

Problematiche di misura di diametri interni ed esterni nell'industria meccanica

Gianfranco Malagola, Aldo Ponterio

1.0 Introduzione

Nell'ambito della metrologia dimensionale si sta assistendo ad una vera e propria rivoluzione dovuta all'introduzione del Sistema GPS (Geometrical Product Specification), un sistema di norme ben strutturato e coordinato che per ciascuna caratteristica geometrica di prodotto, sulla quale sono specificati dei requisiti, fornisce indicazioni dettagliate circa la definizione della caratteristica stessa, il metodo di misura e le caratteristiche degli strumenti e dei campioni da utilizzare nel processo di misurazione.

Il sistema GPS ha un grande impatto sulle prescrizioni nei disegni riguardanti la geometria dei prodotti industriali, sui principi e sui metodi di verifica; tutto ciò per definire e tenere sotto controllo le variabilità, ridurre i costi della non qualità dovuti a specifiche e disegni incompleti e perseguire il miglioramento continuo della qualità dei prodotti.

L'elemento comune a tutte le nuove norme è la matrice GPS ovvero una tabella dove nelle righe sono disposte le differenti caratteristiche geometriche di un prodotto e nelle colonne (anelli della catena) viene presentata la sequenza naturale con la quale si attua il processo di produzione di un manufatto.

Applicando, per esempio, questa metodologia ad un pezzo cilindrico si possono definire tutte le specifiche geometriche attraverso la matrice di norme GPS.

Le specifiche geometriche dei prodotti definiscono quelle caratteristiche della geometria, delle dimensioni e delle superfici di un componente che garantiscono il suo funzionamento ottimale. Per capire il fondamento della matrice GPS bisogna considerare che nel processo di produzione e collaudo di un componente si possono individuare 4 elementi geometrici associati allo stesso componente come descritto nella figura 1.

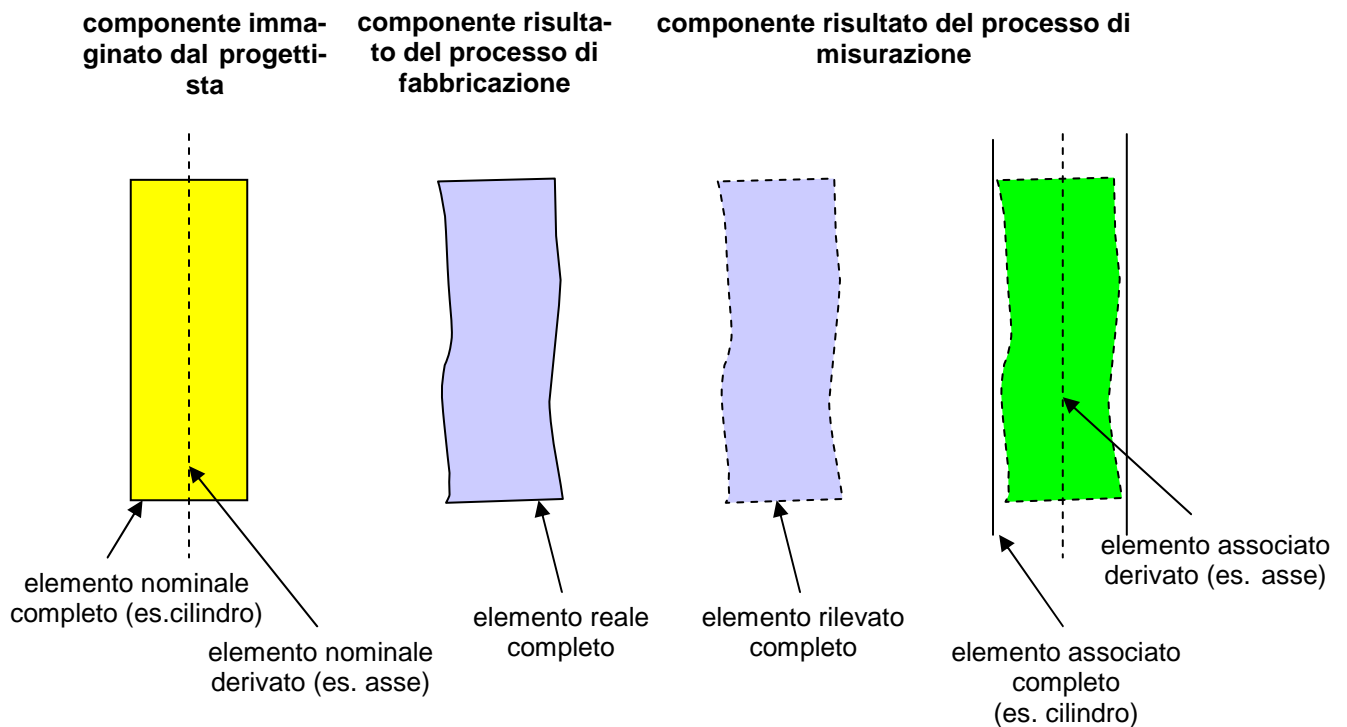


Figura 1 : elementi associati ad un componente

Nel presente articolo si prende in analisi la prima caratteristica geometrica della matrice GPS ovvero la dimensione (distanza fra due punti appartenenti ad un unico elemento) che, nel caso di elemento cilindrico, è rappresentata dal suo diametro.

Per diametro si intende, in accordo alla norma ISO 14660-2:1999, la distanza fra due punti opposti della superficie cilindrica (su una sezione trasversale) dove la sezione trasversale è perpendicolare all'asse del cilindro associato alla superficie e la linea congiungente i due punti opposti include il centro del cerchio associato.

Su un elemento cilindrico, come su altri elementi, possono essere definite delle tolleranze dimensionali (lineari e angolari) e geometriche (forma, orientamento e posizione).

In ambito europeo le tolleranze dimensionali e le tolleranze geometriche, che devono comunque essere prescritte esplicitamente o implicitamente invocando le tolleranze geometriche generali, vanno sempre verificate **in modo indipendente** salvo sia specificata l'esigenza di involuppo (simbolo \textcircled{E}) o l'applicazione del principio di massimo materiale (simbolo \textcircled{M}).

Le tolleranze lineari limitano infatti unicamente le dimensioni locali reali (misurate fra due punti) di un elemento ma non gli scostamenti di forma; le tolleranze geometriche invece, limitano lo scostamento di un elemento rispetto alla sua forma perfetta (oppure orientamento e posizione) senza tenere conto delle dimensioni dell'elemento.

La conformità della caratteristica geometrica "diametro" ad una tolleranza lineare implica che il valore del diametro sia compreso nella "zona di tolleranza" ovvero nell'intervallo di valori compreso fra i limiti di tolleranza [ISO 3534-2: 1993, 1.4.5] dove per "limiti di tolleranza" si intendono i valori specifici della caratteristica che definiscono i limiti inferiore e superiore del valore ammesso. [ISO 3534-2: 1993, 1.4.3]

La stima del diametro tuttavia, qualunque sia il metodo utilizzato risente ovviamente dell'errore di circolarità del pezzo ovvero del fatto che l'elemento geometrico reale non corrisponde all'elemento geometrico nominale (cilindro perfetto) e quindi la misura del diametro varia nelle diverse posizioni angolari poiché la sezione di cui si vuol misurare il diametro presenta uno "**scostamento di circolarità**".

Lo scostamento di circolarità è sempre indicato dalla differenza fra il raggio del cerchio che contiene all'interno tutti i punti della sezione ed il raggio del cerchio, concentrico al primo, per il quale tutti i punti della sezione giacciono all'esterno (fig. 2).

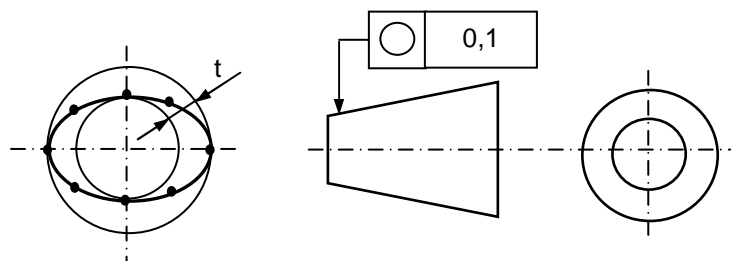


Figura 2 : scostamento di circolarità

In presenza quindi di prescrizioni circa l'errore di circolarità occorre valutare tale errore con un metodo opportuno che, in alcuni casi, può consistere in una misura dimensionale (diametro) ripetuta in diverse posizioni angolari.

Quand'anche le tolleranze geometriche non siano prescritte, l'esistenza di un errore di circolarità non può essere trascurato nella valutazione del diametro a meno che la procedura

di collaudo del pezzo definisca il misurando in modo talmente accurato da non fare intervenire il suo errore di forma nell'incertezza intrinseca del misurando stesso.

Esistono ovviamente diversi strumenti e diverse metodologie per verificare i requisiti imposti sulla caratteristica geometrica del diametro, ognuno dei quali presenta particolari punti di forza e differenti problematiche nella misurazione; tuttavia si può fare una prima classificazione distinguendo due tipologie di misura dei diametri:

1. misure del diametro come segmento fisico;
2. misura del diametro come parametro associato ad un cerchio.

Per queste due tipologie di misura analizziamo nel seguito l'impiego di differenti strumenti di misura evidenziandone le problematiche più strettamente legate al processo di misurazione del diametro piuttosto che alle specifiche dello strumento utilizzato; si porrà quindi l'attenzione su quegli errori strettamente legati alla misura del diametro piuttosto che agli errori presenti in qualunque processo di misurazione con lo strumento considerato (per esempio errore di risoluzione, non linearità della scala, ecc...).

Ricordando che l'errore commesso dallo strumento è soltanto una parte degli errori che intervengono in un processo di misurazione [1], sicuramente la sua specifica di errore massimo ammesso (MPE) deve essere confrontata con i limiti di tolleranza richiesti sul diametro tenendo conto che, in accordo alla norma UNI EN ISO 14253-1, i limiti di tolleranza devono essere ridotti di una quantità pari all'incertezza estesa del processo di misurazione se si vuole dimostrare la sicura conformità di tale caratteristica geometrica alle specifiche dichiarate.

2.0 Misura del diametro come segmento fisico

La misura dei diametri interni ed esterni, intesa come distanza tra due punti (segmento fisico), può essere realizzata con differenti strumenti. Nel seguito si analizzerà, per i principali strumenti utilizzabili, le problematiche tipiche nella misura del diametro.

Strumento	Principali problematiche di misura
calibro a corsoio [2]	<ul style="list-style-type: none"> - presenza dell'errore di Abbe ovvero quell'errore generato dal disallineamento dell'asse di misura con l'asse del misurando; tale errore è inevitabile nella misura di diametri a causa del fatto che la distanza dell'asse del misurando dall'asse di misura non può essere inferiore al raggio - problemi di allineamento dei becchi per interni rispetto all'asse del foro; - problemi derivanti da un errato allineamento dei punti di contatto rispetto al diametro (misura della corda e non del diametro); - in presenza di pezzi con lobature si ha una particolare dipendenza del valore del diametro dalla posizione dell'asse di misura (vedi par 4.0).
micrometro a due punti [3]	<ul style="list-style-type: none"> - nella misura di diametri interni occorre prestare attenzione all'allineamento assiale e diametrale; - nella misura di diametri interni di grandi dimensioni occorre tenere in conto la flessione del micrometro e quindi i suoi punti di sospensione; - in relazione alla piccola superficie di contatto tra strumento e pezzo è necessario valutare le deformazioni (formula di Hertz);

	- in presenza di pezzi con lobature si ha una particolare dipendenza del valore del diametro dalla posizione dell'asse di misura (vedi par 4.0).
micrometri a tre punte [4]	- necessita di un campione di azzeramento - in presenza di pezzi con lobature si ha una particolare dipendenza del valore del diametro dalla posizione dell'asse di misura (vedi par 4.0).
rotondimetro	- necessita di un campione di azzeramento - è limitato a quei rotondimetri in cui il movimento orizzontale di misura è dotato di scala di lettura;
micrometri a scansione laser	- i pezzi da misurare devono avere un buon livello di finitura e devono essere accuratamente puliti; - occorre garantire la perpendicolarità tra l'asse del pezzo ed il piano di scansione del raggio laser.
Altimetri e macchine monoassiali	- problemi di allineamento - derive termiche nelle misure assolute

3.0 Misura del diametro come parametro associato ad un cerchio

Nella metrologia a coordinate per individuare un cerchio, e quindi il suo diametro, occorre rilevare le coordinate di almeno tre punti ad esso appartenenti; dalle coordinate dei tre punti è possibile determinare l'equazione del cerchio passante per essi e quindi il suo diametro. In questo caso però si può individuare solo il diametro e non si può determinarne l'errore di circolarità.

Per calcolare lo scostamento di circolarità, nella metrologia a coordinate, si devono quindi rilevare un numero di punti, tutti giacenti sul piano del cerchio, sensibilmente superiore al minimo numero di punti necessario per individuare l'elemento geometrico (nel caso del cerchio 3).

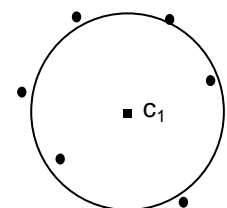
Sulla base dei dati acquisiti, il software di misura individua il *cerchio di riferimento* con un metodo di interpolazione dei punti rilevati (si possono selezionare diversi metodi), ed in funzione di questo individua un cerchio inscritto, che lascia tutti i punti all'esterno, ed un cerchio circoscritto che lascia tutti i punti all'interno.

Queste due circonferenze sono sempre concentriche ed hanno come centro quello del cerchio di riferimento ma il loro raggio varia in funzione della scelta del cerchio di riferimento e quindi del suo centro; di conseguenza anche lo scostamento di circolarità che è dato dalla differenza dei raggi di questi due cerchi varierà in funzione del cerchio di riferimento.

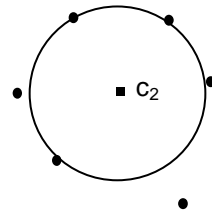
Tale centro, calcolato sulla base delle coordinate dei punti rilevati può essere determinato con uno dei seguenti metodi:

➤ *Metodo dei minimi quadrati (metodo di Gauss).*

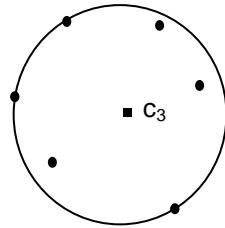
Il centro di riferimento viene calcolato come quel punto per il quale risulta minima la somma dei quadrati delle differenze fra la distanza dal centro di ogni punto ed il raggio da determinare (il risultato di tale metodo comprende l'individuazione del centro e la determinazione del raggio).



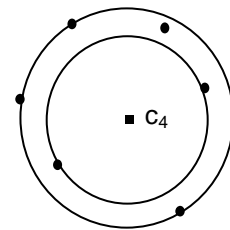
- *Metodo del massimo cerchio inscritto (MIC).*
Il centro di riferimento viene individuato come il centro del cerchio con il massimo raggio fra tutti i possibili cerchi per i quali risultano esterni tutti i punti rilevati.



- *Metodo del minimo cerchio circoscritto (MCC).*
Il centro di riferimento viene individuato come il centro del cerchio con il minimo raggio fra tutti i possibili cerchi che contengono tutti i punti rilevati.



- *Metodo della zona minima (MZC).*
Il centro di riferimento viene individuato come quel centro per il quale risulta minima la differenza fra i raggi del cerchio che contiene tutti i punti rilevati ed il cerchio che lascia tali punti all'esterno.



I centri dei cerchi di riferimento (C_1 , C_2 , C_3 , C_4) non coincidono, pur partendo dagli stessi punti rilevati sulla sezione, e quindi non coincidono neanche le stime degli errori di circolarità associate ad ogni cerchio di riferimento.

4.0 Stima dell'errore di circolarità tramite misure del diametro come segmento fisico

Particolare importanza riveste l'errore di circolarità quando la deviazione dalla condizione di perfetta circolarità (ovvero la variazione della distanza radiale) assume un andamento regolare e periodico nell'ambito di una variazione angolare di un angolo giro (lobature).

E' noto che la causa principale di questo tipo di errori geometrici è costituita prevalentemente dalle sollecitazioni indesiderate dei sistemi di serraggio del pezzo durante la lavorazione e da oscillazioni indesiderate dell'asse del mandrino di lavorazione. E' in ogni caso difficile evitare un profilo a lobi in molte lavorazioni meccaniche; un cilindro per esempio, fissato saldamente con una morsa a tre o cinque ganasce, viene compresso nei punti di contatto generando così una deformazione elastica del materiale. Dopo la lavorazione, quando il pezzo viene rimosso dal sistema di serraggio, il metallo sollecitato si rilascia provocando la comparsa dei lobi.

E' stato sviluppato un programma di calcolo che simula la misura del diametro nelle diverse tipologie di misura, su pezzi aventi diverse lobature, al fine di analizzare sia l'effetto dell'errore di circolarità sulla misura del diametro sia la possibilità di una valutazione corretta del valore dell'errore di circolarità.

Dalle elaborazioni effettuate si è potuto osservare che nel caso in cui si esegua una misura del diametro come distanza fra due punti opposti della superficie cilindrica su una sezione perpendicolare all'asse individuato, si ha una variazione della misura dimensionale in presenza di errore di circolarità solo per determinate geometrie.

In particolare, per tutti gli strumenti che realizzano una misura del diametro con due punti di contatto, nel caso di un pezzo a 2 lobi (sezione ovale) o un pezzo a 4 lobi, o comunque con un numero pari di lobi, si nota che, eseguendo la misura del diametro in diverse posizioni angolari, si ha una variazione sul risultato della misura (trascurando tutti i contributi di incertezza ad eccezione dell'errore di circolarità) pari a 2 volte lo scostamento di circolarità. Le figure 3 e 4 illustrano l'andamento del valore del diametro su un pezzo rispettivamente a 2 e 4 lobi avente un errore di circolarità di 0,001 mm e diametro nominale di 2 mm. Quindi l'errore di circolarità **può essere evidenziato** da una opportuna sequenza di misure dimensionali del diametro con il metodo a due punti di contatto.

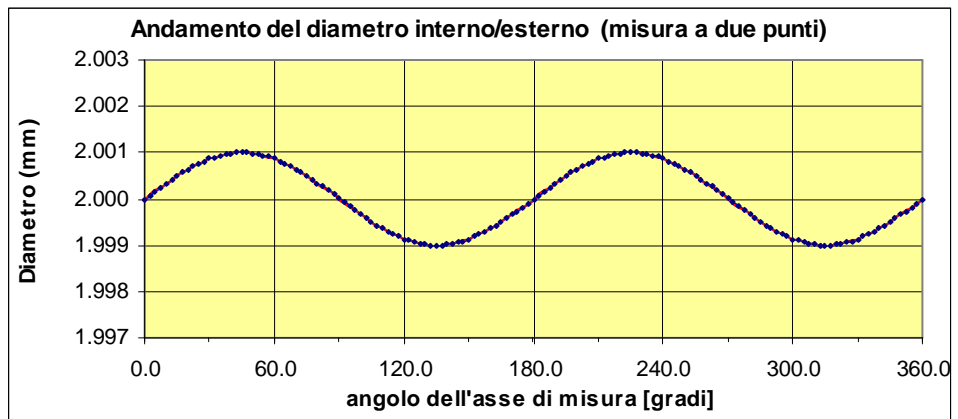


Figura 3 : andamento del diametro interno/esterno con pezzo a 2 lobi

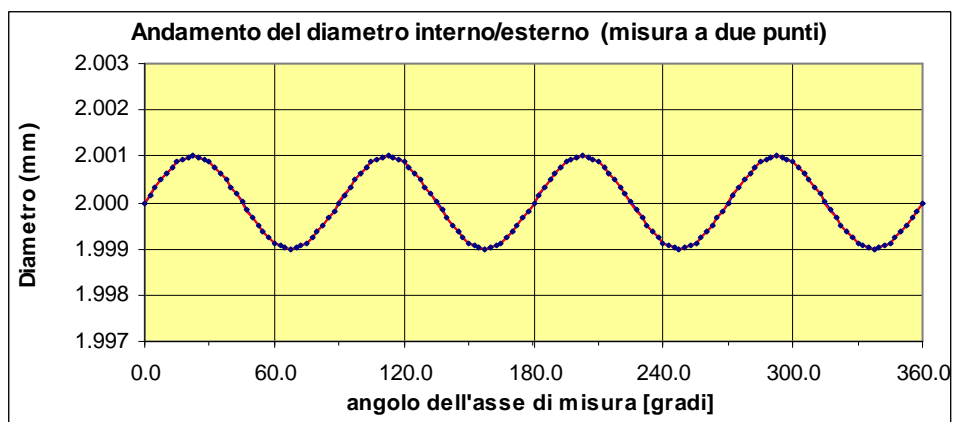


Figura 4 : andamento del diametro interno/esterno con pezzo a 4 lobi

Viceversa è possibile notare che in presenza di un pezzo trilobato o pentalobato, o comunque con un numero dispari di lobi al variare della posizione angolare dell'asse di misura si ha una variazione trascurabile sul risultato della misurazione del diametro (vedi figura 5 e 6 rispettivamente per 3 e 5 lobi con le stesse condizioni delle figure precedenti). Quindi l'errore di circolarità **non può essere evidenziato** da misure dimensionali del diametro con il metodo a due punti di contatto;

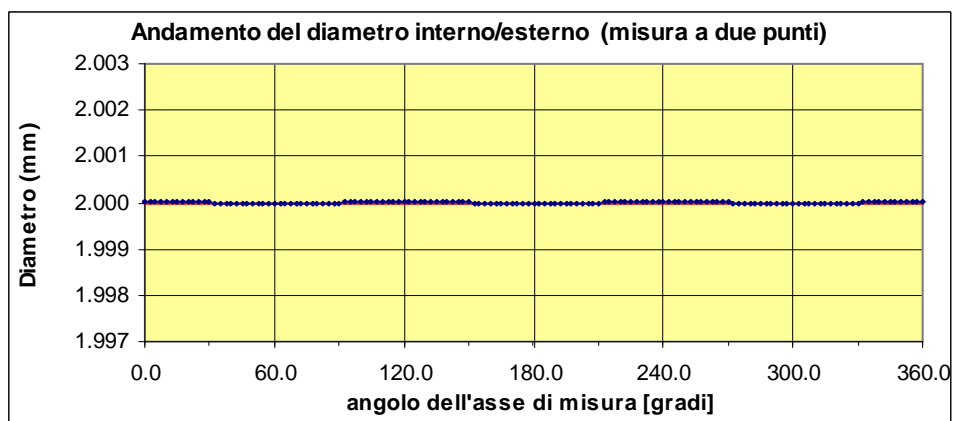


Figura 5 : andamento del diametro interno/esterno con pezzo a 3 lobi

occorre effettuare le misure con opportuni strumenti per determinare l'errore di circolarità.

Da ciò si può concludere che con una misura a due punti (per esempio, misure di diametri interni con un alesometro o con un micrometro per interni a due punte oppure di misure di diametri esterni con macchine di misura unidimensionali o micrometri per esterni) non si riesce ad apprezzare l'errore di circolarità nel caso di pezzi che presentano un numero dispari di lobi (pezzi trilobati o pentalobati) anche eseguendo misure in diverse posizioni angolari, mentre si riesce a stimare l'errore di rotondità nel caso di pezzi che presentano un numero di lobi pari.

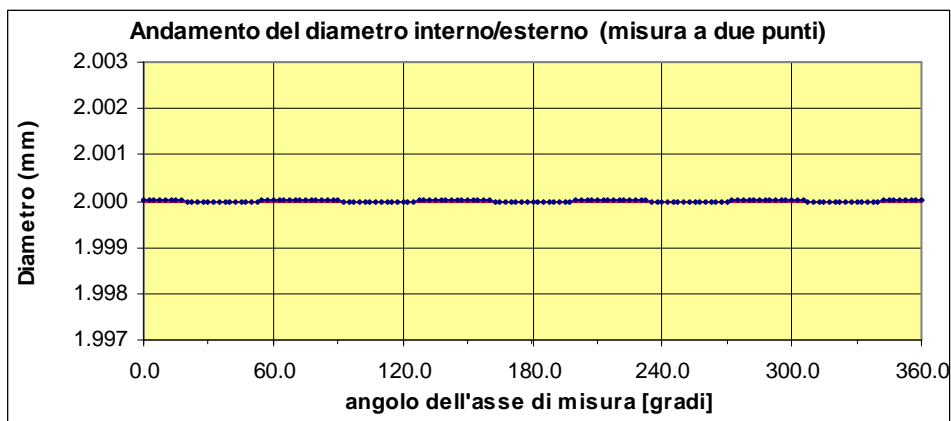


Figura 6 : andamento del diametro interno/esterno con pezzo a 5 lobi

Nel caso di misure di diametri a tre punti (tipico esempio è quello del micrometro per interni a tre punte) si ha un fenomeno quasi opposto. Eseguendo infatti misure ripetute con gli assi dei tre tastatori disposti a 120 ° l'uno dall'altro ma con l'asse del primo tastatore in diverse posizioni angolari, si evidenzia la variazione del valore del diametro solo nel caso di pezzi che presentano 3 lobi (figura 7), mentre non si apprezza alcuna variazione nel caso di pezzi che presentano 2 lobi (figura 8), 4 lobi (figura 9) e 5 lobi (figura 10).

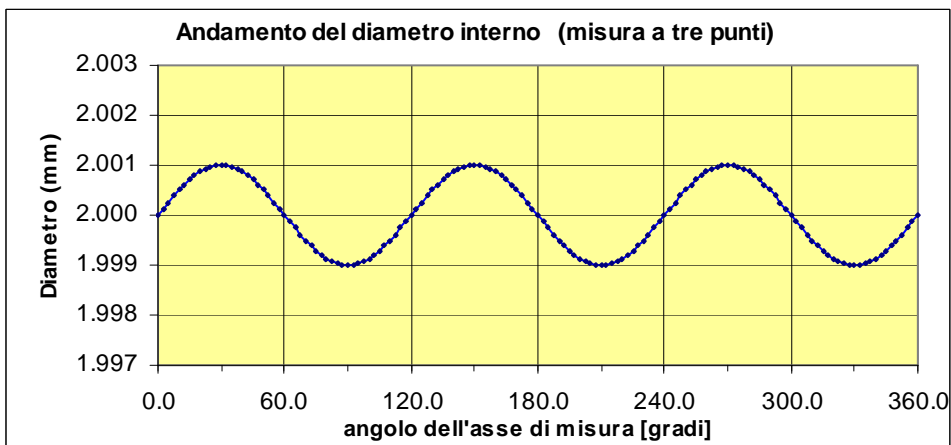


Figura 7 : andamento del diametro interno con pezzo a 3 lobi

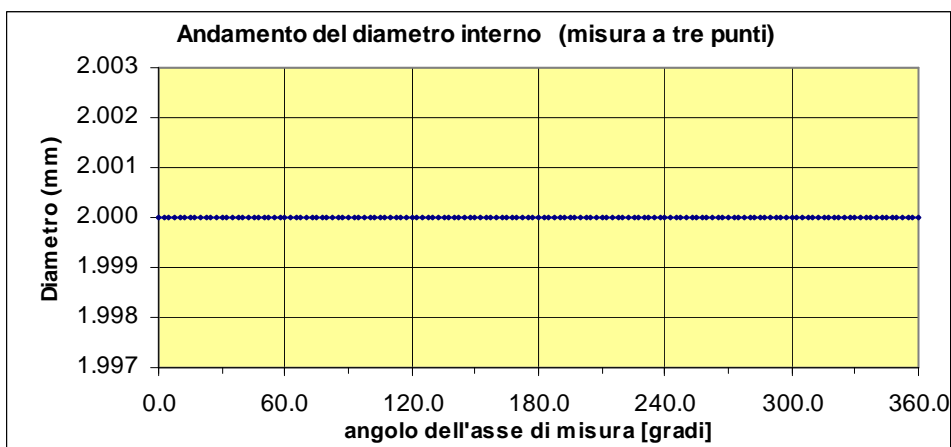


Figura 8 : andamento del diametro interno con pezzo a 2 lobi

Di conseguenza, in un pezzo pentalobato, è **impossibile apprezzare l'errore di circolarità** misurando il diametro del pezzo in diverse posizioni angolari, sia con una misura a due punti che con una misura a tre punti.

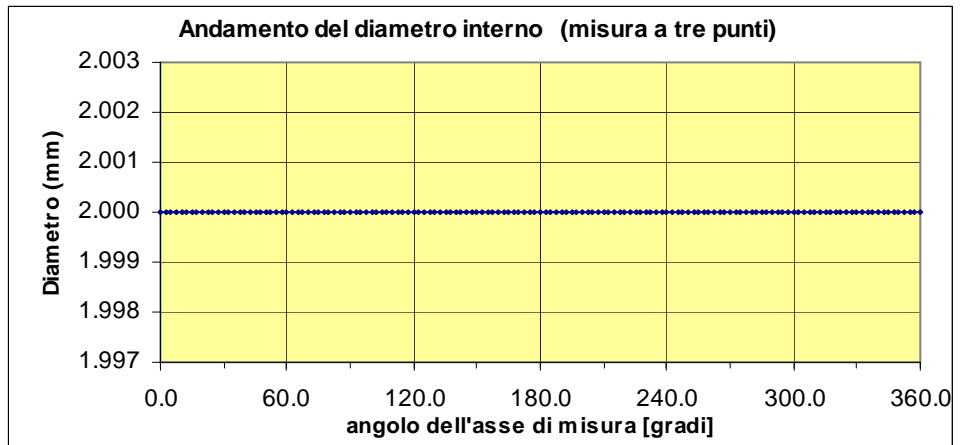


Figura 9 : andamento del diametro interno con pezzo a 4 lobi

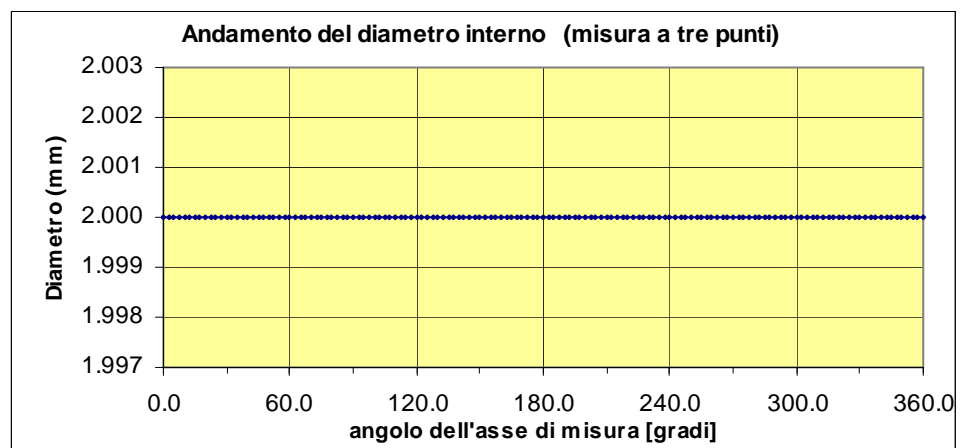


Figura 10 : andamento del diametro interno con pezzo a 5 lobi

5.0 Stima dell'errore di circolarità tramite misure a coordinate

Nella metrologia a coordinate occorre ricordare che la scansione dei punti su una sezione circolare consente, in linea di principio, sia la determinazione del diametro (diametro dell'elemento che meglio approssima i punti rilevati; normalmente il diametro del cerchio dei minimi quadrati) sia la determinazione dell'errore di circolarità.

Per la valutazione del diametro bastano ovviamente tre punti (minimo numero di punti necessario per individuare l'elemento geometrico: gradi di libertà di un cerchio su un piano) mentre per la valutazione dell'errore di circolarità sono necessari almeno quattro punti (un punto in più del numero dei gradi di libertà dell'elemento geometrico).

Nella metrologia a coordinate la valutazione dell'errore di circolarità è però funzione del numero di punti rilevati sulla sezione. In linea di principio si può affermare che tanto più numerosi sono i punti rilevati tanto più accurata è la valutazione dell'errore di circolarità (caso ideale: scansione continua ovvero numero di punti infinito). C'è inoltre da aggiungere che nella pratica comune di misurazione si rilevano i punti distribuiti in maniera uniforme sul profilo della sezione ovvero equispaziati l'uno dall'altro secondo la posizione angolare.

Anche nella metrologia a coordinate però, occorre prestare molta attenzione nella misurazione di pezzi che presentano lobature, ovvero errori di circolarità dovuti a variazioni della

distanza radiale con un andamento regolare e periodico nell'ambito di una variazione angolare di un angolo giro.

Per quanto riguarda la misura del diametro con il metodo a coordinate, si può osservare che, solo se il numero di lobi coincide con il numero di punti rilevati sulla sezione, (3 lobi, 3 punti; 4 lobi, 4 punti; 5 lobi, 5 punti), nell'ipotesi di rilevare i punti equispaziati secondo la posizione angolare, il valore del diametro dipende dallo sfasamento angolare fra i punti di tastatura ed i picchi, in direzione radiale, determinati dalla lobatura. In questo caso infatti la misura del diametro risente dell'errore di circolarità e varia, al variare della posizione angolare dei punti rilevati, nell'ambito di tale errore. In tutti gli altri casi (numero di punti diverso dal numero dei lobi) la valutazione del diametro è indipendente dalla posizione angolare dei punti e può quindi considerarsi affidabile.

Per quanto riguarda invece la valutazione dell'errore di circolarità, si può osservare che, se il numero di punti è pari al numero di lobi (4 lobi, 4 punti oppure 5 lobi, 5 punti), non si rileva alcun errore di circolarità con qualsiasi posizione angolare dei punti rilevati.

Anche con un numero di punti superiore di una sola unità rispetto al numero di lobi (4 lobi, 5 punti oppure 5 lobi, 6 punti) non si riesce ad apprezzare alcun errore di circolarità per qualunque posizione angolare dei punti rilevati (figura 11).

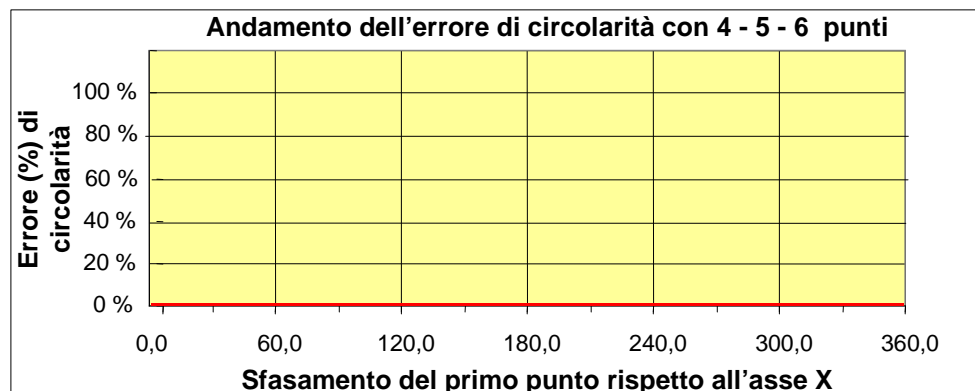


Figura 11: andamento dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 5 lobi

Inoltre, è importante osservare che con un numero di punti multiplo del numero di lobi si ha una forte dipendenza della stima dell'errore di circolarità dalla posizione angolare dei punti (figura 12). Di conseguenza si rischia di sottostimare fortemente l'errore di circolarità anche con un elevato numero di punti rilevati.

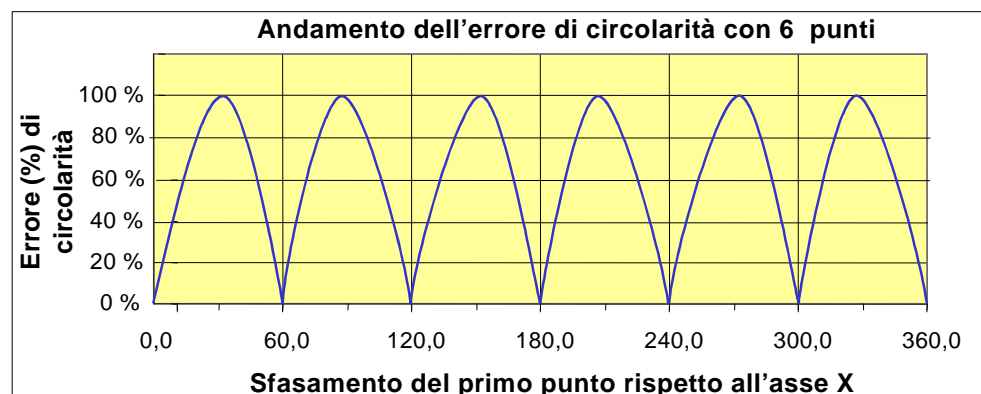


Figura 12: andamento dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 3 lobi

A titolo di esempio si può osservare che rilevando 9 punti su un pezzo trilobato (figura 13) si rischia, in alcune posizioni angolari, di rilevare solo il 70% dell'errore di circolarità esistente; rilevando 6 punti su un pezzo trilobato si rischia (in alcune posizioni angolari) di non rilevare alcun errore di circolarità pur esistendo una accentuata lobatura; lo stesso

può dirsi rilevando 8 punti su un pezzo che presenta 4 lobi o 10 punti su un pezzo pentalobato. Con pezzi pentalobati si rischia di sottostimare l'errore di circolarità anche con un numero elevato di punti, per esempio 15 punti o 20 punti, per i quali si può sottostimare l'errore di circolarità rispettivamente al 75 % ed al 70% di quello esistente.

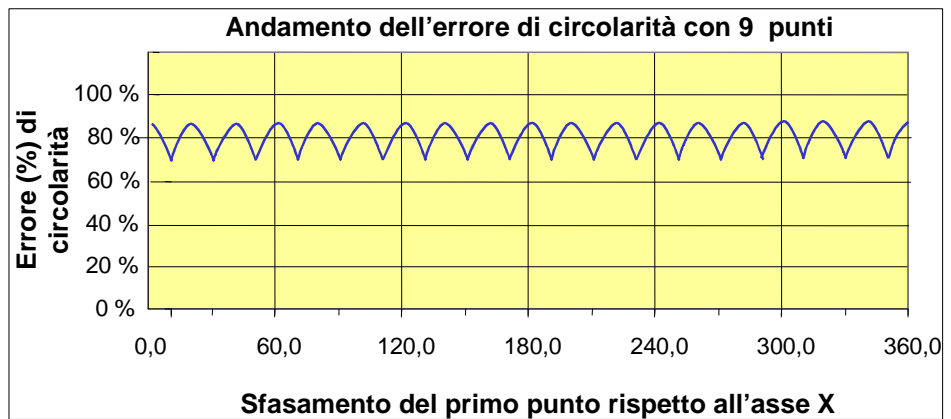


Figura 13: andamento dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 3 lobi

Per questi motivi in alcuni casi si sceglie di rilevare una serie di punti distribuiti in modo casuale secondo la posizione angolare oppure si sceglie di rilevare un numero di punti molto elevato, a volte apparentemente inutile, ma invece necessario se si vuole avere una buona stima dell'errore di circolarità che sia quindi indipendente dalla posizione angolare dei punti rilevati. Una regola aurea può quindi essere quella di non usare mai un numero di punti multiplo del numero di lobi esistente; se il numero di lobi non è purtroppo noto, può essere cautelativo usare un numero di punti che corrisponde ad un "numero primo" (ad esempio: 7, 11, 13) considerando che non deve esistere un numero di lobi pari al numero primo scelto.

Le precedenti considerazioni sono rese evidenti nelle figure 14, 15, 16 e 17 che illustrano le fasce di variabilità dell'errore di circolarità al variare della posizione angolare dei punti di misura nell'angolo giro in relazione al numero di punti di misura utilizzati per la determinazione dell'errore di circolarità.

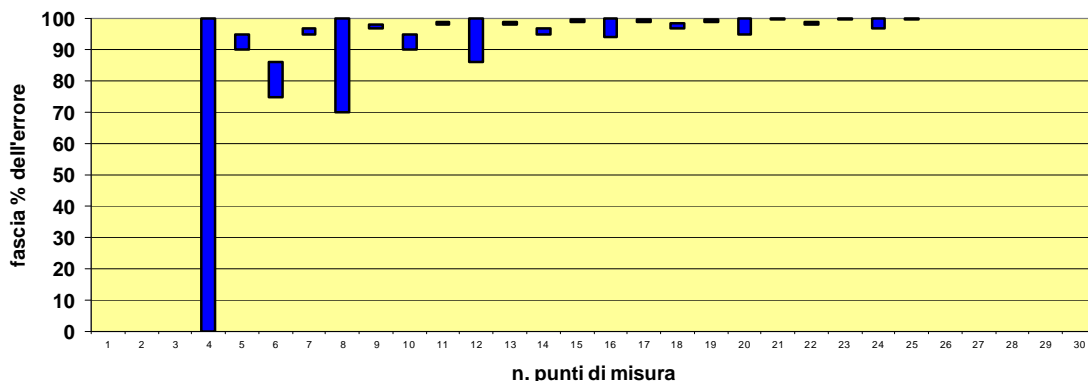


Figura 14: andamento della fascia dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 2 lobi in funzione del numero di punti di misura

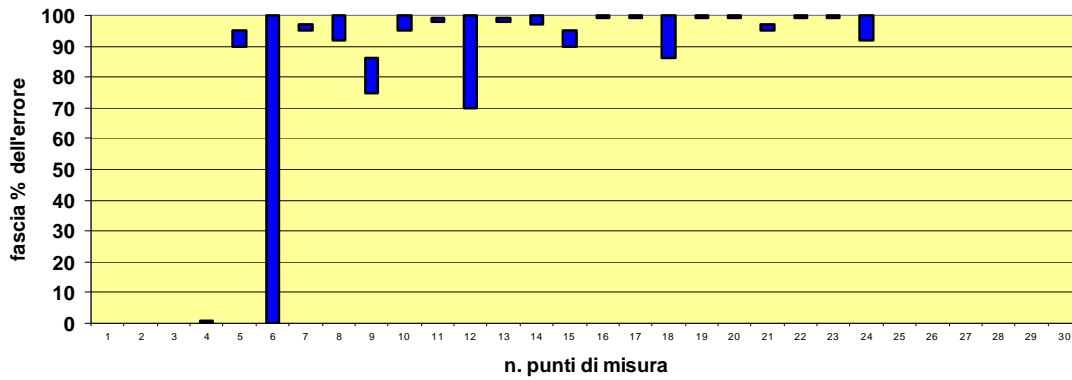


Figura 15: andamento della fascia dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 3 lobi in funzione del numero di punti di misura

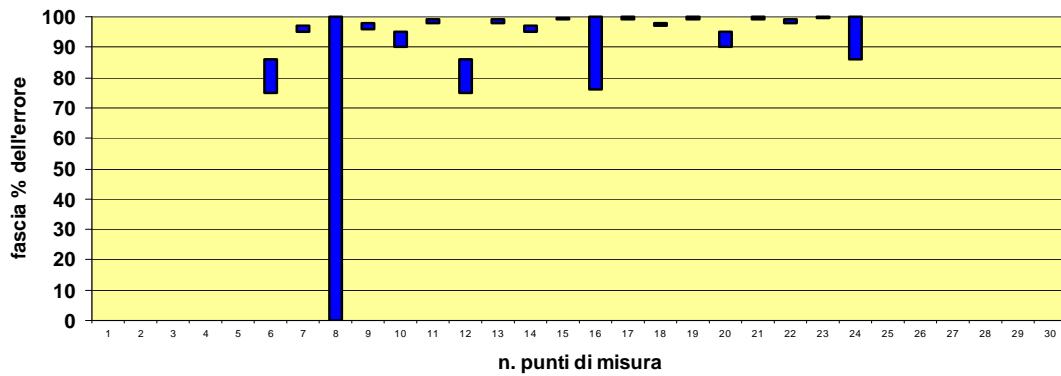


Figura 16: andamento della fascia dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 4 lobi in funzione del numero di punti di misura

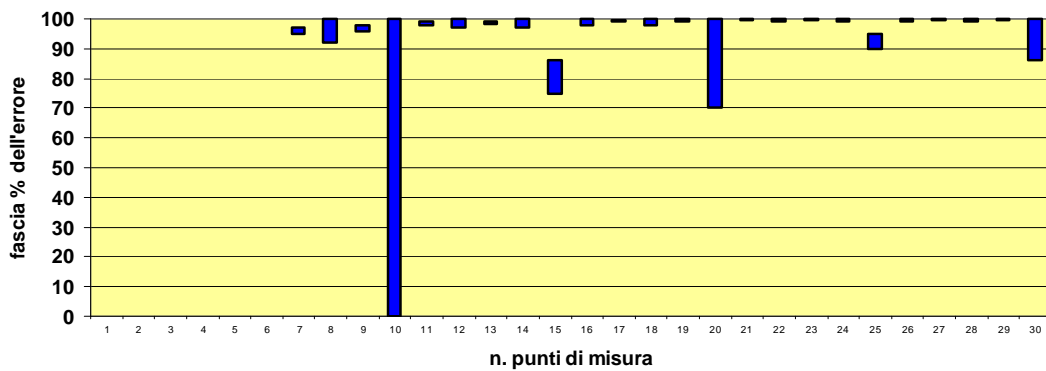


Figura 17: andamento della fascia dell'errore di circolarità in percentuale con pezzo a 5 lobi in funzione del numero di punti di misura

6.0 Conclusioni

Da quanto esposto risulta evidente come la presenza di un errore di circolarità spesso influenza la misura del diametro inteso come segmento fisico e quindi come occorre interpretare correttamente il risultato di misure a due punti o a tre punti nella valutazione di pezzi lobati [5].

Nella metrologia a coordinate, potendo scegliere il numero di punti di misura, occorre essere consapevoli dell'effetto della posizione angolare dei punti rilevati nella determinazione dell'errore di circolarità in quanto è opportuno scegliere un numero di punti di misura che minimizzi la variazione della stima dell'errore di circolarità in funzione della posizione angolare dei punti.

Il numero di punti corretto (per ogni tipo di lobatura: 2 lobi, 3 lobi, 4 lobi, 5 lobi) è quello per il quale la fascia di valori in blu (che esprime la variabilità della stima dell'errore di circolarità in base alla posizione angolare) è tutta compresa fra il 95% ed il 100% dell'errore di circolarità realmente esistente. Risulta estremamente pericoloso quindi, usare un numero di punti che, pur avendo una fascia che raggiunge il 100% presenta un limite inferiore di tale intervallo molto basso. Sono inoltre da evitare i numeri di punti che individuano fasce posizionate nella zona bassa del grafico, mentre una scelta ottimale è rappresentata da quel numero di punti a cui corrispondono fasce strette (bassa dipendenza dalla posizione angolare) interamente vicine al 100 % (possibile sottostima dell'errore di circolarità bassa).

Bibliografia

- [1] G. Malagola, A. Ponterio, "Determinazione dell'incertezza strumentale in funzione dell'errore massimo ammesso" – II° Congresso Italia no di Metrologia & Qualità – Milano 2001
- [2] G. Malagola, A. Ponterio, "Valutazione della incertezza di misura con calibri a corsoio", TUTTO_MISURE 1/2000
- [3] R. Bertozzi , G. Malagola, "Apparecchiature di misura, controllo e collaudo – Parte I : i micrometri ", Qualificazione Industriale 2/1998
- [4] R. Bertozzi, G. Malagola, "Apparecchiature di misura, controllo e collaudo – Parte II : i micrometri per misure di interni e di profondità", Qualificazione Industriale 1/1999
- [5] Malagola G., Ponterio A., "La metrologia dimensionale per l'industria meccanica" – Augusta Edizioni, Torino 2004 (www.metrologiadimensionale.it)