



XIII ADM - XV INGEGRAF
International Conference on



**TOOLS AND METHODS EVOLUTION IN
ENGINEERING DESIGN**



**L'EVOLUZIONE DEGLI STRUMENTI E DEI METODI
NELLA PROGETTAZIONE MECCANICA**

COSTRUZIONE DI RIFERIMENTI PIANI MEDIANTE CMM

I. Cristofolini⁽¹⁾, G. Podda⁽²⁾

⁽¹⁾Università di Trento
Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ing. Mecc. e Strutturale
e-mail: Ilaria.Cristofolini@ing.unitn.it

⁽²⁾Università di Cagliari
Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Meccanica
e-mail: podda@iris.unica.it



SOMMARIO

La normativa ASME Y14.5M 1994 non specifica le procedure di misura da adottare per il controllo a tolleranza di una parte meccanica. D'altro canto le macchine CMM producono delle misure di elementi di grandezza e non di grandezza con algoritmi propri, che non dichiarano ne' la procedura ne' i punti di misura che vengono utilizzati.

Nel presente lavoro sono stati definiti alcuni algoritmi per la misura del diametro, della tolleranza di perpendicolarita` e della tolleranza di localizzazione, in una parte meccanica rigida avente tre riferimenti piani.

La terna dei piani di riferimento e` stata costruita usando punti delle tre facce di riferimento, qualificate da tolleranze di planarita` e di perpendicolarita`. E` stato effettuato un confronto con una struttura di riferimento ottenuta da piani determinati con tre punti sul piano simulatore del primo riferimento, due punti su quello del secondo ed un punto su quello del terzo. Infine e` stato usato un algoritmo interno della macchina che ha fornito diametro e posizione del foro, utilizzando dei punti casuali presi sul foro, senza dichiararli, e costruendo la struttura di riferimento da tre punti sul primo piano o faccia di riferimento, due punti sul secondo ed un punto sul terzo.

Parole chiave: riferimenti, planarita`, perpendicolarita`, localizzazione

ABSTRACT

ASME Y14.5M 1994 does not specify the measurement procedures for checking the tolerances of a mechanical part. On the other hand, the CMM machines measure features (of size and not of size) without declaring which procedures they employ and which points they pick on the part.

In this paper we propose the necessary algorithms for determining the datum reference frame of a rigid mechanical part. We also give algorithms to determine the diameter, the perpendicularity tolerance and the position tolerance of a vertical hole passing through the part. The datum reference frame is built from points located on the first, the second and the third reference face of the part. We compare the results obtained using this procedure with those determined by picking three points on a datum simulator for the first reference plane, two points on a datum simulator for the second, and one point on a datum simulator for the third.

Furthermore we make a comparison with the results from a CMM internal algorithm which gives the diameter and the position of the hole using random points (without specifying them) on the hole and building the reference frame by picking three points on the first reference plane or face, two points on the second, and one point on the third.

Key words: datums, flatness, perpendicularity, position.



1. Introduzione

Le macchine di misura a coordinate (CMM) permettono il rilevamento di punti di una parte meccanica rigida con una incertezza di misura sempre piu' contenuta rispetto al passato. Nasce da qui la considerazione, pubblicizzata dai costruttori stessi delle CMM, che per individuare il piano di una faccia planare bastano tre punti, mentre se la faccia e' anche perpendicolare ad una faccia gia' determinata ne sono necessari solo due ed infine se la faccia e' perpendicolare a due facce gia' determinate si ha necessita' di un unico punto. Come estensione di questa metodologia si costruisce via software un allineamento del sistema di riferimento, derivato da tre facce piane della parte, con il sistema di riferimento intrinseco della macchina.

D'altra parte la normativa ASME Y14.5M [ASME 1994] mette in guardia contro questa procedura e raccomanda l'uso di piani di riscontro, su cui vadano ad appoggiarsi la faccia di primo riferimento con un contatto di tre punti, la faccia di secondo riferimento con un contatto di due punti e la faccia di terzo riferimento con un contatto di un punto. Le facce saranno qualificate rispettivamente da una tolleranza di planarita' la prima, da una tolleranza di perpendicolarita' la seconda (rispetto alla prima) ed ancora da una tolleranza di perpendicolarita' la terza (rispetto alla prima ed alla seconda).

Si fa esplicitamente notare che la costruzione del sistema di riferimento mediante punti rilevati sulle facce, se riconosciuta accettabile, e' la piu' economica poiche' richiede la misurazione di soli sei punti della parte. Nel presente lavoro si e' cercato di quantificare, nella procedura di costruzione dei piani di riferimento, quali siano gli errori conseguenti al rilevamento per punti delle facce planari, rispetto agli errori derivanti dall'appoggio delle facce su piani di riscontro, facendo uso sia di piani reali sia di piani virtuali derivati dai punti misurati. E' stata utilizzata per la misura una macchina CMM di un laboratorio industriale, in modo da simulare la comune procedura di rilevamento dei punti, e sono stati proposti ed impiegati algoritmi che costruiscono i soft-gages necessari per la determinazione dei Riferimenti in accordo con le specifiche proposte dalla normativa ASME.

Un progetto di questo tipo [REPORT EUR 15304 EN, 1993] era stato intrapreso da alcuni laboratori europei (PTB, BSL, VWI), ma non e' mai stato portato a compimento.

Il lavoro si propone di stabilire una metodologia per il rilevamento industriale dei riferimenti piani su una parte meccanica rigida funzionalmente riferita a tre facce piane. Essi determinano la giacitura e l'orientamento della parte e permettono il controllo funzionale degli altri elementi per stabilirne l'eventuale accettazione o rigetto.

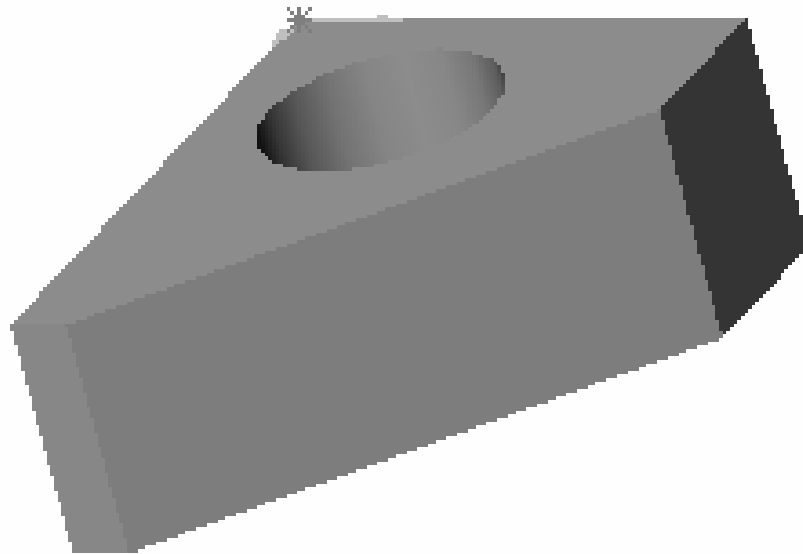


2. I riferimenti

Una parte meccanica rigida e` misurata, secondo la normativa ASME [ASME 1994], rispetto a tre piani di riferimento mutuamente ortogonali, che vengono ricavati da elementi della parte indicati a disegno. I riferimenti stabiliscono la giacitura, l'orientamento ed il riscontro della parte per la misura di tutti gli elementi della parte stessa. La parte viene misurata nella configurazione di funzionamento, poiche` solo in queste condizioni la misura ha una effettiva utilita` nella determinazione delle tolleranze. La quotatura che deriva dai riferimenti e` detta percio` quotatura funzionale.

Nel seguito vengono descritte le procedure per determinare i riferimenti piani da punti misurati su facce nominalmente ortogonali di una piastra in cui e` praticato un foro verticale passante (Fig. 1).

Figura 1. Piastra con foro verticale



2.1 Il primo riferimento

I punti presi sulla faccia primo riferimento vengono ordinati per terne. Per ogni terna di punti P1, P2, P3 della faccia vengono eseguite:

- una traslazione (di tutti i punti della piastra) che porta P1 nell'origine;
- una rotazione (di tutti i punti della piastra) attorno all'asse X, che porta P2 sul piano XY;
- una rotazione (di tutti i punti della piastra) attorno all'asse Z, che porta P2 sull'asse X;
- una rotazione (di tutti i punti della piastra) attorno all'asse X, che porta P3 sul piano XY.

In tal modo i tre punti della terna giacciono tutti sul piano XY, il punto P1 nell'origine, il punto P2 sull'asse X ed il punto P3 sul piano XY. Se l'insieme dei punti della faccia si trova dalla stessa parte rispetto al piano orizzontale XY, la massima distanza dei punti dell'insieme da tale piano e` la tolleranza di planarita` per il contatto dei tre punti della terna sul piano XY.

Si selezionano quindi le terne di punti che hanno questa proprieta` e tra esse si sceglie la terna per cui la distanza dell'insieme dei punti della faccia dal piano XY e` minima.

La faccia poggia pertanto sul piano XY con questi tre punti e la distanza trovata e` la tolleranza di planarita` della faccia.



2.2 Il secondo riferimento

I punti presi sulla faccia secondo riferimento vengono ordinati per coppie. Per ogni coppia di punti P1, P2 della faccia vengono eseguite:

- una traslazione (di tutti i punti della piastra) che porta P1 nell'origine;
- una rotazione (di tutti i punti della piastra) attorno all'asse Z, che porta P2 sul piano XZ.

In tal modo i due punti della coppia giacciono entrambi sul piano XZ, il punto P1 nell'origine ed il punto P2 sul piano XZ. Se l'insieme dei punti della faccia si trova dalla stessa parte rispetto al piano verticale XZ, la massima distanza dei punti dell'insieme da tale piano è la tolleranza di perpendicolarità per il contatto dei due punti della coppia sul piano XZ.

Si selezionano quindi le coppie di punti che hanno questa proprietà e tra esse si sceglie la coppia per cui la distanza dell'insieme dei punti della faccia dal piano XZ è minima. La faccia poggia pertanto sul piano XZ con questi due punti e la distanza trovata è la tolleranza di perpendicolarità della faccia.

2.3 Il terzo riferimento

Per ogni punto P preso sulla faccia terzo riferimento viene eseguita una traslazione (di tutti i punti della piastra) che porta P sul piano YZ.

Se l'insieme dei punti della faccia si trova dalla stessa parte rispetto al piano verticale YZ, la massima distanza dei punti dell'insieme da tale piano è la tolleranza di perpendicolarità per il contatto del punto sul piano YZ.

Si selezionano quindi i punti che hanno questa proprietà e tra essi si sceglie il punto per cui la distanza dell'insieme dei punti della faccia dal piano YZ è minima.

La faccia poggia pertanto sul piano YZ con questo punto e la distanza trovata è la tolleranza di perpendicolarità della faccia.



3. La misura degli elementi del pezzo

Tutti gli elementi della parte possono ora essere misurati rispetto ai piani di riferimento costruiti partendo dalle tre facce scelte. In particolare i punti del foro verticale possono essere trattati con l'algoritmo esposto in [Cristofolini, Podda 2001] per la determinazione del diametro e dell'asse, che risulta essere un segmento verticale ruotato di un angolo rispetto all'asse X e di un angolo rispetto all'asse Y.

La tolleranza di perpendicolarità del foro è uguale al diametro del cilindro verticale che racchiude tale asse. L'asse è naturalmente limitato alla reale estensione del foro. La tolleranza di localizzazione è uguale al diametro del cilindro verticale che, posto in posizione esatta, racchiude l'asse del foro.

È possibile misurare direttamente la Condizione Virtuale Reale di perpendicolarità del foro, che si ottiene costruendo il massimo cilindro verticale contenuto entro il foro. L'asse di tale cilindro, sia K , è anche l'asse del cilindro tolleranza di perpendicolarità.

Come mostrato nella Fig. 2, sia l la distanza di tale asse K dalla posizione esatta C del foro. Nota la tolleranza t_p di perpendicolarità, la tolleranza di localizzazione t_l vale:

$$t_l = 2 (l + t_p/2) = 2l + t_p.$$

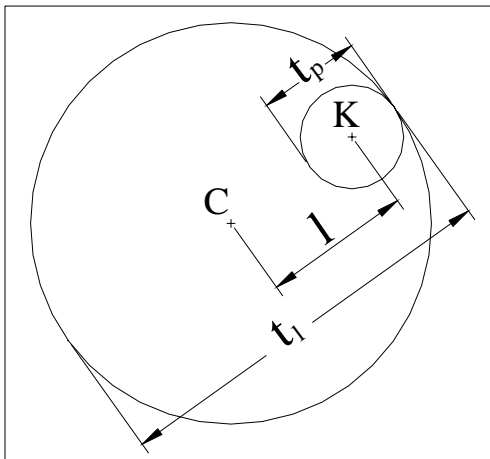


Figura 2. Toll. di perpendicolarità e tolleranza di localizzazione

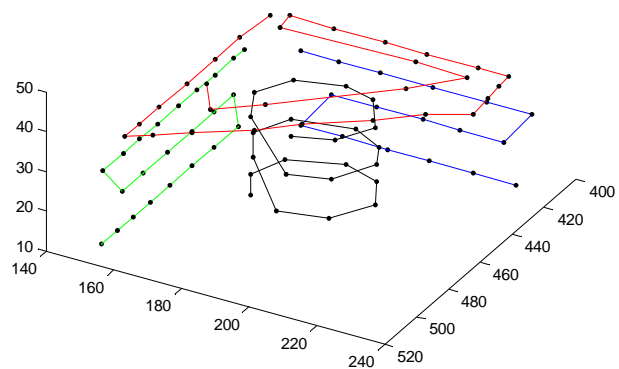


Figura 3. Punti rilevati sulla piastra



4. Esempio di applicazione

Nella piastra indicata in Fig. 1 sono stati misurati 29 punti sulla faccia superiore primo riferimento, 23 sulla faccia laterale sinistra secondo riferimento e 17 sulla faccia posteriore terzo riferimento. Sono stati inoltre misurati sul foro 8 punti su 3 profondità, per un totale di 24 punti. I punti sono mostrati nella Fig.3 e la piastra e' rappresentata nella Fig. 4 con dimensioni e tolleranze.

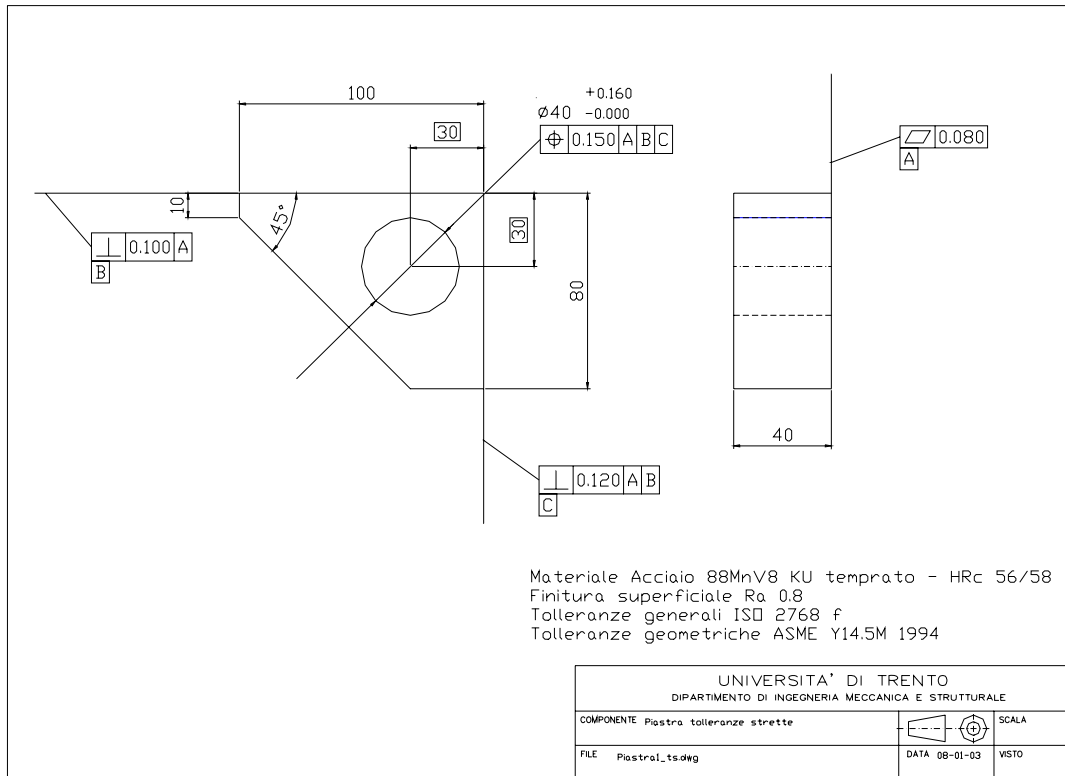


Figura 4. Piastra con dimensioni e tolleranze
 Sono state utilizzate quattro diverse procedure.

La prima procedura determina il diametro e la tolleranza di perpendicolarita' del foro, costruendo i riferimenti come indicato in 1.1, 1.2 ed 1.3, ed usando l'algoritmo in [Cristofolini, Podda 2001].



Viene quindi calcolata la Condizione Virtuale Reale di perpendicolarita` del foro e la tolleranza di localizzazione. La Fig. 5 mostra la Condizione Virtuale Reale di perpendicolarita` del foro, mentre nella Fig. 6 e` rappresentata la tolleranza di localizzazione insieme alla tolleranza di perpendicolarita`, in prima approssimazione (cerchi piu' grandi) ed in seconda approssimazione (cerchi piu' piccoli).

La posizione dei punti del foro in Fig. 5 e` influenzata dal raggio del tastatore di misura ($r = 1.8$ mm), che in Fig. 6 e` stato sottratto.

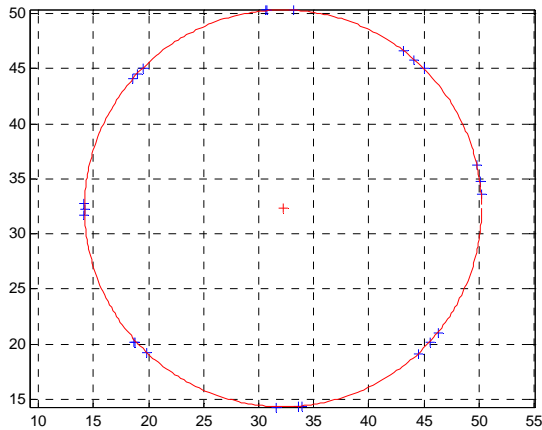


Fig.5

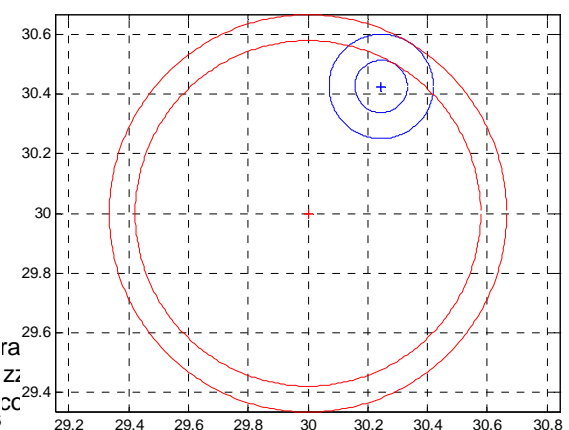


Fig.6

La seconda procedura fa misurare alla macchina CMM tre punti sul piano simulatore del primo riferimento, due punti sul piano (ortogonale al primo) simulatore del secondo riferimento ed un punto sul piano (ortogonale ai primi due) simulatore del terzo riferimento. Non e` percio` possibile determinare alcuna qualificazione dei riferimenti, ma il foro risulta orientato secondo i riferimenti costruiti dai piani simulatori a cui si appoggiano le facce. Il calcolo viene eseguito come nel caso precedente.

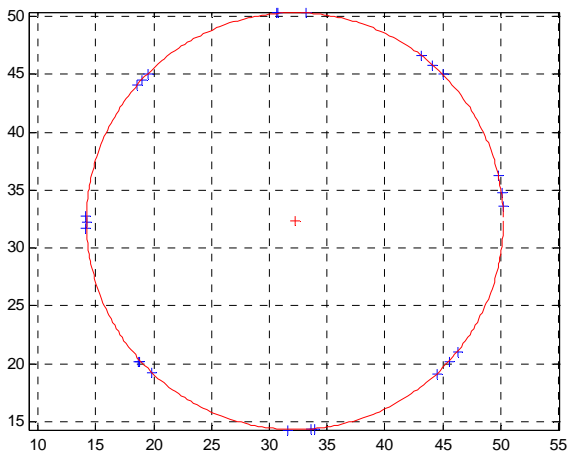


Fig.7

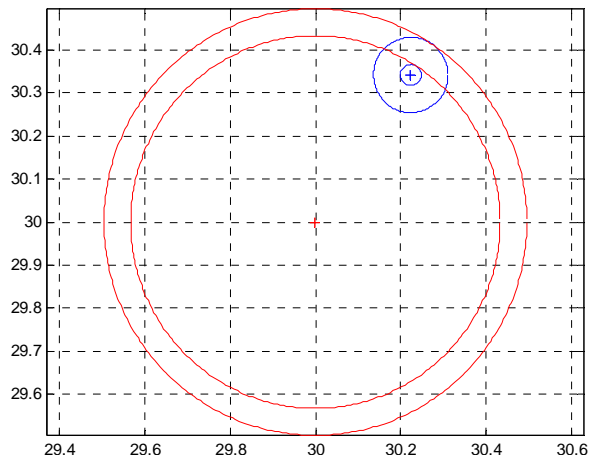


Fig.8

La Fig. 7 mostra la Condizione Virtuale reale di perpendicolarita` del foro, mentre nella Fig. 8 e` rappresentata la tolleranza di localizzazione insieme alla tolleranza di perpendicolarita`, in prima approssimazione (cerchi piu' grandi) ed in seconda approssimazione (cerchi piu' piccoli).).

La posizione dei punti del foro nella Fig. 7 e` influenzata dal tastatore di misura (di raggio 1.8 mm), che nella Fig. 8 e` stato sottratto.

La terza procedura fa misurare alla macchina CMM i punti sui piani simulatori dei riferimenti (come nel caso precedente) e 24 punti casuali del foro, che non vengono dichiarati. Le tolleranze sono riportate nella Fig. 9.



Infine la quarta procedura riferisce il foro, sempre determinato con 24 punti casuali non dichiarati, ad una struttura di riferimento determinata da 3 punti presi sulla faccia primo riferimento, 2 sulla faccia secondo riferimento ed 1 sulla faccia terzo riferimento. Le tolleranze sono riportate nella Fig. 10.

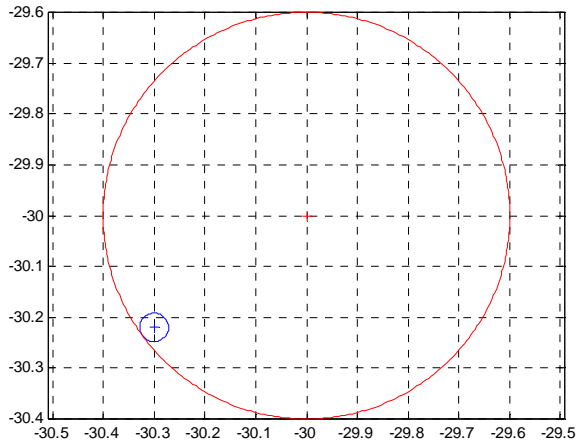


Fig.9

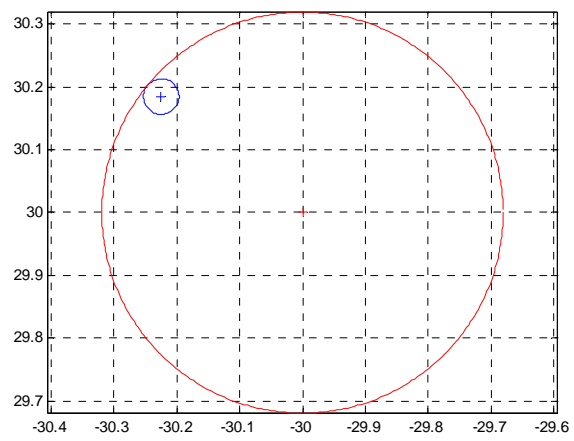


Fig.10

I risultati completi sono riportati nella Tabella 1. In alcuni casi il risultato non è stato riportato o per una impossibilità geometrica (ad esempio, nella qualificazione dei riferimenti presi con 3 punti, 2 punti ed 1 punto; la macchina comunque non li mostra), o per la non disponibilità dei dati stessi (ad esempio, nella determinazione casuale dei punti sul foro, di cui la macchina non mostra i punti scelti). Le misure sono in mm.

Tabella 1. Risultati

	Procedura 1	Procedura 2	Procedura 3	Procedura 4
Tolleranza di planarità	0.012340	Non determinabile	Non determinabile	Non determinabile
Toll. di perpend. rispetto al Rif 1	0.034632	Non determinabile	Non determinabile	Non determinabile
Toll. di perpend. rispetto al Rif 2	0.092658	Non determinabile	Non determinabile	Non determinabile
Raggio Cond. Virt. di perpend. del foro	19.864340	19.991644	Non determinabile Punti foro non disp	Non determinabile Punti foro non disp
Raggio foro 1a	19.864425	19.947796	20.010000	20.005000
Raggio Foro 2a	19.864851	19.995747		
Toll. perp. foro 1a	0.349065	0.174533	0.056569	0.056569
Toll. perp. foro 2a	0.175403	0.049365		
Toll. local. foro 1a	1.329362	0.990164	0.800472	0.638642
Toll. local. foro 2a	1.155700	0.864997		

Le tolleranze di qualificazione dei riferimenti, determinabili solo con la prima procedura di calcolo, sono risultate molto contenute rispetto a quelle specificate nel disegno.

La tolleranza di localizzazione del foro è risultata 8 volte più ampia di quella richiesta usando la prima procedura, 6 volte usando la seconda e la terza, e 4 volte usando la quarta. La tolleranza di perpendicolarità è sempre molto piccola, anche se non trascurabile come talvolta si usa fare.

Le tolleranze determinate secondo la prima procedura sono tutte più ampie di quelle ottenute con la seconda, con differenze dal 50% al 150%.

Le tolleranze determinate con la terza e la quarta procedura vengono costruite dalla macchina con propri algoritmi interni, che non solo non dichiarano il procedimento di calcolo, ma neppure evidenziano i punti utilizzati. Esse sono confrontabili tra loro (le tolleranze di perpendicolarità risultano persino identiche fino alla sesta cifra decimale) e risultano decisamente più piccole di quelle ottenute con le prime due procedure. Solo una sperimentazione più estesa può confermare se i valori ottenuti con queste procedure sono corretti oppure decisamente ottimistici.

Il software per le prime due procedure può essere richiesto direttamente agli autori.



Conclusioni

La procedura di costruzione dei riferimenti dedotti dai punti delle facce è un soft-gage che può sostituire la creazione dei simulatori dei piani di riferimento per l'appoggio ed il contatto delle facce di riferimento. Naturalmente le possibili configurazioni di appoggio e di contatto sono limitate dal numero di punti presi sulle facce.

La costruzione dei riferimenti eseguita tarando la macchina su tre punti presi nel piano che simula il primo riferimento, due punti nel piano che simula il secondo riferimento ed un punto nel piano che simula il terzo riferimento è la procedura in completo accordo con le norme ASME.

La stima eseguita a macchina prendendo, sul piano simulatore o sulla faccia, tre punti per il primo riferimento, due per il secondo ed uno per il terzo, e dei punti casuali non dichiarati sul foro, non consente alcuna verifica del risultato e nel caso in esame ha fornito i valori di tolleranza più stretti.

Bibliografia

ASME Y14.5M-1994 *Dimensioning and Tolerancing*, The American Society of Mech. Engineers, New York, NY, 1994.

REPORT EUR 15304 EN, *Chebicheff Reference Software for the Evaluation of Coordinate Measuring Machine Data*, Commission of the European Communities, Brussels-Luxembourg, 1993.

Cristofolini I, Podda G., *Diameter and Center Line of a 1st Reference Cylindrical Feature of Size with a Straightness Tolerance*, Atti del XII Convegno Nazionale ADM, Rimini, Italia, 2001, pp. 563-577.