

MISURARE LA FORZA NEL MONDO REALE: CONFRONTO TRA METODI DI TARATURA STATICI, CONTINUI E DINAMICI



Andrea Prato

INRiM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Torino

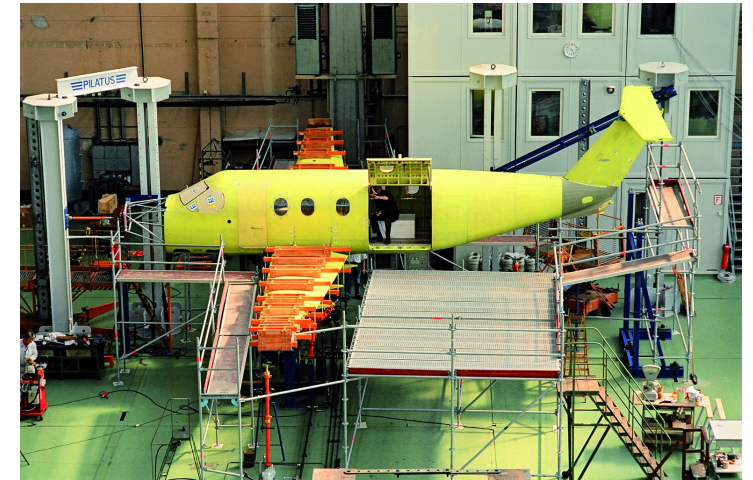
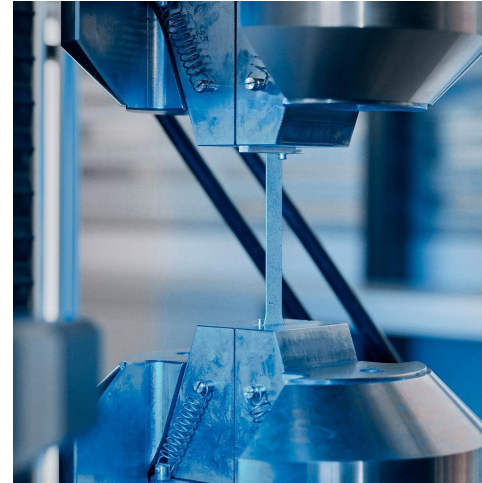
email: a.prato@inrim.it

PERCHE' MISURA BENE LA FORZA?

Le misure di forza sono alla base di:

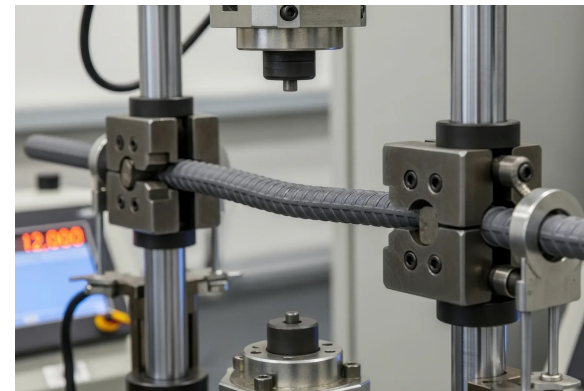
- Prove meccaniche sui materiali
- Controllo qualità industriale
- Settore aerospaziale
- Biomedicale
- Automotive
- Sistemi pesatura
- Robotica

Errori di misura $\Rightarrow$
errori su sicurezza,
prestazioni e certificazioni



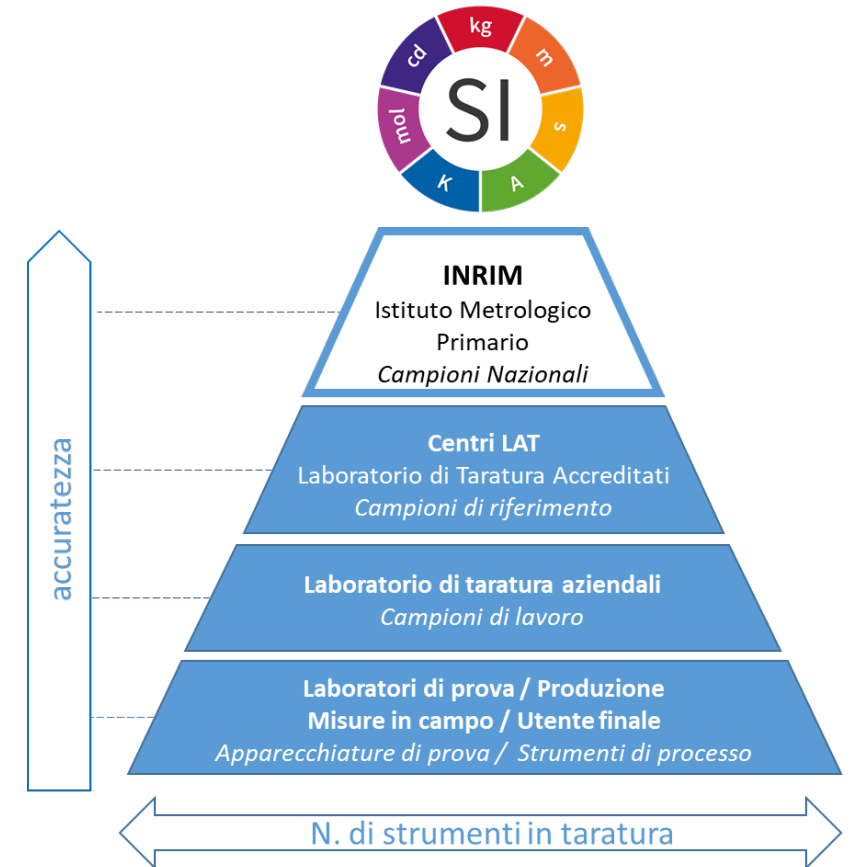
COSA STIAMO MISURANDO DAVVERO

- La forza non è sempre statica
- Nelle applicazioni reali troviamo:
 - Carichi statici (peso, serraggio)
 - Carichi variabili nel tempo
 - Carichi dinamici e oscillanti
- Il sensore deve seguire fedelmente ampiezza e tempo



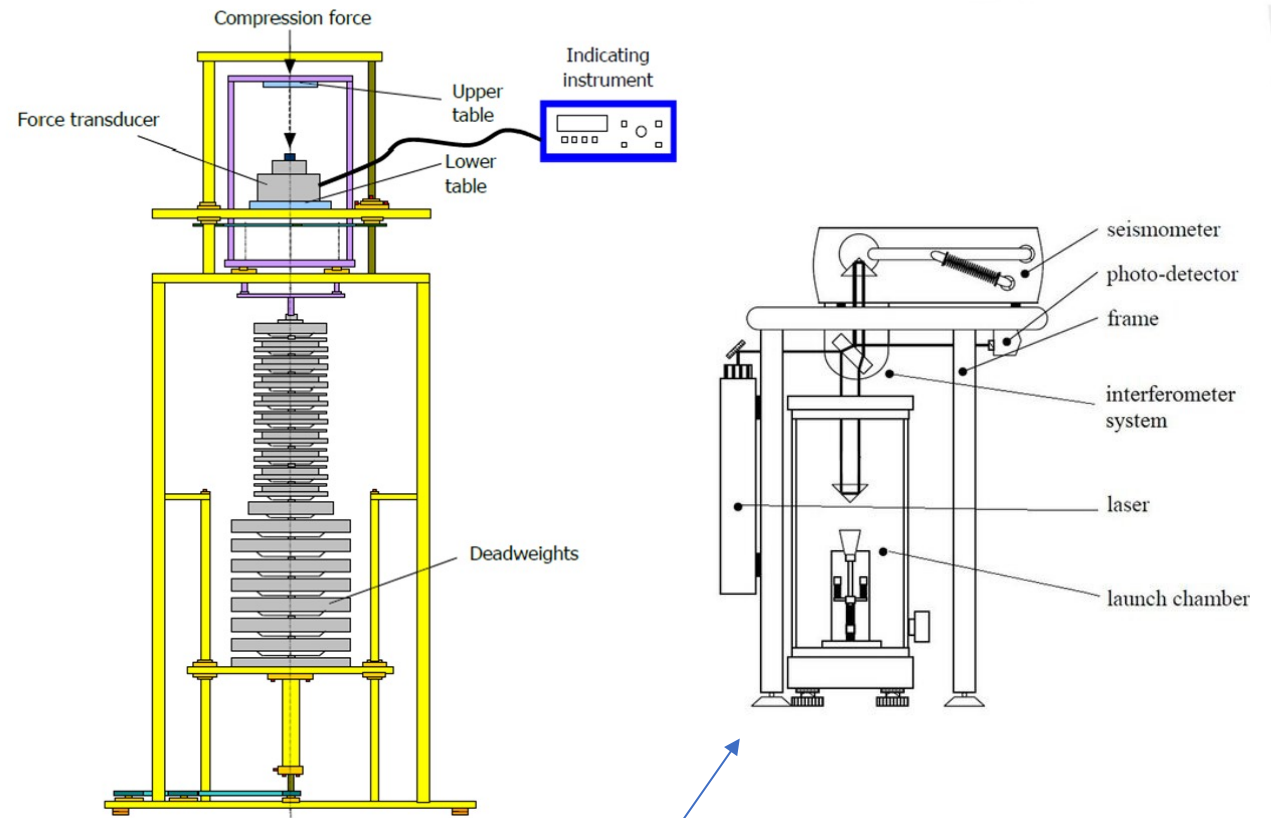
CATENA DI RIFERIBILITA' ATTUALE

- Taratura dei trasduttori = confronto con un campione riferibile
- Obiettivo è determinare:
 - Sensibilità
 - Incertezza di misura
- Catena di riferibilità metrologica fino al SI



CATENA DI RIFERIBILITA' ATTUALE

- Carichi applicati lentamente (minuti...) e mantenuti costanti
- Normative attuali basate solo su condizioni statiche (ISO 376 e ISO 7500)
- Vantaggi:
 - Metodi consolidati
 - Basse incertezze
- Limite: non rappresenta l'uso reale dinamico

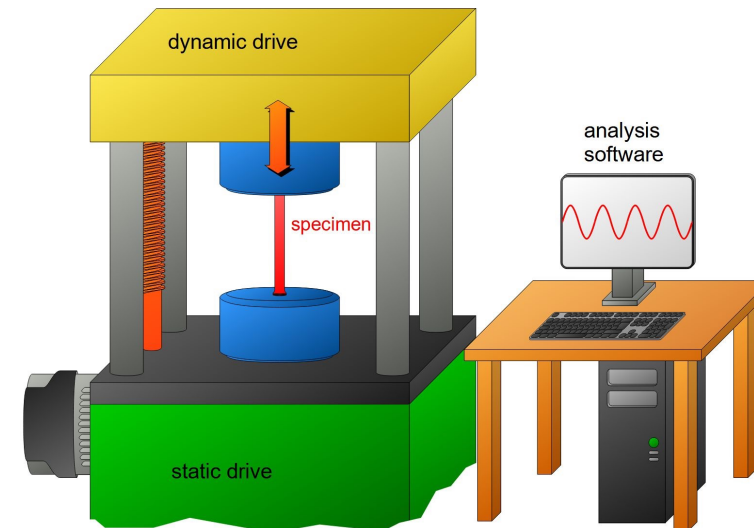
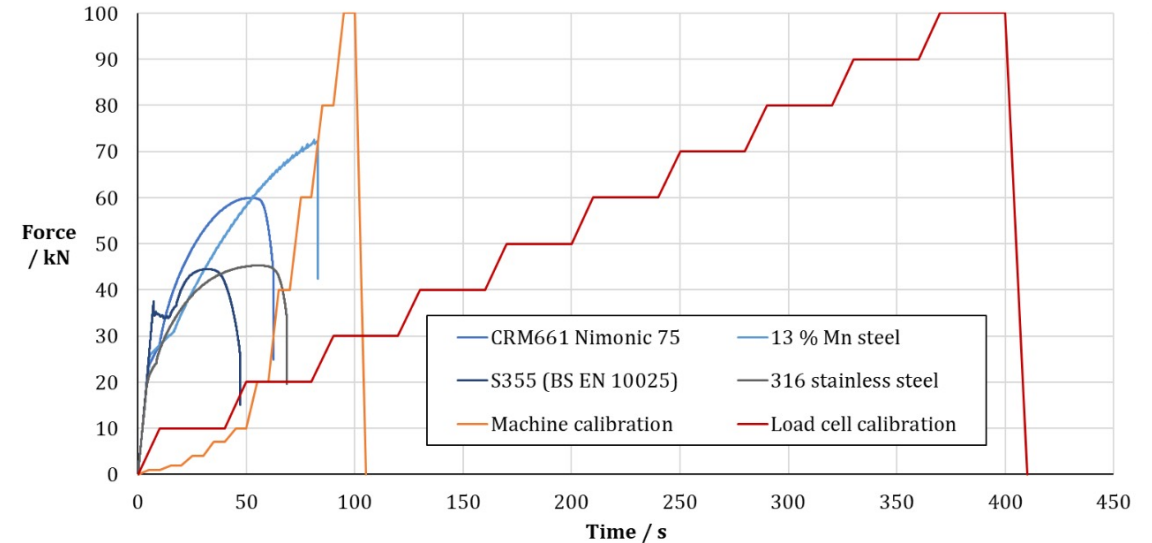


$$F = mg \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)$$

$$\frac{U(F)}{F} = 20 \text{ ppm}$$

PROBLEMA

- Nelle prove materiali reali:
 - Carichi ciclici (fatica)
 - Controlli in retroazione rapida
 - Prove ad alta velocità di deformazione
 - Controlli in anello chiuso delle macchine di prova
- **Il sensore lavora fuori dalle condizioni di taratura**
- Possibili effetti:
 - Ritardi di risposta
 - Sovra/sottostima della forza
 - Dipendenza dalla frequenza
 - Rischio di risultati non corretti se si usa solo la taratura statica



PERCHÉ SERVONO NUOVE PROCEDURE

- Garantire:
 - Misure metrologicamente riferibili
 - Confrontabilità tra laboratori
 - Affidabilità dei dati di prova
- Necessità di:
 - Procedure standardizzate
 - Integrazione tra statica e dinamica

18SIB08 ComTraForce

Comprehensive traceability for force metrology services

A Joint Research Project within the European Metrology Research Programme EMPIR.

ComTraForce

<https://www.ptb.de/empir2019/comtraforce/home/>

**Guideline
DKD-R 3-9**

**Continuous calibration of force
transducers according to the
comparison method**

Edition 01/2020

**Guideline
DKD-R 3-10
Sheet 2**

**Dynamic calibration of force
transducers according to the
sinusoidal method**

Edition 08/2019

PRIMI APPROCCI...

- Taratura statica, continua e dinamica presso INRIM
- Trasduttori di forza estensimetrici da 50 N, 100 N, 200 N, and 500 N collegati a un amplificatore NI-9237



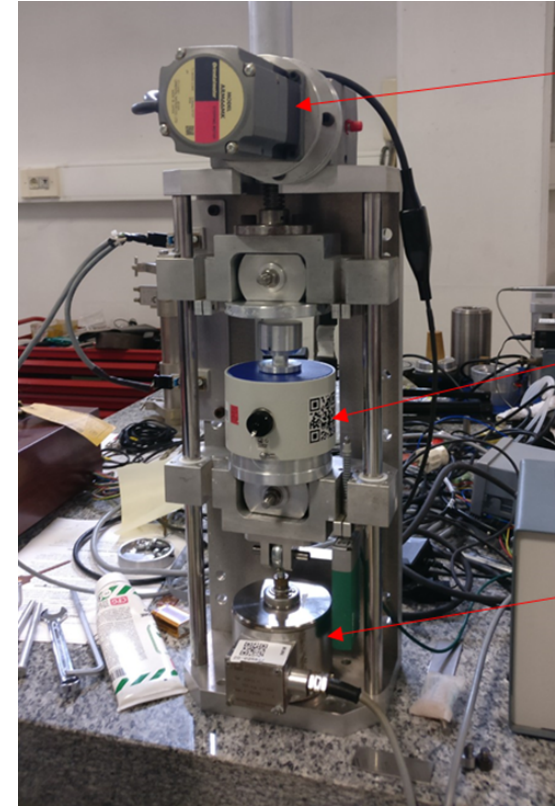
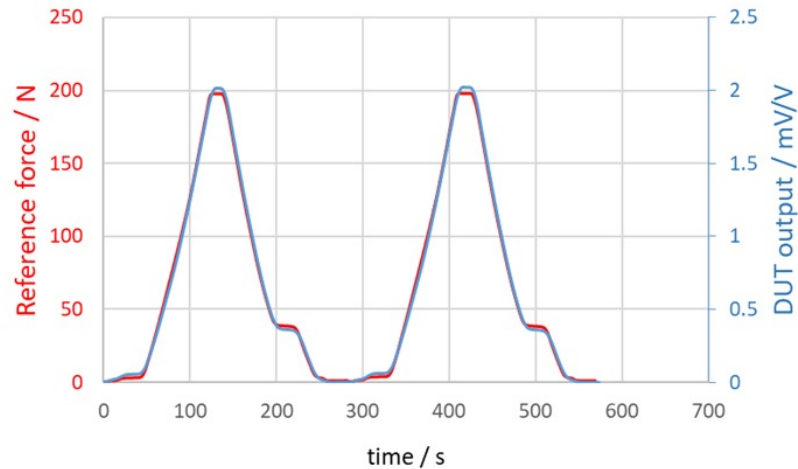
TARATURA STATICA – ISO 376

- Taratura statica in compressione secondo la norma ISO 376 utilizzando la macchina campione di forza a pesi diretti INRiM da 2.5 kN con un'incertezza relativa estesa di 20 ppm.
- Forze equidistanti vengono generate consecutivamente dal 10 % al 100 % della portata.



TARATURA CONTINUA – DKD-R 3-9

- Macchina campione di forza continua INRiM 1 kN con un'incertezza relativa estesa di 0,27 %.
- Periodo di 120 s affinché il carico raggiunga il 100 % della capacità con profilo forza-tempo a rampa



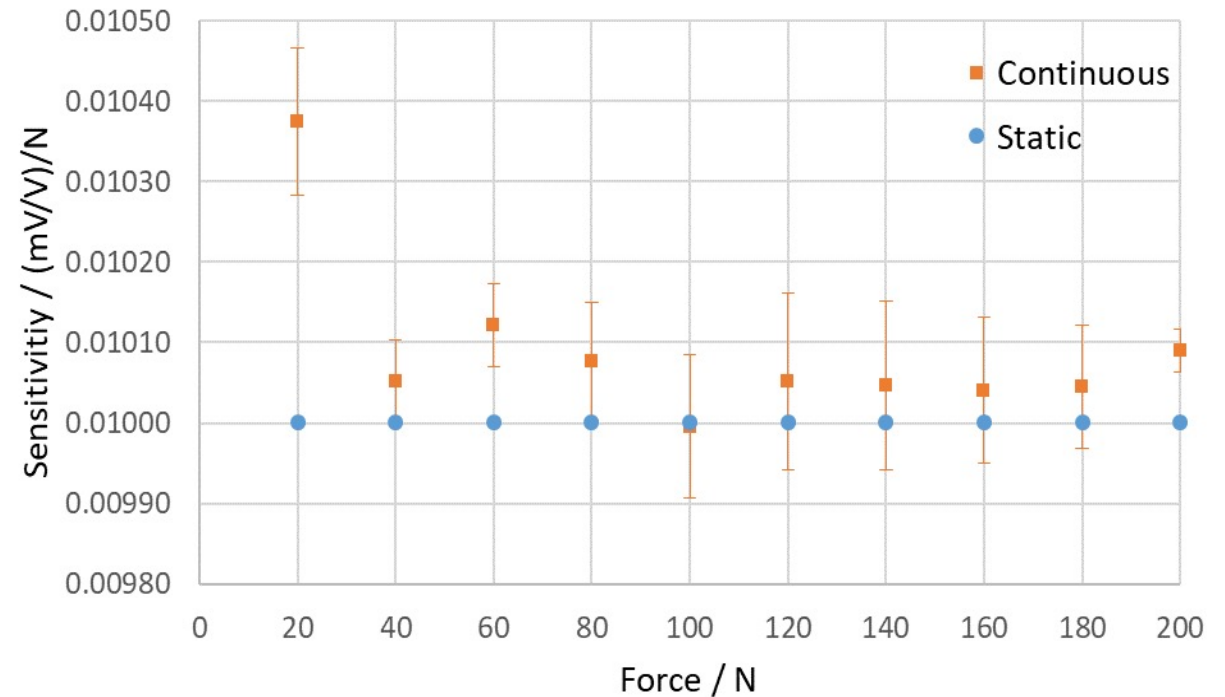
Electric motor

Force transducer
under test

1 kN HBM Z3H3
reference force transducer

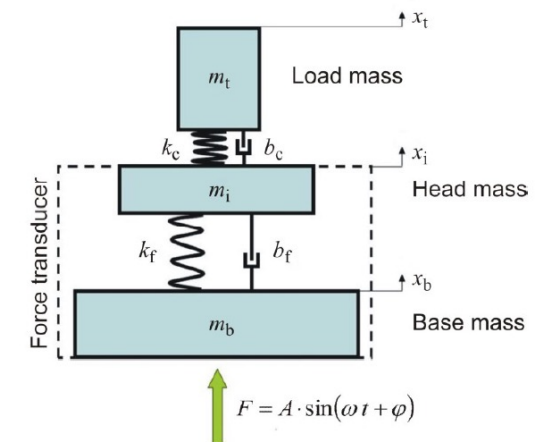
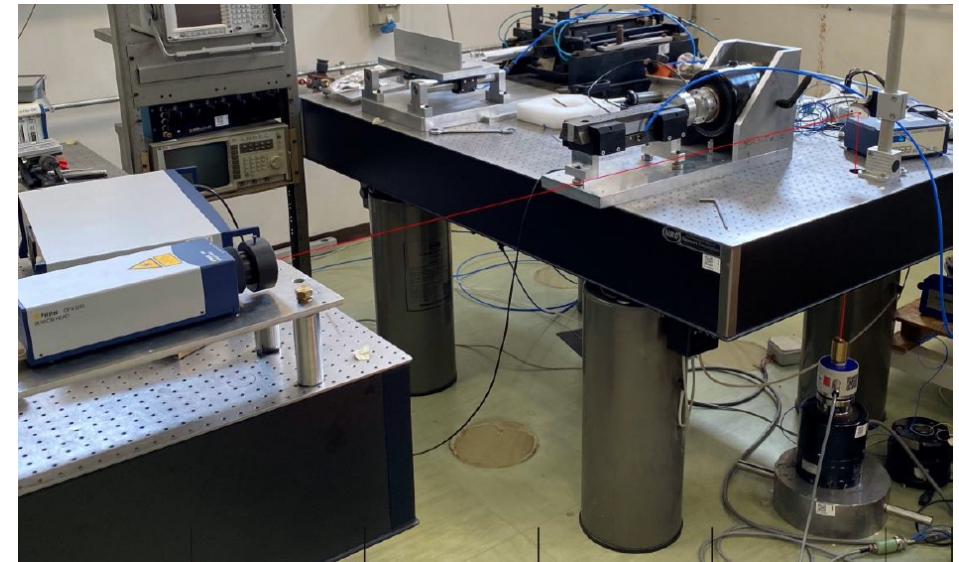
Confronto: statico vs continuo (200 N)

- I valori sono compatibili tranne che a bassi valori di forza.
- Possibili cause:
 - oscillazioni nell'identificazione dei valori zero in condizioni continue
 - difetti nei collegamenti meccanici tra i trasduttori
- Incertezze:
 - taratura statica: circa 0.01 %
 - taratura continua: circa 1 %,



TARATURA DINAMICA – DKD-R 3-10 (Sheet 2)

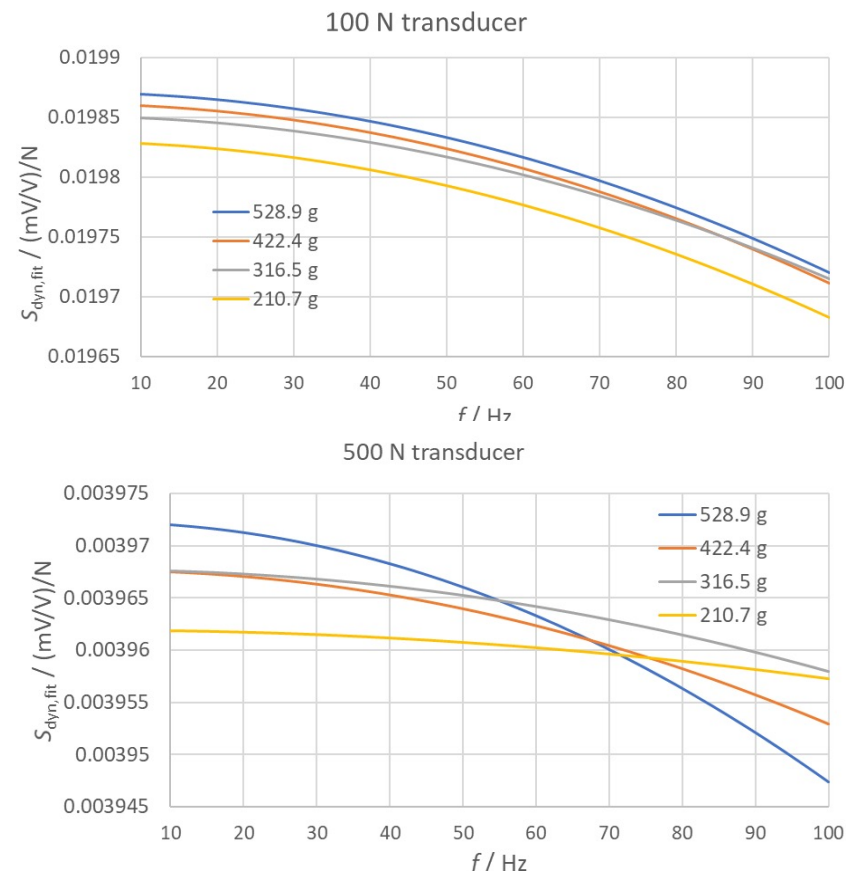
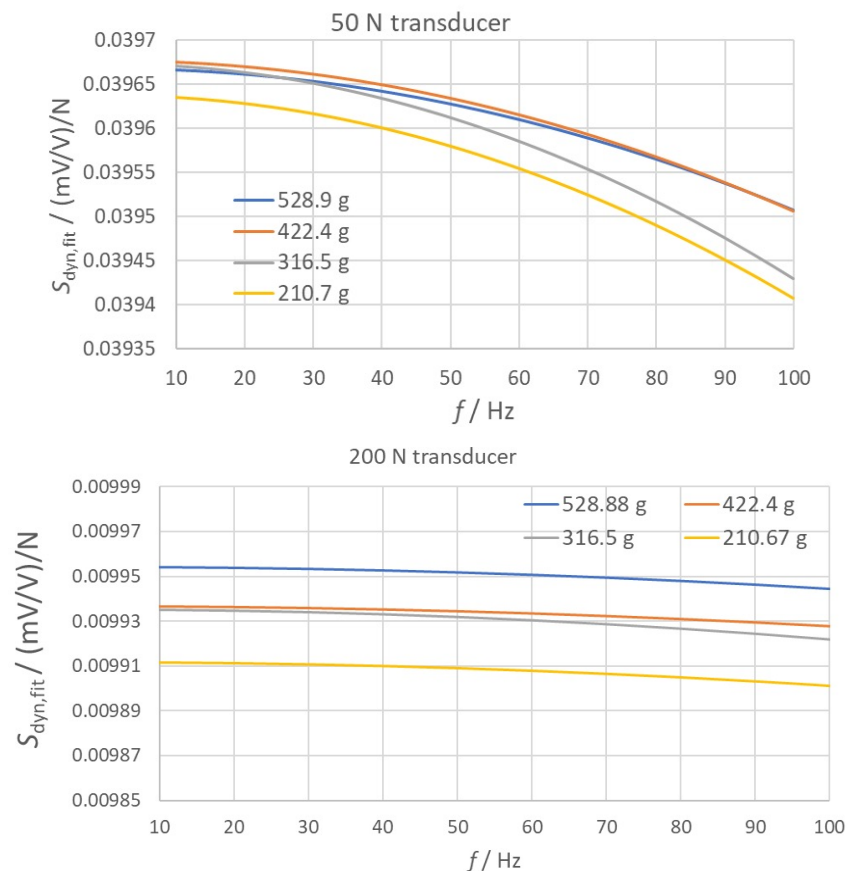
- Sistema di taratura primario delle vibrazioni INRiM
- Quattro pesi cilindrici di 207,24 g, 313,07 g, 419,02 g e 525,41 g sono adottati come masse di carico.
- 90 forze sinusoidali vengono generate consecutivamente per 30 secondi ciascuna, con una frequenza compresa tra 10 Hz e 1000 Hz e un'ampiezza costante di 2 m s^{-2} .
- Frequenza campionamento 5 kHz
- Si raggiungono forze di compressione massime da 2,7 N a 6,4 N, ovvero dall'1,3% al 3,2% della capacità del trasduttore.



TARATURA DINAMICA – DKD-R 3-10 (Sheet 2)

$$S_{\text{dyn}} = \frac{U_f}{(m_t + m_i)a_t}$$

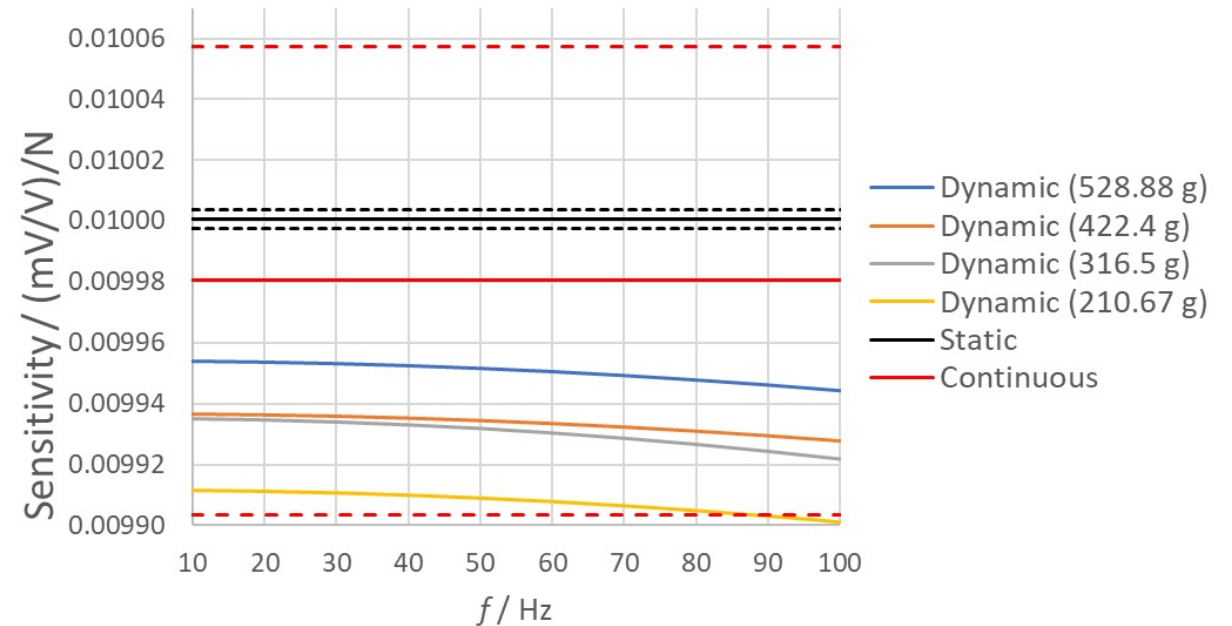
- Sensibilità dinamica S_{dyn}
- Uscita trasduttore forza U_f (in mV/V)
- Massa di carico m_t
- Massa virtuale interna $m_i = 122 \text{ g}$
- Accelerazione della massa di carico, a_t
- **Incertezze tra 1 % e 8 %**



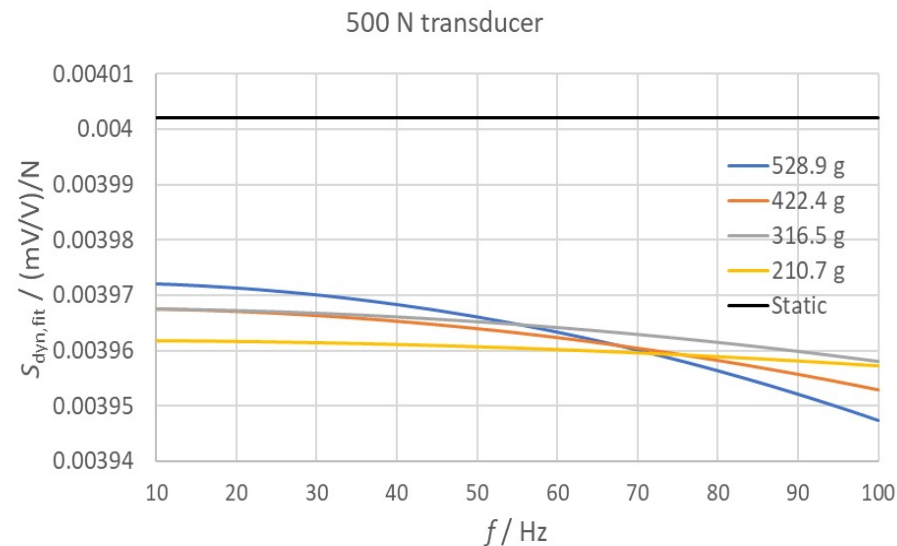
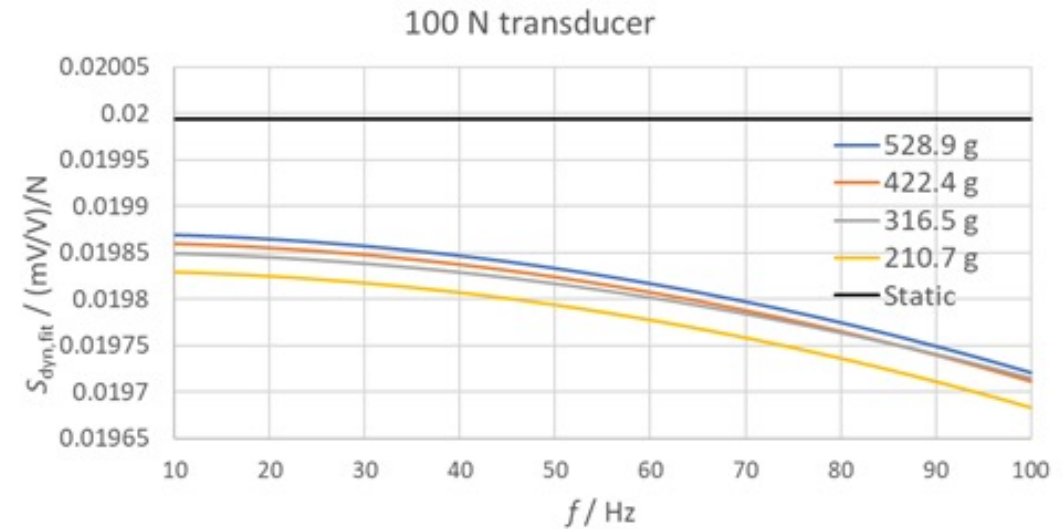
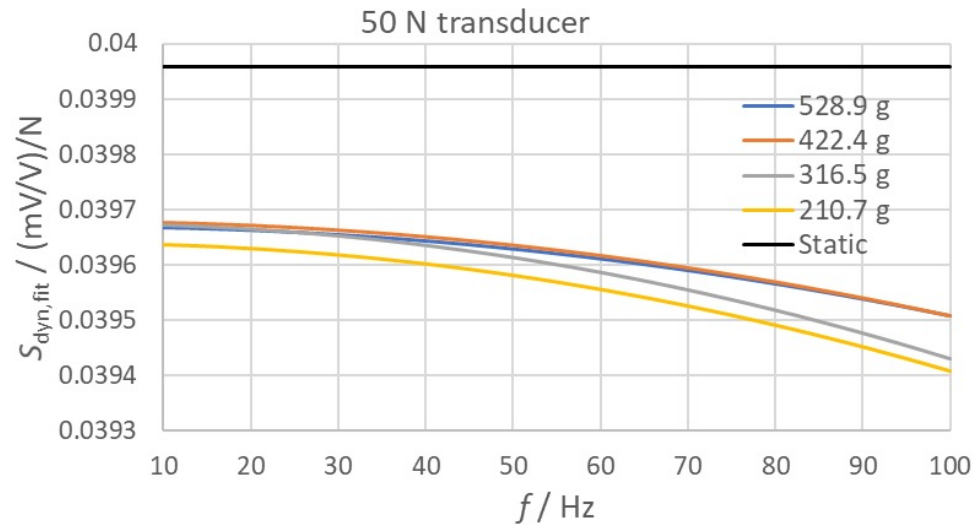
Confronto: statico vs continuo vs dinamico

- Risultati compatibili sono stati riscontrati tra tutte le sensibilità nonostante le diverse condizioni di carico.
- Se l'incertezza dinamica e continua della sensibilità diminuisse fino al livello di incertezza statica della sensibilità, la compatibilità sarebbe compromessa.
- Più ci allontaniamo dalla capacità del trasduttore, più la sensibilità dinamica si allontana dal valore statico.

Trasduttore da 200 N



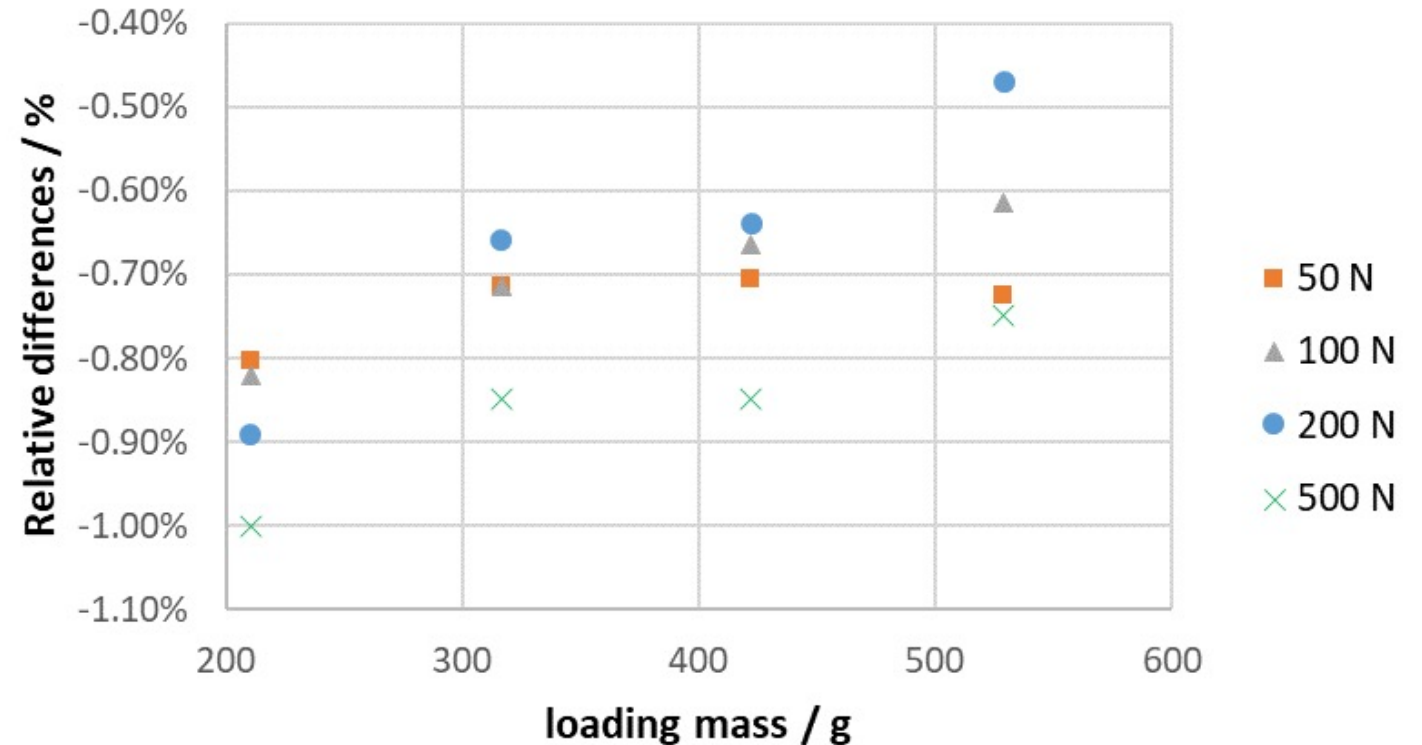
Confronto: statico vs dinamico



- Qual è il valore vero?
- Differenze nell'ordine di 1 %
- Come mai?

Confronto: statico vs dinamico

- Scostamento varia con l'aumentare del carico applicato, suggerendo che il comportamento del sensore cambi quando la forza si allontana dal valore nominale.
- Il comportamento del trasduttore vicino alla sua capacità nominale non è determinabile, perché queste condizioni non sono riproducibili con gli attuali sistemi di taratura.



Conclusioni e sviluppi futuri

- I primi confronti mostrano differenze significative tra:
 - Taratura statica
 - Taratura dinamica
 - Taratura continua
- Le discrepanze aumentano con:
 - Frequenza
 - Piccole masse di carico
- Le tarature dinamiche presentano:
 - Modelli più complessi
 - Maggiori fonti di incertezza
 - Limiti dei sistemi di taratura
- Però: descrivono meglio la realtà operativa
- Sviluppi futuri:
 - Riduzione delle incertezze dinamiche
 - Miglioramento dei sistemi di taratura
 - Evoluzione normativa verso tarature dinamiche e continue
 - Disseminazione e accreditamento

Riferimenti

- A. Prato, E. Vattasso, D. Tucci, S. Di Stefano, A. Facello, A. Germak, A. Schiavi, *Dynamic calibration of force transducers: effects of applied mass and dynamic acceleration amplitude*, The IMEKO TC3, TC5, TC16, TC20, TC22 Joint Conference 2026 (25th TC3, 15th TC5, 7th TC16, 5th TC20 and 6th TC22 Conference) & the 3rd International Conference on Dynamic Measurement, 23 – 27 March 2026, Hangzhou, China
- Prato A., Facello A., Germak A., Schiavi A., *A comparative study of static, continuous, and dynamic calibration methods for high-precision low-force strain-gauge transducers* (2026), 258, art. no. 119568DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119568
- Prato A., Improta A., Di Lernia M., Nobile S., Facello A., Mazzoleni F., Germak A., Schiavi A., *Static, continuous and dynamic calibration of force transducers: A comparative study on a low-force strain-gauge measuring device* (2025), 38, art. no. 101337DOI: 10.1016/j.measen.2024.101337

GRAZIE PER L'ATTENZIONE



Andrea Prato

INRiM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Torino
email : a.prato@inrim.it