



SIT  
Servizio di Taratura in Italia

TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE  
INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA  
DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI  
ALLE MACCHINE DI TARATURA.

Identificazione: SIT/Tec-011/05

Revisione: 0

Data 2005-04-24

Pagina 1 di 13

Annotazioni:

Il presente documento è ispirato al Rapporto interno IMGC/CNR 1041


COPIA CONTROLLATA N°

CONSEGNATA A:

COPIA NON CONTROLLATA N°

CONSEGNATA A:

|           |             |            |                  |               |
|-----------|-------------|------------|------------------|---------------|
|           |             |            |                  |               |
|           |             |            |                  |               |
|           |             |            |                  |               |
|           |             |            |                  |               |
|           |             |            |                  |               |
|           |             |            |                  |               |
| 0         | Emissione   | 2005-04-24 | C. Ferrero ..... | M. Mosca..... |
| Revisione | Descrizione | Data       | Redazione        | Approvazione  |

|   |  |                 |                |
|---|--|-----------------|----------------|
|  <p>SIT<br/>Servizio di Taratura in Italia</p> | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 2 di 13 |

GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI (fsm) ALLE MACCHINE DI TARATURA (fcm).

C. Ferrero

## 1. Scopo e introduzione.

La presente guida ha lo scopo di fornire gli elementi necessari ai Laboratori per la stima dell'incertezza di misura nella taratura delle macchine di taratura nelle catene di misura della forza. Essa è in larga misura ricavata da quanto è stato proposto in questi ultimi anni a livello internazionale /17, 18/ ed in particolare dal documento elaborato dal “*ad hoc Force Working Group*” (EA-FWG) della Commissione *Mechanical Measurements* dell'EA sulla determinazione dell'incertezza dei risultati di taratura nel settore delle forze /19/. Ai lavori del FWG, presieduto dal dr M. Peters, parteciparono i rappresentanti dei vari Istituti Metrologici e dei Sistemi di Accreditamento Europei. La “Guida per la determinazione delle incertezze nelle misure di forza”, venne approvata dalla *General Assembly* dell'EA nel 1996.

La Guida è stata largamente utilizzata a livello internazionali sia durante le attività di accreditamento sia per la determinazione delle incertezze dei risultati di taratura.


### 1.2 Problemi generali delle tarature di forza

L'incertezza di misura associata alle scale di forza realizzate presso gli Istituti Nazionali di Metrologia è derivata dalle unità di base SI e viene garantita attraverso i numerosi interconfronti effettuati a partire dagli anni '70 a livello mondiale /1, 5/.

L'incertezza estesa relativa con cui i valori di forza possono essere realizzati con macchine campioni a pesi diretti (DWM) è stata stabilita, dopo ripetuti interconfronti fra i vari Istituti Metrologici Nazionali, essere  $\leq 2 \cdot 10^{-5}$ .

Tuttavia nella pratica, quando si confrontano i risultati delle tarature di trasduttori di forza effettuati con diverse macchine campioni, le differenze relative possono essere significativamente più grandi a causa degli effetti di interazione macchina-dinamometro.

L'influenza della interazione macchina-dinamometro è stata messa in evidenza nelle successive campagne di interconfronto effettuate dal 1983 al 1995 fra diversi laboratori nell'ambito della Comunità Europea (confronti BCR o WECC) sia utilizzando dinamometri monocomponenti tradizionali di differente rigidità sia dinamometri multicomponenti /6, 16/.

|   |  |                 |                |
|---|--|-----------------|----------------|
| <br><b>SIT</b><br>Servizio di Taratura in Italia | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 3 di 13 |

I risultati delle tarature effettuate con macchine di taratura (*force calibration machine: fcm*) installate presso i Laboratori Accreditati devono essere riferibili alle unità di forza realizzate presso gli Istituti Metrologici Primari .

Occorre inoltre ricordare che i risultati delle tarature dei trasduttori di forza devono risultare compresi entro i limiti della migliore capacità di misura (*best measurement capability: bmc*) con cui sono stati accreditati i diversi laboratori.

Uno dei metodi utilizzati per valutare gli effetti dovuti alle componenti parassite e ridurre l'influenza è quello degli interconfronti con trasduttori di forza di elevata precisione impiegati come campioni di trasferimento in un intervallo limitato rispetto al fondo scala. In questo modo possono essere valutate le migliori capacità di taratura del laboratorio accreditato. Con il metodo proposto (ed ormai internazionalmente adottato) possono essere esaltate le qualità dei migliori trasduttori di forza (alta risoluzione ed elevata ripetibilità a breve termine) mentre altri effetti sistematici quali: isteresi, effetto rotazionale, deriva a lungo termine e scorrimento possono essere trattati in modo da non influenzare i risultati dell'interconfronto.

Per i trasduttori di forza commerciali da tarare su macchine di taratura di forza, le procedure di taratura e di classificazione adottate in Europa sono fornite dalla UNI EN ISO 376 (ex 10002/3) /20/.

Al fine di determinare l'incertezza di misura dei risultati di taratura per una particolare classe del trasduttore, debbono essere valutati i differenti contributi dell'incertezza.


## 2. Tipologia delle differenti macchine di taratura di forza ed esemplificazione delle migliori capacità di misura (bmc).

Le migliori capacità di misura ottenibili con macchine di taratura di forza dipendono dal tipo di realizzazione della forza. Nella tabella I sono sintetizzati alcuni valori tipici per le diverse macchine.

Tabella I

| <b>Macchine di taratura di forza</b>               | <b>Migliori capacità di misura<br/>(incertezza estesa relativa)</b> |
|--|---|
| Pesi Diretti                                       | da $5 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-4}$                            |
| Amplificazione Idraulica                           | da $1 \cdot 10^{-4}$ a $5 \cdot 10^{-4}$                            |
| Amplificazione a Leva                              | da $1 \cdot 10^{-4}$ a $5 \cdot 10^{-4}$                            |
| comparatore con 1 o più celle di carico (build-up) | da $5 \cdot 10^{-4}$ a $5 \cdot 10^{-3}$                            |

L'incertezza estesa di misura con cui i valori di forza sono realizzati da macchine di taratura a pesi diretti nei Centri di Taratura può essere teoricamente valutata in modo analogo a quanto viene fatto per le macchine campione e può essere pertanto minore di 0,005%. Dato lo sviluppo e la qualità degli attuali "campioni di trasferimento", gli sforzi

|   |  |                 |                |
|---|--|-----------------|----------------|
|  <p>SIT<br/>Servizio di Taratura in Italia</p> | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 4 di 13 |

per garantire la riferibilità delle migliori capacità di misura a valori inferiori a 0,005% può essere *troppo onerosa o tecnicamente improponibile*.

Nella maggior parte dei casi le richieste di un Centro di Taratura sono soddisfatte se la **migliore capacità di misura dello 0,01%** può essere raggiunta. Questo risultato permette al Centro di Taratura di effettuare tarature di trasduttori di forza della classe più elevata (classe 00) secondo quanto previsto dalla UNI EN ISO 376 /21/.

I valori indicati in tabella I possono essere utilizzati come la migliore capacità di misura del Centro Accreditato a condizione che il Centro proceda alla disseminazione dell'unità di forza ottenuta come *valore medio di almeno tre cicli di taratura, ciascuno dei quali sia stato effettuato in differenti posizioni angolari, equamente distribuite attorno all'asse macchina*.

***La necessità di applicazione di questo metodo deriva dalla natura vettoriale della forza.***

In questo modo le differenze fra gli effetti rotazionali della macchina campione di forza e la macchina di taratura possono essere eliminate nella valutazione delle migliori capacità di misura del centro.

Se gli effetti rotazionali sulla macchina di taratura sono eccessivamente elevati occorre valutarne le cause in modo da poterle eliminare o ridurre (considerando in primo luogo la possibilità di un errore di allineamento verticale della macchina).

Per quanto riguarda macchine di altro tipo:


1. a moltiplicazione a leva (LM)
2. a moltiplicazione idraulica (HM)
3. a confronto (piramidale o build-up con uno o più trasduttori di riferimento) (BM)

i valori più bassi della migliore capacità di misura possono essere raggiunti solo nei seguenti casi:

- a) per le macchine di tipo 1. e 2. dopo la correzione delle componenti sistematiche dovute agli errori di moltiplicazione;
- b) per le macchine a confronto dopo aver effettuato la taratura del dinamometro di riferimento su una macchina campione a pesi diretti (prima della sua installazione nella macchina a confronto) e successiva taratura della medesima a mezzo di campioni di trasferimento.

### **3. Effetti rotazionali e componenti parassite.**

Vari autori hanno investigato sulle cause di tali componenti (Peters et alii /8, 9, 16/) e sulle possibilità di ridurre o eliminarne gli effetti (Dubois et alii /5/).

|   |   |                 |                |
|---|---|-----------------|----------------|
|  | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0  | Data 2005-04-24 | Pagina 5 di 13 |

Prove effettuate sulle macchine campioni di forza dei maggiori Istituti Metrologici Primari, a mezzo di un dinamometro a 6-componenti di tipo composito (Ferrero et alii /6, 7/), hanno evidenziato inoltre la necessità di uno stretto controllo delle condizioni operative e/o di vincolo al fine di limitare e garantire la riproducibilità di tali componenti spurie. Lamine a flessione, barre smorzanti oppure carrucole eccentriche aventi lo scopo di guidare il telaio di carico o di limitare l'oscillazione delle masse al fine di ridurre i tempi necessari per la taratura di dinamometri devono essere accuratamente controllate in modo da evitare errori sistematici anche gravi /12, 13, 14/. Questo scopo può essere raggiunto "riconsiderando" la forza come **grandezza vettoriale**, arrivando a definire un modello fisico della trasmissione della stessa che tenga conto dell'interazione macchina-dinamometro ed un nuovo modello matematico delle incertezze che consideri le incertezze associate ai valori misurati dell'esavettore delle forze (3 forze e 3 momenti) al fine di ridurre il valore dell'incertezza estesa relativa  $W_{fsm}$  dei campioni primari di forza, attualmente valutata in maniera conservativa.


Un primo passo può essere, infatti, quello di ridurre alcuni termini che entrano nel calcolo dell'incertezza relativa composta del campione di trasferimento ed in particolare della stima della varianza del valore medio relativo a  $n$  posizioni angolari.

Un secondo passo può essere quello di riconsiderare anche il valore dell'incertezza estesa relativa alle Macchine Campioni Nazionali di Forza (ad es.  $W_{fsm} = 2 \cdot 10^{-5}$  per le macchine primarie a pesi diretti). Alla luce degli interconfronti /13,16/ questo valore può sembrare oggi leggermente conservativo. Un valore forse più realistico per  $W_{fsm}$  potrebbe essere compreso in una fascia di valori compresa fra i risultati ottenuti anche recentemente nella misura della coerenza interna di due macchine a pesi diretti e la variazione relativa fra le stesse (LNE - Gosset).

Un'altra possibilità valutata in sede internazionale per tenere conto della natura vettoriale della forza (e dei valori con le relative incertezze delle componenti spurie generate dalle diverse macchine) può essere quello di definire un ipervolume dell'esavettore della forza, all'interno del quale deve situarsi il vettore-forza generato dalle macchine a pesi diretti in rapporto alla loro collocazione nella scala gerarchica della forza (campione nazionale: fsm, macchina di taratura: fcm, ecc.).

#### **4. Metodo per stimare l'incertezza di misura ottenibile con macchine di taratura (fcm) e per la determinazione delle migliori capacità di misura (bmc)**

Per la migliore valutazione dei vari contributi di incertezza occorre:

|   |  |                        |                       |
|---|--|------------------------|-----------------------|
|  <p>SIT<br/>Servizio di Taratura in Italia</p> | <p>TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI ALLE MACCHINE DI TARATURA.</p> |                        |                       |
| <p>Identificazione: SIT/Tec-011/05</p>  | <p>Revisione: 0</p>  | <p>Data 2005-04-24</p> | <p>Pagina 6 di 13</p> |

**4.1** - Selezionare i vari trasduttori di forza (numero e portata), che dovranno essere utilizzati come campioni di trasferimento. Normalmente si cerca di utilizzare i trasduttori dal 40-50% al carico nominale, in modo da ridurre gli effetti di interazione e delle superfici di contatto. Si richiedono pertanto:

**4.1.1** - da 3 a 5 campioni di trasferimento;

**4.1.2** - possono essere necessari sia campioni di trasferimento a compressione sia a trazione.

**4.2** - Taratura di campioni di trasferimento su macchine campioni nazionali di forza per determinare il rispettivo valore di riferimento. La taratura richiederà che siano soddisfatte le seguenti condizioni:

**4.2.1** - misure effettuate con almeno 3 posizioni angolari;

**4.2.2** - determinazione dell'isteresi;

**4.2.3** - ripetizione di un ciclo di misura per almeno una posizione angolare.

**4.3** - Taratura della macchina di taratura per mezzo del campione di trasferimento con la stessa procedura operativa con cui sono stati tarati i campioni medesimi.

**4.4** - Determinazione della differenza relativa fra i valori di riferimento ed i risultati ottenuti sulla macchina di taratura. Si confrontano:

**4.4.1** - I valori medi ottenuti sulle diverse posizioni angolari;

**4.4.2** - I successivi livelli di carico entro l'intero intervallo di taratura.

**4.5** - Ripetizione della taratura del campione di trasferimento sulla macchina campione nazionale di forza in modo da valutare eventuali derive nel tempo del medesimo.


## **5. Valutazione dell'incertezza estesa di misura del campione di riferimento.**

L'incertezza tipo relativa e l'incertezza estesa associata ai valori di riferimento del campione di trasferimento saranno calcolati valutando i seguenti contributi:

### **5.1 - Incertezza estesa relativa $W_{fsm}$ della forza generata dalla macchina campione.**

L'incertezza estesa relativa con cui l'unità di forza è realizzata da una macchina campione nazionale di forza è  $W_{fsm} = 0,002\%$  per una macchina a pesi diretti /7/. Per macchine a moltiplicazione a leva ed idraulica la  $W_{fsm}$  può essere valutata sulla base di calcoli teorici o per mezzo dei risultati di confronti con macchine a pesi diretti.

Valori tipici delle incertezze estese di misura variano per tali macchine dallo 0,01% allo 0,02%.

|   |  |                 |                |
|---|--|-----------------|----------------|
| <br><b>SIT</b><br>Servizio di Taratura in Italia | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 7 di 13 |

## 5.2 - Valutazione dell'incertezza estesa $W_{tsd}$ nella taratura del campione di trasferimento sulla macchina campione di forza.

La quantità determinata nella taratura di un trasduttore di forza utilizzato come campione di trasferimento è il suo fattore (o coefficiente) di taratura ( $K_{tsd}$ ):

$$K_{tsd} = \frac{F_{fsm}}{x} \quad (1)$$

dove:

$F_{fsm}$  = valore della forza applicata;

$x$  = segnale di uscita del trasduttore.

Per eliminare l'influenza dell'effetto della rotazione del dinamometro attorno al suo asse il valore  $x$  nell'equazione (1) è il valore medio ottenuto per  $n$  posizioni angolari, uniformemente spaziate, del trasduttore attorno al suo asse:

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

dove gli  $x_i$  sono i valori del segnale di uscita del trasduttore di forza nelle diverse posizioni angolari.

La varianza relativa dell'indicazione media risulta essere:

$$w^2(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x})}{\bar{x}^2} = \frac{1}{n} \frac{a_{rep}^2}{3\bar{x}^2} \quad (3)$$

facendo l'assunzione che le indicazioni abbiano uguale varianza nelle differenti posizioni angolari del dinamometro.


Questa varianza è stimata dalla semi-ampiezza ( $a_{rep}$ ) della massima variazione di ripetibilità senza rotazione del trasduttore ed associandogli una distribuzione di probabilità rettangolare.

Per l'impiego del dinamometro come campione di trasferimento occorre considerare il contributo di incertezza dovuto alla deriva (*drift*) del dinamometro:

$$w^2(D) = \frac{a_{drift}^2}{6} \quad (4)$$

dove questo valore è stimato dalla semi-ampiezza  $a_{drift}$  della variazione relativa di sensibilità ed associandogli una distribuzione di probabilità triangolare.

Questa assunzione è giustificata se l'interconfronto viene effettuato in un breve periodo (tipicamente un mese) e se la deriva si può considerare variabile linearmente nel tempo

|   |  |                 |                |
|---|--|-----------------|----------------|
| <br><b>SIT</b><br>Servizio di Taratura in Italia | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 8 di 13 |

sulla base della conoscenza pregressa delle caratteristiche del dinamometro. Altrimenti si ricorre ad una distribuzione di probabilità rettangolare.

L'incertezza relativa composta  $w(K_{tsd})$  del valore di forza indicato dal campione di trasferimento e la sua incertezza estesa relativa ( $W_{tsd}$ ) con fattore di copertura  $k = 2$  risulteranno quindi:

$$w(K_{tsd}) = \sqrt{w^2(\bar{x}) + w^2(D)} \quad (5)$$

$$W_{tsd} = k \cdot w(K_{tsd}) \quad (6)$$

### 5.3 - Determinazione dell'incertezza estesa relativa del valore di riferimento $W_{refv}$ .

L'incertezza relativa estesa sarà valutata con la seguente espressione:

$$W_{refv} = k \sqrt{w^2(F_{fsm}) + w^2(K_{tsd})} \quad (7)$$


Nella tab.2 sono riportati i valori tipici dell'incertezza relativa estesa dei valori di riferimento per quattro tipologie di macchine.

I campioni di trasferimento con la migliore incertezza relativa ottenibile attualmente sono quelli indicati nella seconda colonna della tabella seguente e relativi ai trasduttori di forza da 100kN a 500kN. Qualora le macchine campione non siano del tipo a pesi diretti, l'incertezza del campione di trasferimento può diventare trascurabile. Per macchine a confronto e per forze superiori a 3MN occorre tuttavia selezionare con particolare attenzione il campione di trasferimento più appropriato.

Tabella 2

| <b>MACCHINE CAMPIONI DI FORZA</b> |                   |                        |   |                                      |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------|---|--------------------------------------|
|                                   | Pesi Diretti      | Pesi Diretti<br>> 2 kN | Amplificazione<br>Idraulica o a<br>Leva | Amplificazione<br>Idraulica o a Leva |
| $W_{fsm}$                         | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$      | $1 \cdot 10^{-4}$                       | $2 \cdot 10^{-4}$                    |

| <b>ESEMPIO DI TRASDUTTORI DI TRASFERIMENTO</b> |                      |                      |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $a_{drift}$                                    | $3 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$    | $5 \cdot 10^{-5}$    | $1 \cdot 10^{-4}$    |
| $w^2(D)$                                       | $1,5 \cdot 10^{-10}$ | $4,2 \cdot 10^{-10}$ | $4,2 \cdot 10^{-10}$ | $17 \cdot 10^{-10}$  |
| $a_{rep}$                                      | $1 \cdot 10^{-5}$    | $1,5 \cdot 10^{-5}$  | $2,5 \cdot 10^{-5}$  | $5 \cdot 10^{-4}$    |
| $w^2(x_{aver.})$                               | $1,1 \cdot 10^{-11}$ | $2,5 \cdot 10^{-11}$ | $7 \cdot 10^{-11}$   | $2,8 \cdot 10^{-10}$ |
| $W_{tsd}$                                      | $2,5 \cdot 10^{-5}$  | $4,2 \cdot 10^{-5}$  | $4,4 \cdot 10^{-5}$  | $8,9 \cdot 10^{-5}$  |

|   |  |                 |                |
|---|--|-----------------|----------------|
| <br><b>SIT</b><br>Servizio di Taratura in Italia | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 9 di 13 |

## 6. Valutazione della migliore capacità di misura (bmc) ottenibile con macchine di taratura presso Centri di Taratura.

Dopo aver effettuato la taratura delle macchine di taratura tramite interconfronto secondo quanto indicato al punto 4 è possibile determinare la migliore capacità di misura della macchina procedendo nel seguente modo:

### 6.1 - Determinazione dell'incertezza estesa relativa $W_{fcm}$ relativamente alla realizzazione della forza con macchine di taratura.

Le stime delle incertezze d'ingresso per la determinazione dell'incertezza estesa relativa  $W_{fcm}$  sono definite in tab. 3 ed ottenute durante l'interconfronto fra la macchina campione nazionale di forza e la macchina di taratura.


Tabella 3 - Contributi di incertezza per la determinazione della migliore capacità di misura per i valori di forza prestabiliti entro il campo di misura della macchina.

| Uncertainty   | Half width<br>$a$ | Probability distribution | Input estimate |
|---|-------------------|--------------------------|----------------|
| <b>Relative deviation</b> between reference values of force and values realised in the force calibration machine  | $a_{rel\_dev}$    | Triangular distribution  | $\Delta_D$     |
| <b>Relative lack of repeatability</b> of force calibration machine determined with unchanged position of the force transducer<br><br>Remark: uncertainty of force transducer has been considered here as to be negligible | $a_{rep\_fcm}$    | Rectangular distribution | $\Delta_R$     |
| Relative deviation of <b>hysteresis</b> between reference hysteresis and hysteresis measured in the force calibration machine   | $a_{hys\_fcm}$    | Rectangular distribution | $\Delta_H$     |

Le corrispondenti varianze relative risultano essere:

$$w^2(\Delta_D) = \frac{a_{rel\_dev}^2}{6} \quad (8)$$

$$w^2(\Delta_R) = \frac{a_{rep\_fcm}^2}{3} \quad (9)$$

|   |  |                 |                 |
|---|--|-----------------|-----------------|
| <br><b>SIT</b><br>Servizio di Taratura in Italia | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                 |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 10 di 13 |

$$w^2(\Delta_H) = \frac{a_{hys\_fcm}^2}{3} \quad (10)$$

L'incertezza relativa composta  $w_{fcm}$  e l'incertezza estesa relativa  $W_{fcm}$  collegate alla realizzazione della forza con la macchina di taratura sono così definite:

$$w_{fcm} = \sqrt{w^2(\Delta_D) + w^2(\Delta_R) + w^2(\Delta_H)} \quad (11)$$

$$W_{fcm} = k * w_{fcm} \quad (12)$$

Tabella 4 - Esempi di incertezza estesa relativa ottenibile con macchine di taratura.


|                 | <b>ESEMPIO DI MACCHINE DI TARATURA DI FORZA</b> |                        |   |                          |
|-----------------|---|------------------------|---|--------------------------|
|                 | Pesi Diretti                                    | Pesi Diretti<br>> 2 kN | Amplificazione<br>Idraulica o a<br>Leva | Confronto (Build-<br>Up) |
| $a_{rel. dev.}$ | $5 \cdot 10^{-5}$                               | $1 \cdot 10^{-4}$      | $2 \cdot 10^{-4}$                       | $4 \cdot 10^{-4}$        |
| $w^2(\Delta_D)$ | $4,2 \cdot 10^{-10}$                            | $1,7 \cdot 10^{-9}$    | $6,7 \cdot 10^{-9}$                     | $2,7 \cdot 10^{-8}$      |
| $a_{rep-fcm}$   | $1 \cdot 10^{-5}$                               | $1 \cdot 10^{-5}$      | $2,5 \cdot 10^{-5}$                     | $5 \cdot 10^{-5}$        |
| $w^2(\Delta_R)$ | $3,3 \cdot 10^{-11}$                            | $3,3 \cdot 10^{-11}$   | $2,1 \cdot 10^{-10}$                    | $8,3 \cdot 10^{-10}$     |
| $a_{hys\_fcm}$  | $5 \cdot 10^{-6}$                               | $5 \cdot 10^{-6}$      | $2,5 \cdot 10^{-5}$                     | $1 \cdot 10^{-4}$        |
| $w^2(\Delta_H)$ | $8,3 \cdot 10^{-12}$                            | $8,3 \cdot 10^{-12}$   | $2,1 \cdot 10^{-10}$                    | $3,3 \cdot 10^{-9}$      |
| $W_{fcm}$       | $4 \cdot 10^{-5}$                               | $8 \cdot 10^{-5}$      | $1,8 \cdot 10^{-4}$                     | $3,5 \cdot 10^{-4}$      |

La tab. 4 fornisce alcuni esempi tipici di risultati ottenuti con macchine di taratura di forza. I valori indicati in colonna 2 per le macchine a pesi diretti sono quelli tipici per le macchine di portata superiore a 2kN. In colonna 4 sono riportati alcuni valori tipici ottenibili con macchine a moltiplicazione a leva o idraulica, purché siano state introdotte le correzioni per l'eliminazione delle variazioni sistematiche del rapporto di moltiplicazione in funzione della forza applicata.

La variazione relativa ottenibile con le macchine a confronto dipende dalla struttura del telaio e dal sistema di controllo della macchina.

Per questo tipo di macchine occorre inoltre considerare il contributo di incertezza dovuto alla stabilità a lungo termine del trasduttore di riferimento incorporato nella macchina.

## 6.2 - Determinazione della migliore capacità di misura $W_{bmc}$ .

|   |  |                 |                 |
|---|--|-----------------|-----------------|
| <br><b>SIT</b><br>Servizio di Taratura in Italia | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                 |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 11 di 13 |

La migliore capacità di misura, raggiungibile presso Centri Accreditati, con macchine a pesi diretti, a moltiplicazione idraulica od a leva sono calcolabili con la seguente espressione:

$$W_{bmc} = k \sqrt{w_{refv}^2 + w_{fcm}^2} \quad (13)$$

Nella valutazione delle macchine del tipo a confronto (build-up) occorre tenere conto di due ulteriori componenti dell'incertezza, e cioè:

$w_{ref-tra}$  = incertezza del trasduttore di forza di riferimento

$w_{ref-inst}$  = incertezza dovuta alla instabilità a lungo tempo del trasduttore

In tal caso la (13) diventa:

$$W_{bmc} = k * \sqrt{w_{refv}^2 + w_{fcm}^2 + w_{ref\_tra}^2 + w_{ref\_inst}^2} \quad (14)$$

In tab. 5 sono riportati i risultati complessivi relativi alla migliore capacità di misura (bmc) per diversi tipi di macchine.

L'incertezza relativa del trasduttore di forza di riferimento verrà valutata secondo quanto indicato nella procedura relativa alla valutazione delle incertezze nei trasduttori di forza.


**L'instabilità a lungo termine deve essere valutata sulla base di tarature ripetute.**

Questa componente di incertezza può essere calcolata assumendo una distribuzione triangolare simmetrica della variazione di sensibilità.


Tabella 5: Migliore capacità di misura per i diversi tipi di macchine

| <b>ESEMPIO DELLA MIGLIORE CAPACITA' DI MISURA</b> |                     |                        |                                      |                      |
|---|---------------------|------------------------|--------------------------------------|----------------------|
|   | Pesi Diretti        | Pesi Diretti<br>> 2 kN | Amplificazione<br>Idraulica o a Leva | Confronto (Build-Up) |
| $W_{ref\ tra}$                                    | -                   | -                      | -                                    | $3 \cdot 10^{-4}$    |
| $W_{ref\ instb}$                                  | -                   | -                      | -                                    | $2 \cdot 10^{-4}$    |
| $W_{refv}$  | $3,2 \cdot 10^{-5}$ | $4,7 \cdot 10^{-5}$    | $3,5 \cdot 10^{-5}$                  | $3,5 \cdot 10^{-5}$  |
| $W_{fcm}$   | $4,3 \cdot 10^{-5}$ | $8,3 \cdot 10^{-5}$    | $1,8 \cdot 10^{-4}$                  | $3,5 \cdot 10^{-4}$  |
| $W_{bmc}$   | $5,4 \cdot 10^{-5}$ | $9,5 \cdot 10^{-5}$    | $1,8 \cdot 10^{-4}$                  | $5 \cdot 10^{-4}$    |

## 7. Riferimenti

|   |  |                        |                        |
|---|--|------------------------|------------------------|
|  <p>SIT<br/>Servizio di Taratura in Italia</p> | <p>TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI ALLE MACCHINE DI TARATURA.</p> |                        |                        |
| <p>Identificazione: SIT/Tec-011/05</p>  | <p>Revisione: 0</p>  | <p>Data 2005-04-24</p> | <p>Pagina 12 di 13</p> |

- [1] Debnam RC, Wieringa H: An intercomparison of force standard machines. VDI - Berichte Nr. 212, 1974.
- [2] Jenkins RF, Debnam RC: An intercomparison of force standard machines at the NBS and the NPL. NPL Report MOM61, 1982.
- [3] Bray A, Ferrero C, Levi R, Marinari C: An investigation on parasitic effects on force standard machines. VDI- Berichte n. 312, 1978.
- [4] Ferrero C, Marinari C, Martino E: Deformazioni elastiche nella macchina campione di forza IMGC. XI Congr. AIAS, 1983.
- [5] Dubois M, Bourateu JP, Gosset A, Priel M: Intercomparaison de trois bancs d'étalonnage dynamométrique de capacité 250-300 kN, agréés par le BNM. Bulletin d'information du Bureau National de Metrologie, vol. 11, 1980.
- [6] Ferrero C, Marinari C, Martino E: Analysis and calibration of IMGC six-component dynamometer. BCR Technical Report, contract n. 1304/1/0/062, 1983.
- [7] Ferrero C, Marinari C, Martino E: A six-component dynamometer to measure parasitic load components on deadweight force standard machines. Proc. of the 10th Conf. of IMEKO TC3, Kobe, Japan, 1984.
- [8] Peters M: Reasons for and consequences of the rotation and overlapping effect. Proc. of the 10th Conf. of IMEKO TC3, Kobe, Japan, 1984.
- [9] Peters M: Limits to the uncertainty achievable in force transfer, Weigtech '83, 1983.
- [10] Weiler W, Sawla A: Force Standard Machines of the National Institutes for Metrology, PTB Bericht Me-22, Braunschweig, 1978.
- [11] Gosset A, Nossent P: Réalisation et évaluation d'un banc de référence force de capacité 500 kN, LNE, 1986.
- [12] Ferrero C, Marinari C, Li Qing Zhong : The measurements of parasitic components and the influence of load transfer systems on a force standard machine, ICEM, Beijing, 1985.
- [13] Ferrero C, Marinari C, Martino E: Evaluation of parasitic components on National deadweight force standard machines, 11th IMEKO Conf., Amsterdam, 1986.
- [14] Ferrero C, Marinari C, Martino E: Main metrological characteristics of IMGC six-components dynamometer, Rep. in Applied Measurements, HBM, vol.2, nr.2, 1986.
- [15] Ferrero C, Marinari C: Metrological characterization of load cells by means of different multicomponent calibration systems, Jurema 32, Zagreb, 1987.
- [16] Sawla a, Peters M: WECC Inter-laboratory comparison F2 force transducer calibration, PTB-MA-28, Braunschweig, 1993.
- [17] GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (1995).
- [18] UNI CEI ISO 13005, Guida all'espressione dell'incertezza di misura (traduzione italiana della GUM).

|   |  |                 |                 |
|---|--|-----------------|-----------------|
|  | TITOLO: GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE<br>INCERTEZZE NELLA CATENA DI MISURA<br>DELLA FORZA: DAI CAMPIONI NAZIONALI<br>ALLE MACCHINE DI TARATURA. |                 |                 |
| Identificazione: SIT/Tec-011/05   | Revisione: 0   | Data 2005-04-24 | Pagina 13 di 13 |

[19] EA-10/04 (EA-G22), Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, (1996).

[20] UNI EN 10002 / 3, Taratura degli strumenti di misurazione della forza utilizzati per la verifica delle macchine di prova uniassiale, Milano, (Settembre 1996).

[21] ISO 376, Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, (1999).

[22] UNI ISO 376, Taratura degli strumenti di misurazione della forza utilizzati per la verifica delle macchine di prova uniassiale, Milano, (2004).