

STIMA DELL'INCERTEZZA DI UN PROCESSO DI MISURAZIONE CON CMM

di Gianfranco Costelli

1 - INTRODUZIONE

Giudicheremo l'adeguatezza di un processo di misurazione, applicando il metodo PUMA proposto dalla ISO TS 14253-2. Si utilizzerà quindi il modello a "scatola nera", e si effettueranno una serie di iterazioni per raggiungere un risultato conforme ad obiettivi predefiniti in termini di incertezza di misura. Durante le iterazioni saranno modificati procedure, metodi, principi della misurazione, ed eventualmente anche gli obiettivi prefissati, in modo da ottenere un risultato accettabile. Al termine del lavoro non avremo tuttavia conseguito la riferibilità delle misure, almeno non al livello di quanto realizzabile applicando le norme della serie ISO 15530, ma questo argomento sarà oggetto di un altro articolo.

2 - SITUAZIONE

Supponiamo di dovere misurare alcune caratteristiche dimensionali e geometriche del pezzo rappresentato in fig. 1, e precisamente, per iniziare, le lunghezze con tolleranza: distanza tra spallamenti 126 mm, interasse 320 mm e diametro 52 mm, inteso come distanza tra due punti opposti su di una circonferenza sezione retta della superficie cilindrica.

Supponiamo di avere a disposizione una CMM automatica di dimensioni idonee, corredata di sistema tastatore articolato con testa orientabile motorizzata. Il tastatore è di tipo trigger.

Le prestazioni metrologiche della CMM dichiarate dal costruttore, in conformità alla ISO 10360-2, sono espresse in termini di massimi errori ammissibili (MPE) per un sistema monostilo di lunghezza 20 mm:

- $MPE_E = (3+L / 250)$ pm (massimo errore di indicazione ammissibile per misurazioni di dimensioni),
- $MPE_P = 2,5$ pm (massimo errore di tastatura ammissibile).

Sono inoltre dichiarati limiti per le condizioni termiche ambientali:

- $T \sim (20 \pm 2)^\circ\text{C}$,
- variazione temporale massima di $1^\circ\text{C}/\text{h}$,
- gradiente spaziale massimo di $1^\circ\text{C}/\text{m}$.

I coefficienti di dilatazione delle righe ottiche della macchina valgono $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, e sono noti con un'incertezza estesa $U_{CS} = 1,10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

La macchina è posta in una sala collaudo condizionata, la cui temperatura media è pari a 22°C , con variazioni

stagionali di $\pm 1^\circ\text{C}$, a cui si sovrappongono oscillazioni giornaliere di $\pm 1^\circ\text{C}$.

Le condizioni ambientali della sala sono ritenute sufficientemente conformi alle specifiche del costruttore della CMM. Così pure le altre condizioni operative.

Per quanto riguarda il pezzo da misurare, esso è prodotto in lotti di media entità. E' costruito in acciaio speciale, con coefficiente di dilatazione $\alpha_p = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. L'incertezza estesa associata ad α_p è del 20%, essendo tale valore dedotto dalla documentazione tecnica disponibile, quindi, arrotondando per eccesso: $U_{\alpha_p} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Il pezzo perviene al Collaudo ad una temperatura di $(15+35)^\circ\text{C}$.

In Collaudo è eventualmente disponibile un termometro digitale, dotato di sonde per misurazioni ambientali ed a contatto per il pezzo; la risoluzione è $0,1^\circ\text{C}$ e la precisione è indicata dal costruttore forma di errore massimo: $MPE_T = 0,5^\circ\text{C}$.

3 - CONDIZIONI ED OBIETTIVO INIZIALI

il presente articolo non vuole proporre un ciclo di misurazione, quindi non discuteremo le modalità di attrezzaggio del pezzo, e non faremo considerazioni circa le strategie di misurazione. Ma alcune ipotesi procedurali di base sono indispensabili.

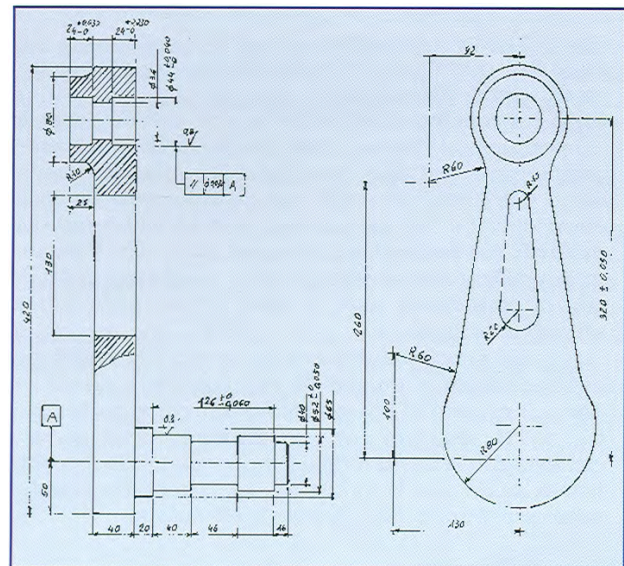


Fig. 1 – pezzo da misurare

Stabiliamo quindi di non misurare le temperature attuali di pezzo e macchina, e di non utilizzare, o non avere disponibile, la compensazione termica integrata nell'a CMM.

Vogliamo verificare la possibilità di misurare le dimensioni indicate con una incertezza pari al 10% del campo totale delle rispettive tolleranze (incertezza di misura obiettivo o *target* secondo ISO TS 14253-2).

4 - COMPONENTI D'INCERTEZZA

Dobbiamo fare ipotesi sui componenti d'incertezza che riteniamo significativi, e stimare i loro contributi.

Consideriamo almeno i seguenti:

- Errore strumentale E_M
- Errore per dilatazione termica differenziale E_T
- Errore dell'operatore E_O
- Errore di forma del pezzo E_F

Le relative incertezze tipo saranno indicate rispettivamente con i simboli u_{EM} , u_{ET} , u_{EO} , u_{EF} .

Errore strumentale

Utilizziamo l'indicazione MPE_E del costruttore, che definisce i limiti d'errore delle misure di lunghezza proposte dalla CMM.

Siamo pronti a modificare i valori di targa per tenere conto che:

la situazione termica della CMM non è quella ottimale prescritta,

utilizzeremo configurazioni del sistema tastatore più sfavorevoli di quelle per le quali sono dichiarati MPE_E ed MPE_p ,

non sempre le lunghezze saranno misurate in conformità alla definizione di MPE_E . La migliore approssimazione a tali modalità si realizza misurando il diametro; la lunghezza 126 mm è invece verificata come distanza tra punti tastati secondo direzioni equiverse, a cui non contribuisce l'errore di qualificazione del raggio dell'elemento sferico di contatto dello stilo, quindi la prestazione della CMM è potenzialmente migliore; analogamente per la misurazione dell'interasse, per cui dovremo però stimare l'accuratezza realizzabile con un tastatore multiplo.

Si noti che alcuni contributi d'incertezza come quelli descritti, e dipendenti dalle strategie di misurazione, possono essere conteggiati anche come "errori dell'operatore", definiti più avanti. Attenzione a non duplicarli!

Dovremo poi fare ipotesi circa il tipo della distribuzione di frequenza di E_M , in genere sarà considerata rettangolare entro limiti $\pm MPE_E$, che saranno moltiplicati per il fattore $k = 1/\sqrt{3} = 0,58$ per calcolare l'incertezza tipo.

$$u_{EM} = 0,58 \cdot MPE_E$$

Errore "termico"

Trattando di effetti termici terremo conto della ISO TR 16015, di cui non è tuttavia adottata la simbologia, e da cui derogheremo almeno durante la prima iterazione, come indicato più avanti.

Il maggior fattore di disturbo è in genere l'errore E_{NDE} per dilatazione termica differenziale, che si calcola con la nota espressione:

$$E_{NDE} = L \cdot (\alpha_p \cdot (T_p - 20) - \alpha_m \cdot (T_m - 20))$$

dove i pedici p ed m indicano parametri che si riferiscono rispettivamente a pezzo e macchina di misura.

Si tratta di un errore sistematico, che deve quindi essere compensato.

Nel caso la correzione non venga effettuata, esso non deve essere conteggiato nella somma quadratica delle incertezze tipo, deve essere calcolato secondo la formula [5] e deve essere indicato assieme alla misura (così prescrive la ISO 16015). In prima approssimazione, almeno in sede di prima iterazione, derogheremo dalla procedura corretta ed utilizzeremo la formula [6], considerando una variabile con distribuzione di probabilità rettangolare, entro limiti $\pm E_{NDE}$. Ciò allo scopo di confrontare più facilmente i pesi con cui i differenti contributi "entrano" nell'espressione dell'incertezza composta.

L'incertezza tipo della stima di E_{NDE} è dunque calcolata con la seguente espressione:

$$[1] \quad u_{ENDE}^2 = u_{\alpha M}^2 + u_{TM}^2 + u_{ETVE}^2$$

in cui, trascurando la eventuale correlazione tra le misure di temperatura:

$$[2] \quad u_{\alpha M}^2 = L^2 (t_p^2 \cdot u_{\alpha p}^2 + t_m^2 \cdot u_{\alpha m}^2)$$

$$[3] \quad u_{TM}^2 = L^2 (t_p^2 \cdot u_{\alpha p}^2 + t_m^2 \cdot u_{\alpha m}^2)$$

$$[4] \quad u_{ETVE} = \frac{E_{ETVE}}{\sqrt{12}}$$

e, quindi, l'espressione dell'errore per effetti termici, completa della stima della sua incertezza, è:

$$[5] \quad E_T = E_{NDE} \pm 2 \cdot u_{ENDE}$$

Ma, come si è detto, in prima approssimazione sarà utilizzata la:

$$[6] \quad u_{ET}^2 = \left(\frac{E_{NDE}}{\sqrt{3}} \right)^2 + u_{ENDE}^2$$

I simboli nelle formule [1]-[3] sono quelli usuali, di ovvio significato. Si noti specialmente che:

- (t) indica la differenza dai 20°C della temperatura T;
- (t) ed (α) sono valori medi;
- ($u_{\alpha M}$) è il contributo dell'incertezza con cui sono noti i coefficienti di dilatazione;
- (u_{TM}) è il contributo dell'incertezza con cui sono note le temperature del pezzo e della macchina, eventualmente comprensivo dell'incertezza dell'indicazione del termometro e dell'incertezza della misura, influenzata dagli errori operativi sia dai gradienti termici all'interno dei materiali.

Per la macchina, faremo in particolare l'ulteriore semplificazione, giustificata dalle condizioni ambientali, di considerare tutte le righe ottiche nella stessa situazione termica;

- (u_{ETVE}) è il contributo d'incertezza dovuto alla variazione della temperatura durante la misurazione, e dovrebbe essere il risultato di prove specificamente eseguite. Qui faremo l'ipotesi che esista solo una componente lineare, calcolata con la stessa formula che fornisce E_{NDE} , avendo fissato valori per la variazione della temperatura del pezzo e della macchina durante le misurazioni.

Errore dell'operatore

Per una CMM automatica, esso è essenzialmente conseguenza delle scelte operate durante la progettazione del ciclo di misurazione.

Si consideri ad esempio la misurazione dell'interasse 320 mm: l'incertezza delle direzioni dell'asse principale del sistema di riferimento (asse dei cilindri diametro 52 mm) e dell'asse dei cilindri diametro 44 mm si traduce in un'incertezza delle loro intersezioni su di un piano perpendicolare, cioè della loro distanza.

Un altro esempio: la dispersione delle misure di una serie di pezzi eguali, per scelta e/o identificazione inadeguate del sistema di riferimento.

Errore di forma

Secondo la norma ISO 8015, le tolleranze dimensionali e geometriche sono considerate indipendenti. In sede di collaudo dimensionale questa condizione non si può verificare, essendo le misure di lunghezza specificatamente indicate come distanza tra due punti tastati sulle superfici reali. Quindi, ad esempio, la misura del diametro di un cilindro sarà dipendente dalla posizione dei punti tastati, in funzione dell'errore di cilindricità dell'oggetto reale.

5 - ITERAZIONE PUMA

In sede di prima iterazione, valutiamo globalmente l'incertezza delle tre misure di lunghezza assegnate, allo scopo di individuare tutte le criticità del processo di misurazione.

Operiamo le seguenti scelte:

- 1) $MPE_E = (3+L/250) \mu m$
per tutte le tre misure di lunghezza.
- 2) Per l'effetto termico, stabiliamo a procedura di misurare i pezzi dopo un tempo di stabilizzazione sufficiente a recuperare il 50% della loro differenza di temperatura dalla media della sala; consideriamo come errore limite delle misure della temperatura il conseguente scostamento massimo previsto dalle temperature medie, al momento del collaudo; ipotizziamo che gli errori di misura delle temperature seguano distribuzioni di probabilità rettangolari simmetriche attorno al valore medio.

Risultano quindi i valori riportati in Tabella 1.

Temperatura media sala e CMM	Ts	22°C
Differenza media dai 20°C di Ts	ts	2°C
Max differenza dalla media della temperatura delle scale della CMM	E_{TS}	24-22 = 2°C
Incetezza tipo relativa a $E_{TS} = E_{TS} / \sqrt{3}$	u_{TS}	1,2°C
Temperatura media del pezzo $[(22+(35-22)\cdot 0,5)+(22-(22-15)\cdot 0,5)]/2^\circ C$	T_p	23,5°C
Differenza media dai 20°C di T_p	tp	3,5°C
Max differenza dalla media della temperatura del pezzo $= (22+(35-22)\cdot 0,5)-23,5^\circ C$	E_{TP}	5°C
Incetezza tipo relativa a $E_{TP} = E_{TP} / \sqrt{3}$	u_{TP}	2,9°C

Tabella 1 - Situazione termica - 1 iterazione

contributo	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var.%
EM	3,2	0,6	1,9	3,5	2,4
ENDE	1,5	0,6	0,9	0,8	
$u_{\alpha M}$			0,3	0,1	
u_{TM}			2,0	4,0	
EETVE	0,7	0,3	0,2	0,0	
ET			2,2	5,0	3,5
EO	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
EF	20,0	0,6	11,6	134,6	94,1
	incert.	comp.	12,0	143,0	100,0
	incert.	estesa	23,9		
	target		5,0		

Tabella 2a - Diametro 52 mm - 1 iterazione

contributo	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var.%
EM	3,5	0,6	2,0	4,1	6,2
ENDE	3,7	0,6	2,2	4,6	
$u_{\alpha M}$			0,8	0,6	
u_{TM}			4,9	23,7	
EETVE	1,6	0,3	0,5	0,2	
ET			5,4	29,2	43,6
EO	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
EF	10,0	0,6	5,8	33,6	50,3
	incert.	comp.	8,2	66,9	100,0
	incert.	estesa	16,4		
	target		6,0		

Tabella 2b - Lunghezza 126 mm - 1 iterazione

contributo	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var.%
EM	4,3	0,6	2,5	6,2	2,7
ENDE	9,4	0,6	5,5	30,0	
$u_{\alpha M}$			1,9	3,7	
u_{TM}			12,4	153,0	
EETVE	4,2	0,3	1,2	1,5	
ET			13,7	188,1	82,5
EO	10,0	0,6	5,8	33,6	14,8
EF	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
	incert.	comp.	15,1	227,9	100,0
	incert.	estesa	30,2		
	target		10,0		

Tabella 2c - Interasse 320 mm - 1 iterazione

Per quanto riguarda l'incertezza tipo da attribuire ai valori con cui sono noti i coefficienti di dilatazione termica delle scale e del materiale, dalle ipotesi iniziali del paragrafo 2 risultano:

$$u_{\alpha m} = U_{\alpha m} / 2 = 0,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

(essendo nota l'incertezza estesa con coefficiente di copertura $k = 2$ e distribuzione normale).

$$u_{\alpha P} = U_{\alpha P} / \sqrt{3} = 1,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

(ipotizzando una distribuzione di probabilità rettangolare).

Per quanto riguarda E_{ETVE} supponiamo che la temperatura del pezzo durante la prova possa variare al massimo di $\Delta T_P = 1^\circ C$, e che date la sua forma e la sua temperatura esso non subisca distorsioni, ma solo variazioni dimensionali lineari. Se aggiungiamo la condizione che la temperatura della macchina sia costante,

$$E_{ETVE} = L \cdot \alpha_P \cdot \Delta T_P$$

e la relativa incertezza si esprime come già indicato in formula [4], in conseguenza di una ipotesi di distribuzione rettangolare di ampiezza totale pari a E_{ETVE} .

3) Si prevede di misurare la quota 126 mm come distanza tra due punti corrispondenti, tastati su piani reali nominalmente paralleli.

Non si prevede, data la semplicità dell'operazione, alcun "errore operatore", ma una eventuale deviazione dal parallelismo (E_F) tra i due piani contribuisce all'incertezza della misura con un errore massimo pari appunto ad E_F .

Assumiamo che la relativa distribuzione di probabilità sia rettangolare, e fissiamo come scelta iniziale, data la mancanza di indicazioni a disegno, $E_F = 10 \mu m$.

4) Per il diametro, in base a considerazioni analoghe alle precedenti, stabiliamo di considerare solo l'effetto dell'errore di cilindricità, stimato inizialmente pari a $10 \mu m$. La variazione del diametro è pari al doppio dell'errore di cilindricità. Teniamo quindi in conto un possibile errore di misura che vale al massimo $E_F = 20 \mu m$, con distribuzione di probabilità rettangolare.

5) Veniamo alla misurazione dell'interasse. La scelta, inderogabile, di un piano ortogonale con cui intersecare gli assi di perno e foro ci evita di dover considerare come componente d'incertezza la deviazione dal parallelismo dei due assi, quotata entro $30 \mu m$. In questo caso, la misura è tuttavia fortemente dipendente dalla strategia secondo la quale questi sono calcolati, in funzione non solo degli errori della CMM, ma anche della forma degli elementi geometrici tastati. Ipotizziamo come scelta iniziale che la distanza tra i due punti intersezione sul piano di riferimento sia influenzata da un contributo d'incertezza compreso entro i limiti $\pm E_o = \pm 10 \mu m$, con distribuzione di probabilità rettangolare.

Possiamo quindi elaborare i dati, con i risultati dei fogli di calcolo riportati nelle Tabelle 2, per cui i valgono le formule [7] ed [8]:

$$[7] u_c^2 = u_{EM}^2 + u_{ET}^2 + u_{EO}^2 + u_{EF}^2$$

$$[8] U_c = 2 \cdot u_c$$

Si noti che nelle tabelle i valori di incertezza tipo e varianza delle righe a sfondo giallo sono stati sommati nel contributo totale E_T . L'incertezza estesa indicata è espressa come incertezza tipo moltiplicata per il fattore di copertura $k = 2$ che, per una distribuzione normale, corrisponde ad una probabilità di copertura del 95% circa.

Come si vede, non è stato realizzato l'obiettivo, e i componenti d'incertezza che hanno maggior peso sono l'errore di forma per il diametro 52 mm, il fattore termico per l'interasse 320 mm, entrambi per la lunghezza 126 mm. Il fattore relativo alla precisione della macchina pesa sempre molto poco.

6 - II ITERAZIONE

Prevediamo di rilevare le temperature del pezzo e della sala (temperatura ambientale T_s) prima delle misurazioni, e di compensare E_{NDE} .

Supponiamo che le scale della CMM abbiano una temperatura differente da T_s entro $E_{T_s} = \pm 2^\circ C$.

L'incertezza della temperatura delle scale della CMM è la combinazione dell'incertezza con cui essa è stimata in funzione della temperatura della sala, e dell'incertezza di quest'ultima, a causa del solo errore dello strumento, che, ricordiamo, vale $MPE_T = 0,5^\circ C$.

$$u_{T_s} = \sqrt{\left(\frac{E_{T_s}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{MPE_T}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Per quanto riguarda il pezzo, supporremo che la differenza tra la temperatura efficace ai fini della dilatazione e quella misurata sia al massimo $E_{T_P} = \pm 1^\circ C$, e utilizzeremo la formula:

$$u_{T_P} = \sqrt{\left(\frac{E_{T_P}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{MPE_T}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Risulta la Tabella 3 di sintesi della situazione termica.

Differenza media dai 20°C di T_s	t_s	2°C
già definito in Tabella 1	E_{T_s}	2°C
Incetenza tipo temp. scale CMM	u_{T_s}	1,2°C
Differenza media dai 20°C di T_p	t_p	3,5°C
già definito in Tabella 1	E_{T_p}	1°C
Incetenza tipo temp. pezzo	u_{T_p}	0,7°C

Tabella 3 - Situazione termica - 2 iterazione

Procediamo con i calcoli per l'interasse 320 mm, e constatiamo che l'obiettivo non è stato raggiunto; questa volta il contributo prevalente è l'errore di parallelismo conseguente alla strategia di misurazione. Si veda la tabella 4.

contributo L 320	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var.%
EM	4,3	0,6	2,5	6,2	10,0
ENDE	9,4	0,6	5,5	0,0	
$u_{\alpha M}$			1,9	3,7	
u_{TM}			4,1	16,4	
EETVE	4,2	0,3	1,2	1,5	
ET			4,6	21,6	35,2
EO	10,0	0,6	5,8	33,6	54,8
EF	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
	incert.	comp.	7,8	61,4	100,0
	incert.	estesa	15,7		
	target		10,0		

Tabella 4 - Interasse 320 mm - 2 iterazione

7 - ITERAZIONI SUCCESSIVE PER L'INTERASSE 320 MM

Proseguiamo con ipotetiche modifiche alle condizioni iniziali, ricordando che questo è un esempio, e si potrà svilupparlo diversamente.

Non vogliamo ridurre eccessivamente il valore di E_o , in quanto preferiamo avere buoni margini di sicurezza sulla misurazione di questa caratteristica geometrica. Fissiamo $E_o = 9 \mu\text{m}$, con riserva di successivo affinamento.

Concordiamo con l'Assicurazione Qualità un incremento al 20% del rapporto incertezza/tolleranza.

Osserviamo che il contributo dall' MPE_E della CMM continua ad essere molto minore di tutti gli altri, quindi "declassiamo" la macchina di misura ad una precisione caratterizzata da $MPE_E = (5+L/100) \mu\text{m}$.

Il risultato è riportato in Tabella 5. L'obiettivo è raggiunto!

8 - ITERAZIONI SUCCESSIVE PER LE ALTRE DIMENSIONI

Verifichiamo che con le nuove ipotesi l'obiettivo è raggiunto anche per la misura di lunghezza 126 mm, ma solo dopo avere stabilito con la Produzione che il parallelismo tra i due piani interessati può essere facilmente contenuto entro $8 \mu\text{m}$ (si veda la Tabella 6).

Per il diametro 52 mm, si veda la nuova elaborazione dei dati riportata in Tabella 7. Raggiungiamo l'obiettivo solo dopo avere ridotto a $3,5 \mu\text{m}$ l'errore di cilindricità consentito.

Ci riserviamo comunque di riesaminare il problema della misurazione del diametro, considerandolo come parametro associato ad un cerchio.

9 - CONCLUSIONI

Abbiamo dunque verificato la fattibilità della misurazione delle dimensioni proposte, ma abbiamo dovuto accettare notevoli deroghe alle condizioni iniziali. Si sono dovuti imporre limiti alla situazione termica, e si è dovuto prevedere la compensazione dell'errore di dilatazione termica differenziale; si sono dovute ridurre alcune tolleranze geometriche, e, in particolare, si è dovuto derogare sul rapporto tra l'incertezza delle misure e la tolleranza.

Il pezzo sarà quindi accettato in conformità alla ISO 14253-1, quando le misure (M) proposte dalla CMM saranno comprese entro i limiti $\pm (T - U)$. Si noti che l'incertezza è sottratta ai limiti di tolleranza, come prevede la Norma quando sia applicata dal Fornitore.

Dovrà dunque essere:

$$319,967 \text{ mm} \leq M_{320} \leq 320,033 \text{ mm}$$

$$125,952 \leq M_{126} \leq 125,988 \text{ mm}$$

$$51,961 \text{ mm} \leq M_{52} \leq 51,989 \text{ mm}$$

Ma il lavoro non è terminato, occorre ora verificare l'applicabilità di tutte le condizioni ipotizzate, in particolare per quanto riguarda i valori dei componenti d'incertezza, ed eventualmente anche per il tipo delle loro distribuzioni di probabilità.

contributo	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var. %
L 320					
EM	8,2	0,6	4,8	22,6	31,7
ENDE	9,4	0,6	5,5	0,0	
$u_{\alpha}M$			1,9	3,7	
u_{TM}			4,1	16,4	
EETVE	4,2	0,3	1,2	1,5	
ET			4,6	21,6	30,2
EO	9,0	0,6	5,2	27,2	38,1
EF	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
	incert.	comp.	8,5	71,5	100,0
	incert.	estesa	16,9		
	target		20,0		

Tabella 5 - Interasse 320 mm - finale

contributo	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var. %
L 126					
EM	6,3	0,6	3,6	13,2	34,6
ENDE	3,7	0,6	2,2	0,0	
$u_{\alpha}M$			0,8	0,6	
u_{TM}			1,6	2,5	
EETVE	1,6	0,3	0,5	0,2	
ET			5,4	29,2	43,6
EO	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
EF	10,0	0,6	5,8	33,6	50,3
	incert.	comp.	8,2	66,9	100,0
	incert.	estesa	16,4		
	target		6,0		

Tabella 6 - Lunghezza 126 mm - finale

contributo	limite μm	fattore	incert. μm	var. μm^2	var. %
DIA 52					
EM	5,5	0,6	3,2	10,3	37,5
ENDE	1,5	0,6	0,9	0,0	
$u_{\alpha}M$			0,3	0,1	
u_{TM}			0,7	0,4	
EETVE	0,7	0,3	0,2	0,0	
ET			0,8	0,6	2,1
EO	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
EF	7,0	0,6	4,1	16,5	60,4
	incert.	comp.	5,2	27,3	100,0
	incert.	estesa	10,5		
	target		10,0		

Tabella 7 - Diametro 52 mm - finale

In particolare, risaliremo un anello della catena di riferibilità, e controlleremo:

- L'effettiva prestazione della CMM per le misurazioni di lunghezza in conformità alla ISO 10360-2, nelle condizioni indicate, ed al netto dell'incertezza della prova;
- La possibilità di realizzare e misurare il parallelismo entro $8 \mu\text{m}$ dei due piani che definiscono la dimensione 126 mm, e la cilindricità dell'albero $\varnothing 52 \text{ mm}$ entro il nuovo limite di $3,5 \mu\text{m}$;
- La consistenza dell'ipotesi sui limiti dell'errore operatore $E_o = \pm 9 \mu\text{m}$ in sede di misurazione dell'interasse.

Come "sottoprodotto" delle iterazioni PUMA abbiamo anche ottenuto il grande vantaggio di poter accettare come "sufficientemente idonea" per le attività metrologiche esaminate una CMM con $MPE_E = (5+L/100) \mu\text{m}$. Ciò ci consente un eventuale risparmio sull'acquisto dello strumento, ovvero sulla sua messa a punto in sede di

manutenzione e verifica o, come minimo, di prolungare gli intervalli di verifica periodica.

Lasciamo la discussione di questi argomenti a successivi articoli.

BIBLIOGRAFIA

- UNI EN ISO 10360-2:1998 Metrologia a coordinate · Valutazione delle prestazioni delle macchine per misurazione a coordinate.
- UNI EN ISO 14253- 1:2001 Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Verifica mediante misurazione dei pezzi e delle apparecchiature per misurazioni · Regole decisionali per provare la conformità o non conformità rispetto alle specifiche.
- UNI ENV ISO 14253-2:2003 Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) . Verifica mediante misurazione dei pezzi lavorati e delle apparecchiature per misurazioni - Guida per la stima dell'incertezza nelle misurazioni GPS, nella taratura delle apparecchiature per misurazioni e nella verifica dei prodotti.
- ISO 8015:1985 Technical drawings - Fundamental tolerancing principle.
- ISO/TR 16015:2003 Geometrical product specifications (GPS) - Systematic errors and contributions to measurement uncertainty of length measurement due to thermal influences.