

POLITECNICO DI MILANO

Misure Meccaniche e Termiche

Taratura statica di trasduttori

- anello dinamometrico
- trasduttore di spostamento induttivo

Ing. Lorenzo Comolli

Taratura:
 serve a trovare il legame tra il valore letto sullo strumento e il valore della grandezza fisica misurata

Taratura statica POLITECNICO DI MILANO

Taratura statica: quando il misurando è **costante nel tempo**

La relazione che lega IN o OUT può essere a volte molto complessa.
 Il modello utilizzato più semplice è quello **lineare**: $y(x)=mx+b$

Taratura statica POLITECNICO DI MILANO

In teoria per tarare uno strumento con comportamento lineare sarebbero sufficienti **due punti**.

Nella realtà il comportamento dei trasduttori non è mai perfettamente lineare: diversi fattori contribuiscono a questo fatto.

- **non linearità**: il comportamento non è lineare;
- **isteresi**: la risposta dello strumento varia in funzione della "direzione" di misura;
- **ripetibilità**: lo strumento non fornisce la stessa uscita a fronte della stessa grandezza misurata.

Taratura statica POLITECNICO DI MILANO

Linearità

I punti misurati non sono su una retta, non solo a causa di errori casuali ma anche a causa del fatto che il comportamento dello strumento non è lineare: non bastano 2 punti per effettuare una taratura, il campo di misura deve essere coperto da molti punti sperimentali ben distribuiti in tutto il campo.

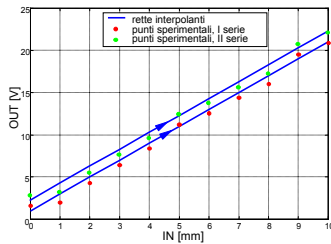
Taratura statica POLITECNICO DI MILANO

Isteresi

La risposta dello strumento varia in funzione della "direzione" di misura: imponendo ingressi crescenti o decrescenti si ottiene una diversa curva di taratura. Per valutare questo deve essere effettuato un ciclo di taratura "crescente" ed uno "decrescente"

Taratura statica POLITECNICO DI MILANO

Ripetibilità

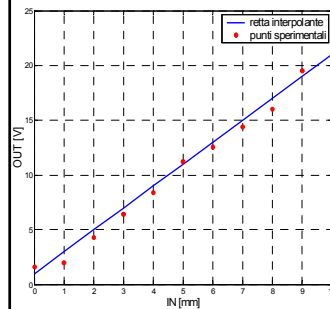


La risposta dello strumento non è sempre uguale a se stessa: ripetendo vari cicli di taratura si ottengono risultati diversi. Anche questo fenomeno deve essere preso in considerazione nell'operazione di taratura, ripetendo diverse volte le operazioni.

Come si trattano i dati acquisiti? Una volta acquisite N letture sperimentali e si utilizza il "metodo dei minimi quadrati" per interpolare i punti.

Vantaggi nell'uso di N punti:

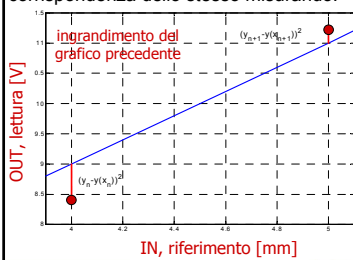
- verifica della linearità nel campo di misura
- diminuzione incertezza di interpolazione
- verifica isteresi



Si minimizza cioè l'errore quadratico E :

$$E = \sum_n (y_n - y(x_n))^2 = \min$$

dato dalla sommatoria dei quadrati dei residui, ossia delle differenze tra il valore della lettura sperimentale e il valore della curva interpolante in corrispondenza dello stesso misurando.



con:
 y_n : valore letto sullo strumento (lettura)
 $y(x_n)$: valore ottenuto con l'espressione della curva di taratura in corrispondenza di x_n (riferimento).

Verifica del modello

Indice della bontà del modello scelto (linearità) è il **coefficiente di correlazione lineare R^2** :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [y(x_i) - y_m]^2}{\sum_{i=1}^N [y_i - y_m]^2}$$

con:

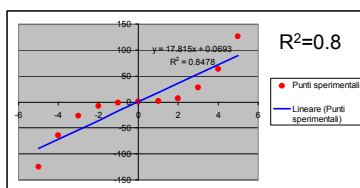
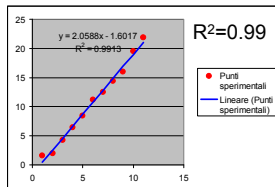
y_i : valore letto sullo strumento

$y(x_i)$: valore ottenuto con l'espressione della curva di taratura in corrispondenza di x_i

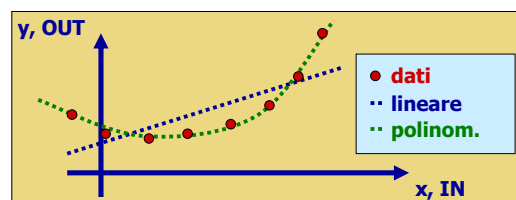
y_m : valor medio delle letture effettuate

$R^2 \sim 1$: tutti i punti giacciono sulla retta

$R^2 \sim 0$: punti distribuiti casualmente

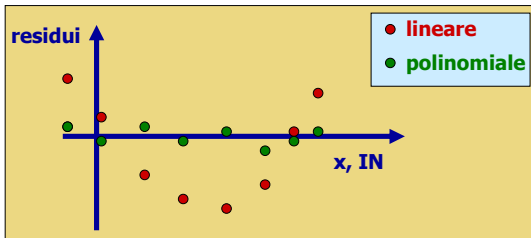


Se è evidente un andamento non lineare, si può usare un polinomio interpolante di grado superiore.



Per valutare la "bontà" dell'interpolazione è fondamentale l'osservazione del **grafico dei residui**.

Una "buona" interpolazione ha residui sparsi casualmente intorno all'asse delle ascisse.



Per confrontare la bontà di due diverse curve di taratura si può utilizzare l' **errore quadratico medio (Eqm)**:

$$Eqm = \frac{\sum_{i=1}^N [y_i - y(x_i)]^2}{N - \rho}$$

dove ρ è l'ordine del polinomio utilizzato (grado +1).

Come trovare l'incertezza di taratura?

Vanno considerati due contributi:

1. Incertezza legata al **riferimento σ_{ic}** : legata all'incertezza del campione di misura utilizzato (indicata nel certificato di taratura o valutata considerando una distribuzione rettangolare attorno al valore nominale letto sul riferimento)

Nel caso trattato in questo laboratorio, dove il riferimento è caratterizzato da una risoluzione r :

$$\sigma_{ic} = \frac{r}{2\sqrt{3}}$$

2. Incertezza legata **all'errore di misura dello strumento σ_{Em}** : si valuta come errore medio standard ed è pari alla radice quadrata dell'errore quadratico medio.

$$\sigma_{Em} = \sqrt{Eqm}$$

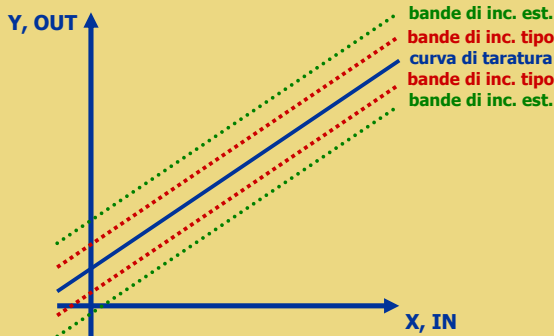
Si può quindi calcolare l'**incertezza combinata di taratura** come somma in quadratura degli scarti tipo:

$$u_c = \sqrt{\sigma_{ic}^2 + \sigma_{Em}^2}$$



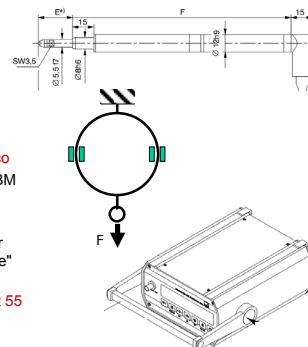
L'**incertezza estesa di taratura** (fattore di copertura 2, ovvero livello di confidenza 95%) risulta essere:

$$U = 2 \cdot u_c$$



Esperienza di laboratorio: strumenti

- **Trasduttore di spostamento lineare induttivo**
 - HBM WA10
 - FS=10 mm
 - riferimento: base micrometrica ris=0.002 mm
- **Cella di carico ad anello estensimetrico**
 - autocostruito con estensimetri HBM Y11/120/3
 - FS~1 kg
 - riferimento: masse campione (per incertezza, cercare "classi pesiere" online)
- Entrambi condizionati con **HBM Scout 55**
 - azzerare con bottone "0"



Esperienza di laboratorio: classi pesiere

Accuratezza = risoluzione/2

Considerare la classe peggiore (M3)

VALORE Nominale DELLA MASSA	CLASSE F ₁ ± mg	CLASSE F ₂ ± mg	CLASSE F ₃ ± mg	CLASSE F ₄ ± mg	CLASSE M ₁ ± mg	CLASSE M ₂ ± mg
20 Kg	25	75	250	750	2500	7500
10 Kg	10	30	100	300	1000	3000
5 Kg	5	15	50	150	500	1500
2 Kg	2,5	7,5	25	75	250	750
1 Kg	1,0	3,0	10	30	100	300
500 g	0,5	1,5	5	15	50	150
200 g	0,25	0,75	2,5	7,5	25	75
100 g	0,10	0,30	1,0	3,0	10	30
50 g	0,05	0,15	0,5	1,5	5	15
20 g	0,020	0,060	0,20	0,6	2	6
10 g	0,010	0,030	0,10	0,3	1	3
5 g	0,005	0,015	0,05	0,15	0,5	1,5
2 g	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20	0,6
1 g	0,001	0,003	0,010	0,03	0,10	0,3
500 mg	0,0005	0,0015	0,005	0,015	0,05	0,15
200 mg	0,0002	0,0006	0,002	0,006	0,020	0,06
100 mg	0,0001	0,0003	0,001	0,003	0,010	0,03
50 mg	0,00005	0,00015	0,0005	0,0015	0,005	0,015
20 mg	0,00002	0,00006	0,0002	0,0006	0,002	0,006
10 mg	0,00001	0,00003	0,0001	0,0003	0,001	0,003
5 mg	0,000005	0,000015	0,00005	0,00015	0,0005	0,0015
2 mg	0,000002	0,000006	0,00002	0,00006	0,0002	0,0006
1 mg	0,000001	0,000003	0,00001	0,00003	0,0001	0,0003

Fonte: Gibertini

Taratura statica

POLITECNICO DI MILANO

Esperienza di laboratorio: procedura

1. Acquisire almeno **3 serie di misurazioni**, ciascuna composta da una salita ed una discesa dallo 0 al 100% del fondo scala dello strumento scelto (potenziometro o induttivo) suddividendo il campo di misura in circa 10 intervalli.
2. Tracciare su un **diagramma IN-OUT** i punti sperimentali.
3. Determinare i **parametri della curva di taratura** (usando tutti i punti acquisiti) e **disegnarla** sul grafico di taratura (inoltre trovare il valore del **coefficiente di correlazione lineare R²**, e tracciare il **grafico dei residui**).
4. Calcolare l'**incertezza estesa di taratura** e disegnare le **bande di incertezza**.

Taratura statica

POLITECNICO DI MILANO

Esperienza di laboratorio: ausili di calcolo

- **EXCEL**: consultare l'help della funzione **REGR.LIN** (**LINEST** in inglese) che fornisce i parametri di un'interpolazione polinomiale di ordine voluto, il coefficiente di correlazione lineare R² e l'errore medio (= radice dell'errore quadratico medio).
Vedere file XLS di esempio su sito.
- **MATLAB**: consultare l'help della funzione **POLYFIT** e **POLYVAL**.
- **LABVIEW**: sono disponibili diversi VI che permettono di effettuare l'interpolazione polinomiale.

Taratura statica

POLITECNICO DI MILANO

FACOLTATIVO

L'effetto di carico

L'**effetto di carico** è l'effetto che il misuratore produce sul sistema da misurare: ciò significa che inserendo il misuratore nel sistema si modifica il sistema stesso.

Esempio: per misurare la temperatura di un oggetto vi appoggio un termometro che avendo temperatura diversa andrà a scaldare o raffreddare l'oggetto da misurare.

Nelle misure elettriche l'effetto di carico del multimetro è dovuto alla **resistenza non infinita dei morsetti**. Questo permette a una certa quantità di corrente di circolare nel multimetro, cosa che modifica il sistema elettrico.

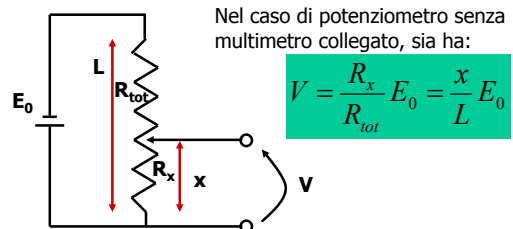
Taratura statica

POLITECNICO DI MILANO

I multimetri in laboratorio sono di ottima qualità e hanno effetto di carico ridottissimo (impedenza in ingresso elevata). Pertanto se si vuole osservare i danni prodotti da un effetto di carico bisogna **simularlo**, inserendo una resistenza relativamente piccola (4.7 kΩ) in parallelo ai morsetti del multimetro.

Esempio

L'effetto di carico applicato al potenziometro

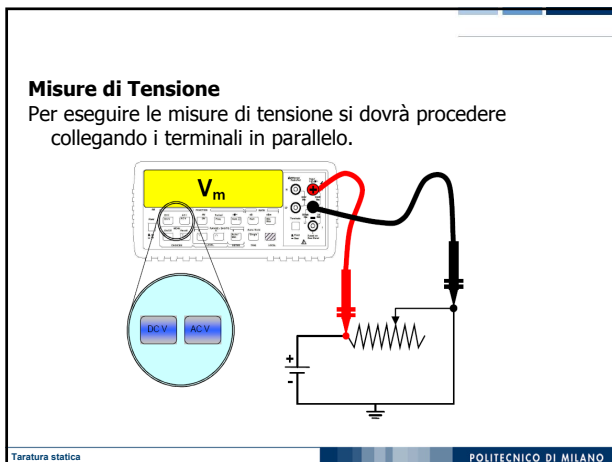
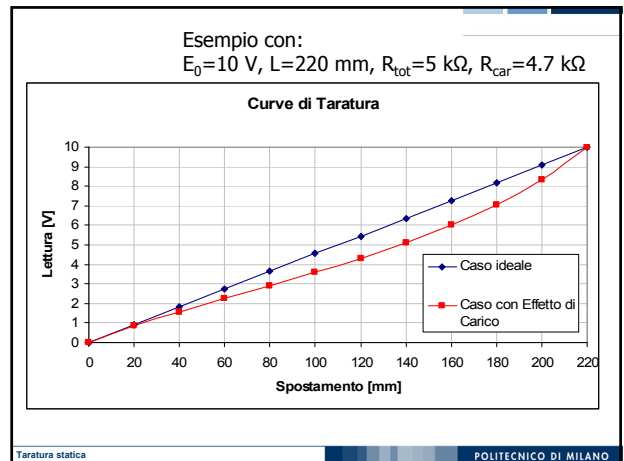
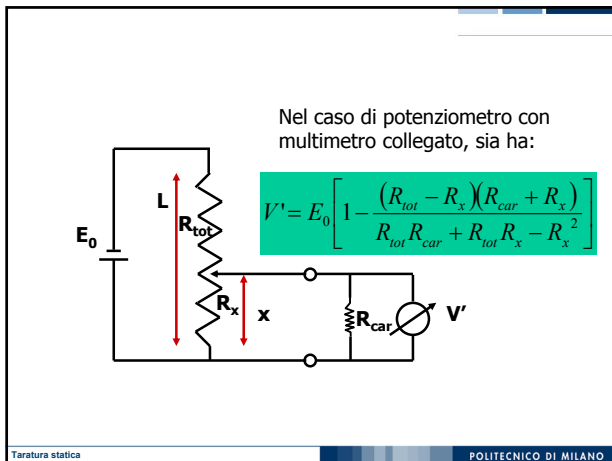


Taratura statica

POLITECNICO DI MILANO

Taratura statica

POLITECNICO DI MILANO



Accuratezza delle misure fatte dal multimetro
 Occorre consultare il datasheet che riporta questa tabella:
 Accuracy Specifications \pm (% of reading + % of range)^[1]

Function	Range ⁰	Frequency, etc.	24 hour ¹ 23°C \pm 1°C	90 day 23°C \pm 5°C	1 year 23°C \pm 5°C	Temperature coefficient 0°C - 18°C 28°C - 55°C
dc voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0005 + 0.0001

Esempio: misura di una tensione di 2.540834 V (range 10 V)
 $a = 0.0035/100 * 2.54083\text{ V} + 0.0005/100 * 10\text{ V} = 0.14\text{ mV}$
 $\sigma_{Eris} = a/\sqrt{3} = 0.080\text{ mV}$
 misura di tensione = 2.540834 V \pm 0.000080 V
 Quindi solitamente tale incertezza è trascurabile rispetto agli altri contributi.

Taratura statica POLITECNICO DI MILANO