

Meccanica Sperimentale

(A. A. 2019/2020)

Taratura di uno strumento

(calibration)

Utilità della taratura

E' una procedura specifica che serve a determinare la **funzione di trasferimento** “effettiva” (a meno degli errori)

Taratura (o calibrazione)  $U = f(I)$

Generalmente è sufficiente la taratura statica (si usano più valori in ingresso, però ognuno è mantenuto costante); la taratura dinamica è generalmente più complessa, ma è necessaria solo in casi particolari (es. per gli accelerometri).

Esempio di taratura di una cella di carico estensimetrica

Utilità della taratura

- Determinazione della curva caratteristica (sensibilità)
- Verifica della curva caratteristica
- Determinare alcune qualità metrologiche dello strumento
 - linearità
 - isteresi
 - deriva
 - errori casuali
 - errori parassiti, ecc.

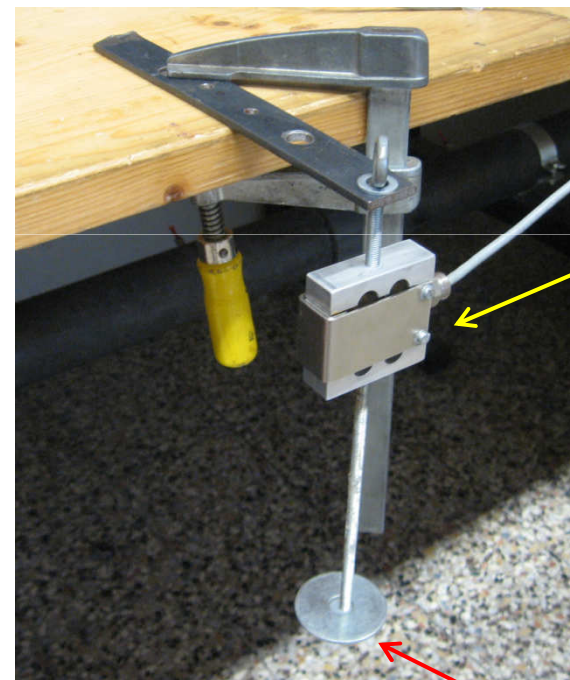
Procedura della taratura

- Trasduttore/catena di misura
- Serie di ingressi campione
- Procedura appropriata

Catena di misura

- Cella di carico
- Centralina estensimetrica
- Scheda di acquisizione
- Computer

Cella di carico



cella di carico

porta pesi

Catena di misura

- Centralina estensimetrica
 - Ponte intero
 - $E = 5 \text{ V}$
 - Amplificazione $G = 1000$

amplificazione
(gain)



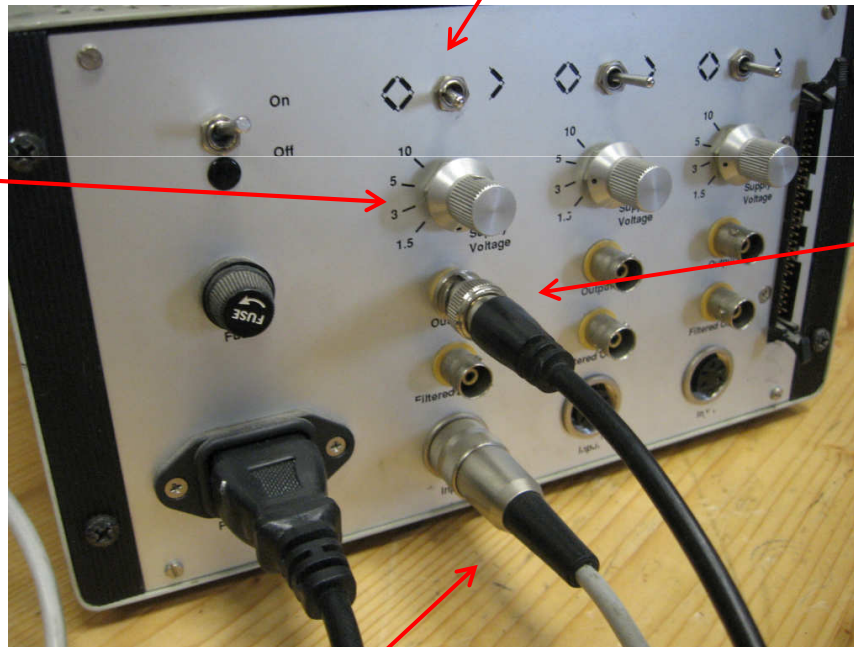
azzeramento
del ponte

Catena di misura

- Centralina estensimetrica

selettore ponte
(1/2 ponte o ponte
intero)

alimentazione
(c.c.)



output (V)

collegamento
cella di carico

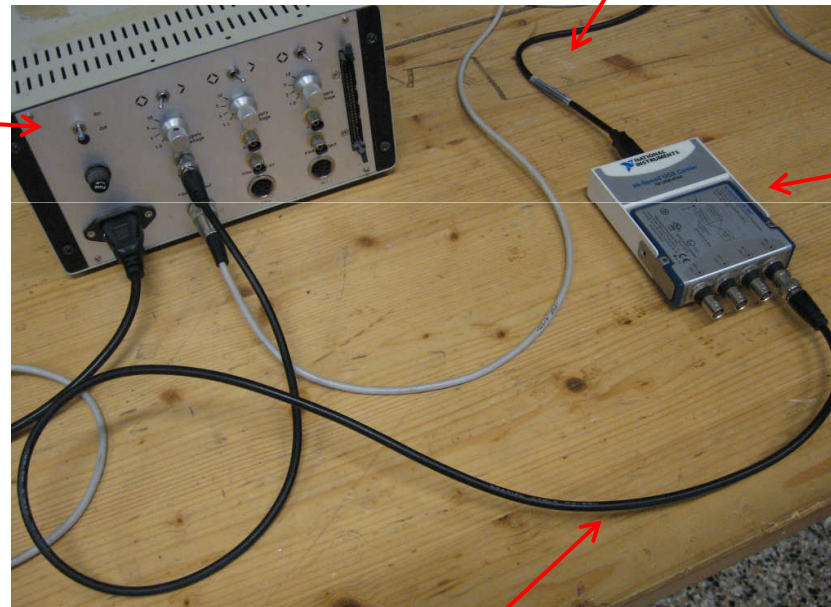
Catena di misura

- Scheda di acquisizione

collegamento al PC
(usb)

centralina
estensimetrica

Scheda di
acquisizione



collegamento output
centralina - input scheda di
acquisizione

Ingressi campione

- Serie di ingressi campione



(pesati con una bilancia da laboratorio, risoluzione 0,1 g)

- Quanti ne servono?
- Quali?
- Come sono distribuiti?

Campione	Valore (g)
Peso n. 1	497,6
Peso n. 2	499,2
Peso n. 3	498,2
Peso n. 4	494,8



Input (g)	Input (kg)
0,0	0,0000
497,6	0,4976
996,8	0,9968
1495,0	1,4950
1989,8	1,9898
1495,0	1,4950
996,8	0,9968
497,6	0,4976
0,0	0,0000

Procedura

- Procedura appropriata

Si applicano i cosiddetti cicli di taratura (calibration cycle).

Un **ciclo di taratura** consiste nell'applicare valori noti del misurando e registrare i valori in uscita dallo strumento, su tutto il campo di misura, sia in salita che in discesa.

Si deve cercare di far variare solo il misurando e mantenere invariati tutti gli altri ingressi (compresi gli effetti dell'ambiente).

Quanti cicli?

In generale conviene eseguire più **cicli di taratura** per tenere conto degli errori.

Esecuzione della prova

- Ciclo di taratura
 - Campione 0 (con eventuale azzeramento)
 - Campione 1
 - Campione 2
 -
 - Campione n
 - Campione n-1
 -
 - Campione 1
 - Campione 0

Input (g)	Input (kg)	Output (V)		
		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
0,0	0,0000	0,000	0,000	0,000
497,6	0,4976	2,503	2,500	2,496
996,8	0,9968	4,999	5,005	5,000
1495,0	1,4950	7,500	7,505	7,500
1989,8	1,9898	9,985	9,983	9,983
1495,0	1,4950	7,500	7,503	7,500
996,8	0,9968	5,004	5,002	5,001
497,6	0,4976	2,502	2,503	2,501
0,0	0,0000	0,004	0,002	0,002

Analisi di regressione

$$y = f(x_i, \beta_i)$$

- serie di misure (x_i, y_i) - es. : I / O di uno strumento)
- si ipotizza a monte la forma della funzione f
- si stimano i valori dei parametri β_i di f
- si cerca una stima della “bontà” della scelta della funzione f

Nel caso della retta (regressione lineare) la funzione è :

$$y = (mx + n)$$

Retta dei Minimi Quadrati

- n misure $(x_i ; y_i)$

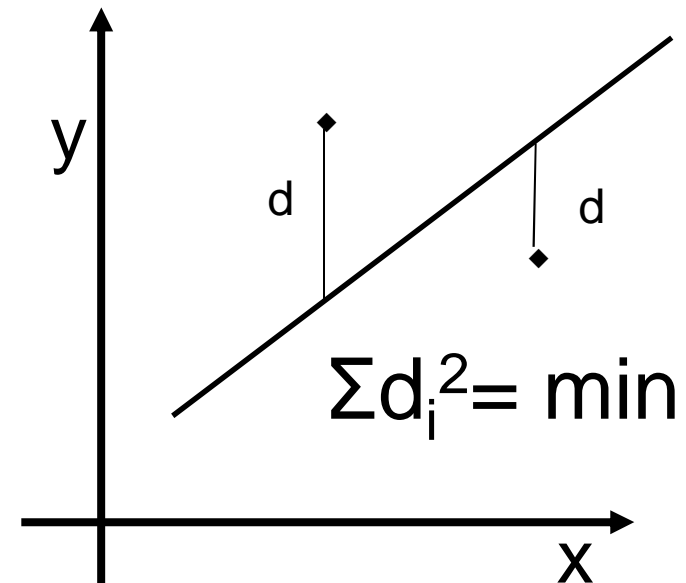
$$\sum_{i=1}^n [y_i - (mx_i + n)]^2 = \min$$

(funzione da minimizzare)

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n [y_i - (mx_i + n)]^2}{\partial m} = 0$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n [y_i - (mx_i + n)]^2}{\partial n} = 0$$

- sistema di 2 equazioni nelle incognite m ed n



Coefficiente di correlazione

Per stimare la bontà dell'operazione si usa il coefficiente di correlazione.

- Se $R^2 = 1$ le due grandezze (x e y) sono perfettamente correlate.
- Se $R^2 \rightarrow 1$ le due grandezze sono molto correlate.
- Se $R^2 \rightarrow 0$ le due grandezze sono poco correlate.
- Se $R^2 = 0$ le due grandezze non sono affatto correlate.

Il coefficiente di correlazione non è una stima dell'errore!

Il coefficiente di correlazione rimane invariato se:

- moltiplichiamo tutti i valori di una variabile per una costante positiva;
- sommiamo una costante a tutti i valori di una variabile;
- scambiamo i valori di x con quelli di y .

Errore sulla stima

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{stim})^2}{N - 2}}$$

- s “misura” la dispersione dei dati rispetto alla funzione f
($Y - Y_{stim}$) = distanza (Punto - f) ; nel caso della retta:
($N - 2$) gradi di libertà = N punti sperimentali - 2 parametri stimati
(retta $y=mx+n$, 2 parametri)
- è simile alla deviazione standard (dispersione dei dati rispetto alla media)

Regressione

- Non conviene usare il polinomio interpolante.
- E' opportuno usare almeno un numero di punti 3 – 5 volte superiore al grado della curva.
- Si possono usare curve di grado superiore.
- Non conviene estrapolare!
- In caso di una taratura usare punti uniformemente distribuiti su tutto il range di funzionamento dello strumento (a salire e a scendere).
- $x_i \rightarrow$ ingresso; $y_i \rightarrow$ uscita ; d_i : errore solo sulla y, incertezza sulla x (molto) minore dell'incertezza sulla y \Rightarrow retta x,y \neq retta y,x

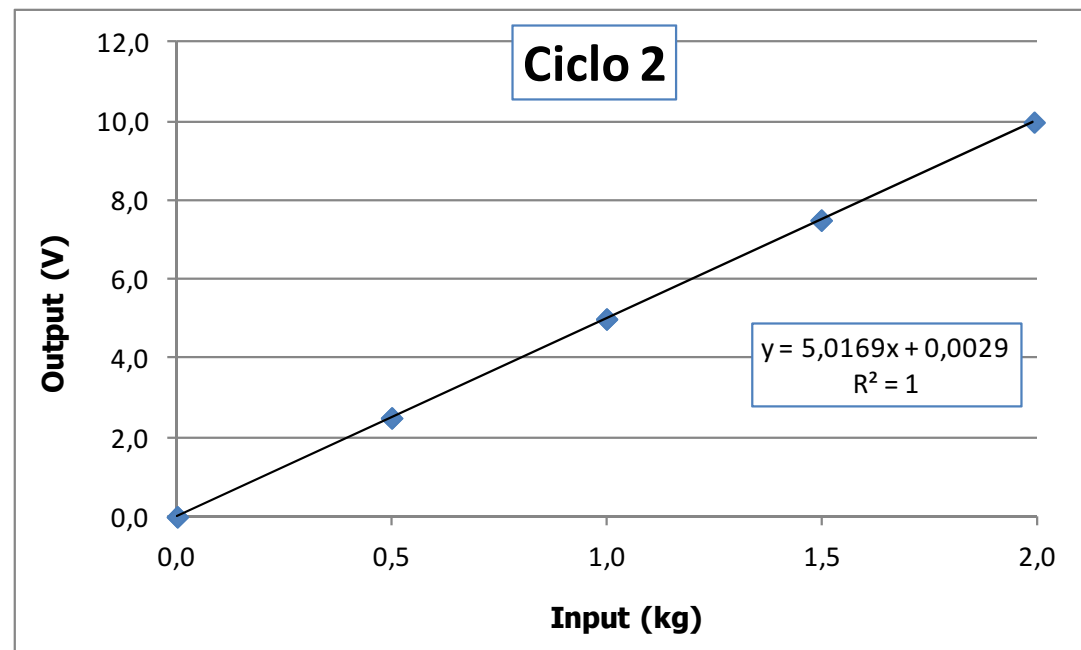
Elaborazione dei dati

Considerando il ciclo di calibrazione n. 2:

$$y = (5,0169 x + 0,0029)$$

$$R^2 = 1$$

$$(R^2 = 0,99999998)$$



La sensibilità assoluta è quindi = 5,0169 kg/V

Quella relativa al fondo scala e all'alimentazione è = 2,0067 mV/V@F.S.

Elaborazione dei dati

Considerando i valori medi dei 3 cicli:

La sensibilità assoluta è = 5,0161 kg/V

Quella relativa al fondo scala e all'alimentazione è = 2,0064 mV/V@F.S.

La sensibilità dichiarata dal costruttore è = 2 mV/V

Individuazione di eventuali errori parassiti

- Si può applicare ad ogni ciclo di taratura il criterio di Chauvenet o qualche altro criterio per individuare errori parassiti; in questi casi si fa riferimento ad s (errore sulla stima).

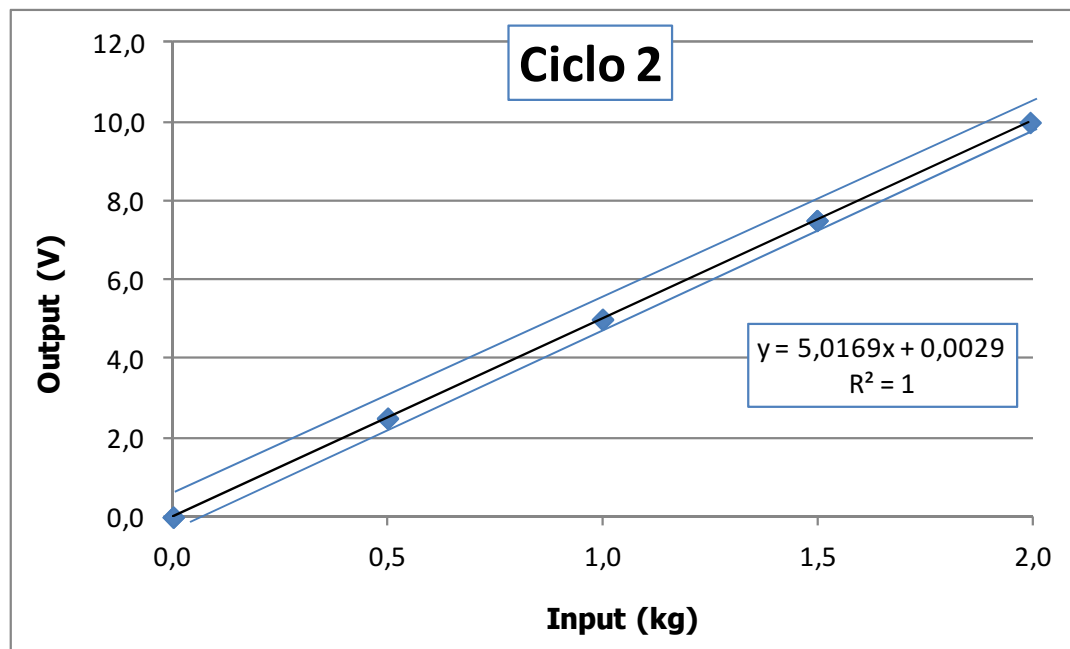
Valutazione degli errori / incertezza

Si può usare l'errore sulla stima:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{stim})^2}{N - 2}}$$



$$s = 0,002319 \text{ [V]}$$



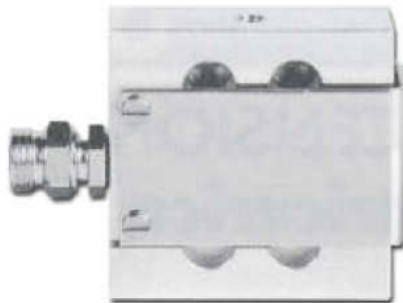
Con l'intervallo $\pm 2s$ si può definire una fascia di incertezza

Valutazione degli errori / incertezza

Propagazione degli errori:
$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{cella}^2 + \sigma_{pesi}^2 + \sigma_{resto}^2}$$

Esprimiamo tutto in kg;

Cella di carico; dai dati dichiarati (errore combinato assoluto = 0,0008 kg):



Portata [Kg]	OIML
2	No
5	No
10	No
20	No
50	No

CARATTERISTICHE TECNICHE	
Uscita a fondo scala	2 mV/V
Tolleranza sulla taratura del f.s.	± 0,1%
Alimentazione massima	15 Vcc
Bilanciamento di zero	± 1% f.s.
Resistenza ingresso	400 ± 25 ohm
Resistenza uscita	350 ± 2 ohm
Resistenza isolamento	≥ 2000 Mohm
Errore combinato	± 0,04% f.s.
Isteresi	± 0,02% f.s.
Creep 30'	± 0,05% f.s.
Deriva dello zero con la temperatura	± 0,005% f.s./°C
Deriva del F.S. con la temperatura	± 0,004% f.s./°C
Campo di temperatura compensato	-10 ÷ +40 °C
Campo di temperatura massimo	-25 ÷ +70 °C
Massimo carico ammissibile	150% f.s.
Carico di rottura	> 300% f.s.
Grado di protezione	IP60
Materiale	Alluminio
Lunghezza cavo standard	5 m

$$\sigma_{cella} = 0,0004 \text{ [kg]}$$

Valutazione degli errori / incertezza

Propagazione degli errori:
$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{cella}^2 + \sigma_{pesi}^2 + \sigma_{resto}^2}$$

Esprimiamo tutto in kg;

Pesi; li abbiamo pesati con una bilancia con risoluzione 0,1 g, cioè 0,0001 kg; stimiamo σ :

$$\sigma_{tot} = 0,00006 \text{ [kg]}$$

Valutazione degli errori / incertezza

Propagazione degli errori: $\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{cella}^2 + \sigma_{pesi}^2 + \sigma_{resto}^2}$

Esprimiamo tutto in kg;

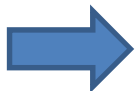
Catena di misura totale; essendo risultato

$$s = 0,002319 \text{ [V]}$$



$$\sigma_{tot} = 0,000464 \text{ [kg]}$$

Quindi: $0,000464 = \sqrt{0,0004^2 + 0,00006^2 + \sigma_{resto}^2}$



$$\sigma_{resto} = 0,000227 \text{ [kg]}$$

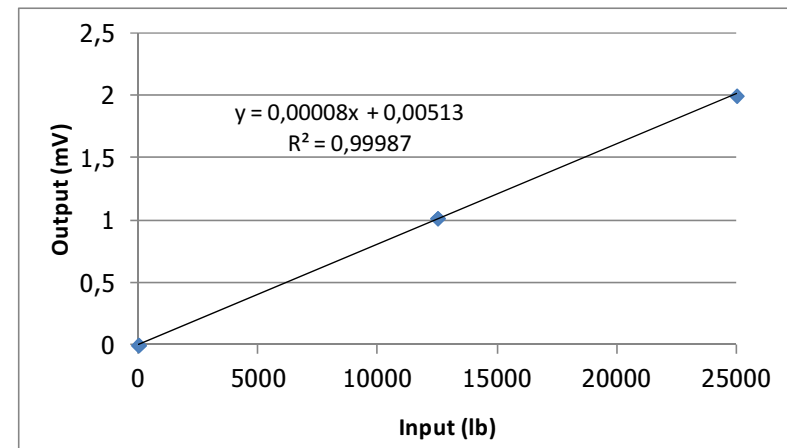
Esempio

Cella di carico a compressione, fondo scala 25000 libbre (1 lb = 0,454 kg)

CERTIFICATE OF CALIBRATION

SERIAL NUMBER:	224034	DATE OF CALIBRATION:	03/28/2008
SENSOR MODEL:	LW0-25	DATE OF RECALIBRATION:	03/28/2009
JOB NUMBER:	63639		
TECHNICIAN:	CRR		

COMPRESSION LOAD LBS.	MV/V INC	MV/V DEC
0	0.0000	0.0000
12500	1.0168	1.0172
25000	1.9981	
NON-LINEARITY	-0.89	PCT FS
NON-REPEATABILITY	-0.29	PCT FS
HYSTERESIS	0.02	PCT FS



Uscita a F.S.: 2,003 (mV/V @ F.S.)

Valutazione dell'isteresi $= (1,0172 - 1,0168) \cdot 100 / 2 = 0,02 \quad \% \text{ F.S.}$