{ A}$. E' evidente che l'errore relativo non è costante nei diversi punti del campo di misura.

La norma italiana UNI 4546 dà le seguenti definizioni di *errore assoluto*, *relativo*, *classe di precisione* ed *indice di classe*:

Errore assoluto

Differenza algebrica tra il valore rilevato della grandezza ed il valore vero di essa. Come valore vero di una grandezza si intende quello ottenibile con un procedimento di misurazione il più perfetto possibile.

Errore relativo

Rapporto adimensionale tra l'errore assoluto ed il valore vero della grandezza misurata. E' generalmente espresso in per cento.

Classe di precisione

Categoria di strumenti che forniscono la misura con errore minore di un limite stabilito, quando ciascuno strumento sia utilizzato nelle condizioni specificate.

Indice di classe

Simbolo che caratterizza la classe di precisione.

Non siamo invece d'accordo con la definizione che la stessa UNI 4546 dà della *precisione* che riporta questa qualità metrologica a quella che i francesi chiamano *justesse* e gli inglesi *bias*:

(12) Si noti che la "precisione di ± 5 g" dovrebbe invece dirsi "imprecisione di ± 5 g". Analogamente gli inglesi, invece che "accuratezza di $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ " dovrebbero dire "inaccuratezza di $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ ". Purtroppo questi modi di dire sono talmente entrati nell'uso corrente da costituire una regola. I soli tedeschi parlano di *Unsicherheit*.

Precisione

Attitudine dello strumento a fornire le misure col minimo errore. E' in ragione inversa dell'errore assoluto medio e può essere espressa dall'indice di classe.

Errore assoluto medio

Differenza algebrica tra la media di numerose letture della stessa grandezza, ottenute utilizzando lo strumento nelle medesime condizioni, ed il valor vero di essa.

Fra tutte la definizione del progetto di normalizzazione ISA (vedi bibliografia) risulta la più corretta:

Precisione:

Attitudine dello strumento a fornire una misura, attraverso una lettura diretta o un segnale di uscita, col minimo errore rispetto ad un valore vero o ad un campione accettato. Essa è definita dalla classe di precisione e dall'indice di classe.

Per quanto riguarda le norme estere, le norme francesi (NF 07 001) definiscono la *précision*, come somma di *fidélité* e di *justesse*, in questo modo:

“Uno strumento di misura è tanto più preciso quanto più i risultati che se ne ricavano coincidono, con una migliore approssimazione, con il valore vero della grandezza da misurare. Questa qualità è meglio raggiunta quanto più: *a)* lo strumento ha maggior mobilità, cioè la sua soglia di mobilità è più bassa; *b)* lo strumento è più fedele, cioè ha un più piccolo errore di fedeltà; *c)* lo strumento è più giusto, cioè ha un più piccolo errore di giustezza”.

Nei testi inglesi ed americani si distingue chiaramente tra *precision* che riguarda la concordanza tra loro di diverse misure, ed *accuracy* che riguarda la concordanza delle misure con il valor vero. Ma spesso non si chiarisce se questa concordanza con il valor vero è quella delle misure singole o della media (in questo secondo caso il concetto di *accuracy* si sovrapporrebbe a quello di *bias*).

Per quanto sia stato da altri e da noi adottato, dobbiamo avvertire che il termine *bias*, molto usato in campo statistico, viene ignorato da alcuni autori in campo metrologico. Ciò porta quindi ad equivoci sul significato della *accuracy*.

Si noti infine che *precisione* (it.) ed *accuracy* (ingl.) non si corrispondono perfettamente, perché la precisione si riferisce ad un errore assoluto

massimo, mentre *accuracy* si riferisce sempre ad un errore relativo. Quando in italiano si vorrà indicare un errore relativo si dovrà parlare di *classe di precisione*.

Un progetto di raccomandazione dell'OIML PR 24 (Mosca, maggio 1972) (13) su *Le classi di precisione degli strumenti per misurazione* stabilisce i seguenti principi generali:

- a. Per ciascuna classe di precisione d'una categoria di strumenti devono essere fissati i parametri e le caratteristiche che determinano le proprietà metrologiche particolari che rischiano di provocare errori strumentali durante le misurazioni effettuate con l'aiuto di questi strumenti.
- b. Per ciascuna categoria di strumenti dev'essere fissato un certo numero di classi di precisione che riflettano i livelli di proprietà metrologiche che corrispondano a determinati *bisogni* della scienza e della tecnica.

Fissati i principi generali, il progetto introduce i seguenti tipi di errore:

1. *Errore massimo assoluto* costante, $\Delta = \pm a$; errore massimo assoluto in relazione lineare con il valore della grandezza x da misurare, $\Delta' = \pm (a + bx)$.
2. *Errore massimo ridotto*, cioè riferito ad un valore convenzionale x_N , $\gamma = \pm \frac{100 |\Delta|}{x_N} \%$.

Quando x_N assume il valore della portata massima, questo errore prende il nome di *errore di fondo scala*. Negli strumenti a zero centrale o in quelli che non hanno uno zero (ad es. i termometri a mercurio) il valore della portata corrisponde a tutto il campo di misura (senza tener conto del segno).

3. *Errore massimo relativo*, cioè riferito al valore x della grandezza da misurare, $\delta = \pm \frac{100 |\Delta|}{x} \%$; errore massimo relativo dipendente dal valore x della grandezza da misurare, $\delta' = \pm (c' + d \frac{x_m}{x}) \%$, dove x_m è il limite superiore (per alcuni strumenti è la portata massima) o l'intervallo di variazione del campo di misura. Se s'indica con c l'errore massimo relativo costante e si pone $c' = c - d$, allora la precedente espressione si può scrivere nella forma $\delta' = \pm [c + d (\frac{x_m}{x} - 1)] \%$

(13) Questo progetto è adottato dalla Sottocommissione UNIPREA, *Strumenti per misurazione* che sta elaborando una nuova norma in sostituzione della UNI 4546.

dalla quale si vede che solo quando è $x = x_m$, diventa $\delta' = \delta = c$; per gli altri valori di x , δ' diventa maggiore di c .

4.3.4. Risoluzione - Potere risolutivo. Il termine *potere risolutivo* è di uso corrente nel caso degli strumenti ottici. Ma esso non è citato da alcuna delle norme italiane che si riferiscono alle qualità metrologiche degli strumenti in generale.

Su testi e cataloghi inglesi si parla spesso di *resolution* di uno strumento. E vi è chi traduce "risoluzione". Con questo termine si possono intendere due cose diverse:

1. Da una parte si può pensare (come Idrac, vedi bibliografia) che gli errori di lettura e mobilità (n. 1 e 2 in fig. 4.10) hanno entrambi l'effetto di mascherare le piccole variazioni del misurando. Si può quindi farne la somma quadratica:

$$\sqrt{e_{\text{lett.}}^2 + e_{\text{mob.}}^2}$$

per caratterizzare la più piccola variazione del misurando che si può mettere in evidenza con lo strumento. Se si chiama *risoluzione* questo termine, esso (a meno del termine $e_{\text{lett.}}^2$) è simile alla *soglia di mobilità* definita al § 4.2.2.2.

Nel caso di strumenti numerici (ogni giorno più diffusi) siano essi indicatori o stampanti, il valore di questa *soglia* appare più oggettivo, in quanto si può assumere il valore di una unità dell'ultima cifra indicata.

2. Da un altro punto di vista si può pensare di intendere come *risoluzione* di uno strumento il limite superiore dell'errore assoluto globale. Così, dicendo che una bilancia di portata 100 g ha una risoluzione di 0,1 g si vuol dire che la bilancia ci permette di fare delle misure "al decimo di grammo" e cioè che l'errore assoluto globale (ad un certo livello di probabilità) è inferiore a 0,1 g.

Questa terminologia completerebbe la definizione di (classe di) precisione ed *accuracy*, che esprimono invece un errore relativo.

Questo modo di intendere la risoluzione non trova certo l'accordo generale, ma ci sia qui permesso di insistere sull'importanza che l'utilizzatore di uno strumento conosca il valore che hanno le cifre che egli può apprezzare con lo strumento.

E' infatti inutile disporre di un gran numero di cifre significative nella lettura, se la mobilità è poca ma soprattutto se la precisione è scarsa. E' inutile leggere 1 °C su di un termometro industriale in cui gli errori, per delle ragioni di costruzione e di metodo d'uso, sono dell'ordine di (5-10) °C. E se il costruttore ha realizzato saggiamente una scala con divisioni

ogni 5 °C, è inutile usare una lente per valutare le frazioni di divisione. La precisione nella lettura che se ne otterrebbe sarebbe soltanto formale, e motivo di illusioni per l'utilizzatore.

In conclusione un buon costruttore di strumenti dovrebbe proporzionare la risoluzione dello strumento (sia attraverso il valore dell'intervallo tra due tratti successivi della scala in uno strumento analogico, sia attraverso il valore dell'ultima cifra significativa in uno strumento numerico) alla mobilità e soprattutto alla precisione del suo dispositivo.

4.4. Scelta di un trasduttore o di un apparecchio

4.4.1. Criteri di scelta basati sulla precisione. Come abbiamo visto nel capitolo 1, un processo di misurazione è preceduto dallo studio e dall'analisi del fenomeno in esame, dalla determinazione della grandezza che è in relazione con il fenomeno e dalle sue caratteristiche, ed infine dalla scelta del tipo di trasduttore con cui la grandezza può essere misurata.

Quando si utilizzi una catena di misura costituita da più trasduttori in serie, oppure quando la misura di una grandezza derivata venga ottenuta attraverso la misura delle grandezze da cui dipende, bisogna porre particolare cura alla scelta della precisione dei singoli trasduttori.

Un esempio è fornito dal modulo di elasticità E di un materiale che — come è noto — dipende (a mezzo della legge di Hooke) dalla misura del carico, della sezione del provino su cui il carico agisce e della deformazione conseguente al carico. È opportuno scegliere i trasduttori o gli strumenti per la misura di ciascuna grandezza con il criterio che la precisione sia uguale o quasi per ciascuno di essi. Così se si vuol determinare il modulo di elasticità con una precisione, ad esempio del 3%, si può scegliere una macchina di prova dei materiali, un micrometro ed un estensimetro, ciascuno con una precisione dell'1%. Nel caso in cui si disponga di un micrometro con una precisione di 0,5%, l'estensimetro può essere scelto con una precisione dell'1,5%.

Tuttavia, nell'applicazione di questo criterio può giocare un ruolo importante il fattore economico, nel senso che costa di meno un micrometro con precisione 0,5% che non una macchina di prova od un estensimetro con la stessa precisione.

In ogni caso è da evitare, in esempi come quelli citati, di scegliere trasduttori con precisioni molto diverse tra loro; così per esempio è superfluo od anzi sprecato l'uso di un trasduttore o di uno strumento di alta classe (0,1%) nella misura di un intervallo di tempo per la misura della

velocità, se la distanza si misura con un trasduttore od uno strumento di classe meno elevata (1%).

4.4.2. Disponibilità sul mercato dei trasduttori. Dopo queste considerazioni l'ultimo passo da fare è conoscere se esiste in commercio quel trasduttore che ha le caratteristiche rispondenti alle necessità stabilite. A questo scopo rispondono molto bene alcuni testi che raccolgono tutte le informazioni necessarie per fare la migliore scelta.

Ciascuno di questi testi raccoglie ovviamente le informazioni sulla produzione nazionale (14) in una forma che in alcuni casi, come ad esempio *I'ISA Compendium* (vedi bibliografia, cap. 3) consente un immediato confronto delle caratteristiche dei trasduttori per la misura della stessa grandezza.

L'ultima edizione di questo *Compendium* della Instrument Society of America consta di tre parti. La prima comprende i trasduttori per la misura della pressione, della portata e del livello; la seconda comprende i trasduttori per la misura dello spostamento, velocità, accelerazione, delle dimensioni, della forza, del momento torcente e del suono; la terza comprende i trasduttori per la misura della temperatura e del calore, delle grandezze magnetiche ed elettromagnetiche, delle grandezze nucleari, per l'analisi chimica e per la misura dell'umidità.

Questo testo è certamente il più completo oggi disponibile sull'argomento, poiché comprende le caratteristiche dei trasduttori che forniscono in uscita un segnale elettrico, costruiti da 460 ditte americane.

(14) In Italia le informazioni sulla produzione nazionale (ed in parte anche straniera) si possono trovare nel catalogo pubblicato in occasione della mostra Biennale della Strumentazione e dell'Automazione che si tiene a Milano (di solito nel mese di novembre). In Inghilterra le informazioni si possono ottenere dal British Instruments Directory - United Science Press Ltd.

BIBLIOGRAFIA

- Portalupi A., *Misurazioni fisiche nella tecnica industriale*, pp. 586, Feltrinelli, Milano, 1962
- Kemp R.E., *Accuracy for Engineers*, *Instrumentation Technology*, 14 (may), 41-46 (1967)
- Comitato di studio ISA, *Proposte di normalizzazione sulle Caratteristiche di qualità degli Strumenti*, *Controlli*, 3 (20 e 21), 29-31 e 11-20 (1968)
- Idrac J., *Mesure et Instruments de mesure*, IV ed., pp. 125, Dunod, Parigi, 1960.
- Proceedings of the 1963 Standards Laboratory Conference*, pp. 254, N.B.S., Miscellaneous Publication 248 (1963)
- Organisation Internationale de Métrologie Légale, *Vocabulaire de métrologie légale: termes fondamentaux - Recommandation internationale de la IIIème conférence, Paris, 1968*, pp. 93, O.I.M.L., Parigi, 1969
- O.I.M.L.: Vocabulary of Legal Metrology, ed. march 1969 PD6461*, pp. 180, British Standards Institution, Londra, 1971
- UNI 4546, *Strumenti di misura - Termini e definizioni*, 13 tabelle, luglio 1960
- Norme francesi FDX 02-002, *Unités de mesure - Définitions*, pp. 22, 1966
- Norme tedesche: DIN 1319 *Grundbegriffe der Messtechnik*, pp. 11 (1968)
- Perucca E., *Fisica generale e sperimentale*, I vol., pp. 919, UTET, Torino, 1961