

POLITECNICO DI TORINO

Anno Accademico 2017/2018

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

**Metodi di misura e controllo Qualità
di ruote dentate per applicazioni aeronautiche**



Relatore: Prof. Maurizio Galetto

Candidato: Prifti Elvans

Sommario

Introduzione	1
Presentazione dell'ambiente di lavoro	1
Scopo del lavoro.....	3
Descrizione del prodotto e del sistema di controllo Qualità	5
Classificazione delle ruote dentate	5
<i>Ingranaggi Cilindrici</i>	8
<i>Ingranaggi Spiro-conici</i>	14
<i>Innesti scanalati</i>	16
Applicazioni	19
<i>Sistemi principali di trasmissione della potenza</i>	19
<i>Sistemi ausiliari di trasmissione della potenza</i>	21
Normativa di riferimento.....	23
Controllo a campione in processo: benessere alla produzione	25
Controllo a tappeto all'ispezione finale	29
<i>Piano di collaudo per il controllo di banco</i>	30
<i>Programmi di ispezione tramite CMM</i>	32
Descrizione dei metodi di controllo delle caratteristiche del prodotto	35
Controllo dimensionale	35
<i>Controllo con CMM</i>	35
<i>Controllo di banco</i>	42
<i>Controllo con macchine di misura ottiche</i>	45
Controllo visivo.....	49
Controllo durezza	50
Classificazione delle caratteristiche costruttive e metodi di misura applicabili	53
Caratteristiche dimensionali critiche.....	54
Caratteristiche dimensionali minori	63
Caratteristiche degli ingranaggi	67
Caratteristiche degli scanalati	75
Casi Applicativi	77

Misura di un diametro	78
<i>Controllo con CMM</i>	78
<i>Controllo con macchina ottica</i>	81
<i>Controllo con rotondimetro</i>	84
<i>Controllo con micrometro</i>	86
<i>Confronto delle misure</i>	88
Misura di una distanza	91
<i>Misura con calibro digitale</i>	91
<i>Misura con altimetro</i>	93
<i>Misura con proiettore</i>	95
<i>Misura con macchina ottica</i>	98
<i>Misura con CMM</i>	100
<i>Confronto delle misure</i>	102
Misura di un run-out	106
<i>Misura con pupitast</i>	106
<i>Misura con Rotondimetro</i>	109
<i>Misura con CMM</i>	111
<i>Confronto delle misure</i>	114
Misura delle caratteristiche delle dentature	117
<i>Confronto dell'evolvente</i>	118
<i>Confronto dell'errore di inclinazione denti</i>	121
<i>Confronto dell'errore di passo della dentatura</i>	123
<i>Confronto dello spessore dente</i>	126
<i>Misura dell'errore di forma dei fianchi dente</i>	128
Conclusioni	131
Bibliografia e sitografia	133

Introduzione

Il seguente lavoro si occuperà di introdurre i concetti, le tecniche ed i metodi di analisi dimensionale e di Controllo Qualità utilizzati da una nota azienda del settore aeronautico dove ho accumulato oltre 3 anni di esperienza lavorativa. L'obiettivo che prenderò in considerazione è quello di cercare di accoppiare il più possibile tutto l'aspetto teorico studiato nei diversi corsi del mio percorso di formazione (prima nel corso di studi triennale in Ingegneria Meccanica e, successivamente, nell'attuale corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale) con tutti gli aspetti pratici applicati nella mansione svolta al lavoro.

La trattazione verterà unicamente sull'analisi degli aspetti di collaudo di alcuni componenti applicati nel settore aeronautico con particolare attenzione alle ruote dentate utilizzate per la trasmissione primaria di potenza ed altresì per i componenti di trasmissione per l'attivazione dei sistemi ausiliari di volo.

Presentazione dell'ambiente di lavoro

L'ambiente in cui viene svolto il seguente lavoro è un'area riservata all'interno dell'officina ed appositamente adibita a Collaudo e Controllo Qualità. L'area è continuamente climatizzata in modo da tenere una temperatura ambiente normalizzata a $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ secondo la normativa. Il collaudo è diviso attraverso delle pareti prefabbricate che lo separano dal resto dell'ambiente esterno destinato alle lavorazioni meccaniche. In tale area

si svolgono i controlli dimensionali e visivi delle diverse fasi di lavorazione – qualora non sia diversamente prevista un'apposita attività di autocontrollo a bordo macchina – ed il controllo finale dei particolari prima del versamento a magazzino.

All'interno dell'area vi sono macchinari di misura specifici e banchi di lavoro sui quali l'operatore dimensionalista possa svolgere il controllo in manuale. Oltre ai banchi di lavoro sono presenti delle CMM (Coordinate-measuring machine), ossia delle macchine di misura computerizzate che, attraverso dei programmi di misura per coordinate creati ad hoc, hanno il compito di rilevare automaticamente determinate misurazioni sui particolari; durometri, proiettori ottici, macchine di misura ottiche, bancali per diversi test e un numero sufficiente di strumenti di misura manuali, sia analogici che digitali.

L'intero reparto si può poi ritenere suddiviso in due distinte macroaree: il Collaudo Benestare ed il Collaudo Finale. Al primo è affidato il compito di controllare, testare e certificare la corretta esecuzione delle lavorazioni di quella fase ed il rispetto delle specifiche del cartellino operativo di riferimento. Al secondo viene invece affidato il controllo al 100% delle quote e delle caratteristiche di tutte le operazioni previste a ciclo, essendo arrivato il particolare al termine del suo percorso di lavorazioni meccaniche.

A ciascuno degli operatori sono solitamente affidate mansioni specifiche in modo da coprire tutto lo spettro dei differenti controlli: questo implica quindi il passaggio di mano in mano da un addetto all'altro in cui ciascuno svolge il proprio specifico controllo. Ogni particolare segue però un percorso differente dagli altri e quindi vi è un sistema di flusso di particolari molto intricato ma, al contempo, molto semplificato grazie all'applicazione dei concetti del Visual Management e di Digital Management. Il primo metodo implica di rendere visivamente molto chiaro il percorso che ogni particolare deve seguire, dall'operazione precedente alla successiva, applicando delle frecce colorate, distinguendo e delimitando particolari aree e creando degli appositi corridoi dove il flusso possa dirigersi seguendo il proprio verso giusto. Il sistema di gestione delle diverse fasi di lavoro viene chiarificato in modo che qualsiasi stakeholder del particolare in esame riesca facilmente a

capire il percorso che esso segue e possa trovare facilmente in quale fase del collaudo esso si trovi in quel particolare momento.

Tutto viene inoltre sostenuto e migliorato attraverso la disposizione di appositi monitor interattivi in determinati punti dell'area attraverso i quali ciascun operatore possa visualizzare la posizione teorica del particolare, l'operazione successiva al quale verrà sottoposto e per quando è attesa la sua consegna. Il sistema di Digital Management, che fa affidamento su un complesso sistema informativo interno, permette anche di avere in qualsiasi momento una prospettiva dei successivi particolari in arrivo, di quelli che sono attualmente in corso di analisi, e di quelli che hanno una maggiore o minore priorità in termini di richiesta a magazzino.

Il coordinamento delle diverse fasi del lavoro viene effettuato anche attraverso del personale dedicato per ciascun turno di lavoro, detti Team Leader, che hanno il compito di sopperire a particolari necessità dei diversi operatori dell'area, di contribuire a particolari attività grazie alla loro preparazione ed esperienza e di contribuire a preparare tutto il necessario per ospitare il lavoro in arrivo da monte. Infine, un Supervisore di Area ha il compito di coordinare l'intero flusso di lavoro e gestire tutti gli addetti.

Scopo del lavoro

Il presente lavoro si propone di analizzare tutti i metodi di misura e di analisi delle caratteristiche geometriche, dimensionali e superficiali oltre alle particolari specifiche di conformità richieste del cliente e/o dalle norme di riferimento per le diverse ruote dentate per applicazione aeronautiche.

Lo scopo non è tanto quello di analizzare nel dettaglio ogni singolo metodo proposto, quanto quello di introdurre la loro possibile applicazione, la possibilità di poter confrontare i risultati raccolti con i diversi metodi ed infine la possibilità di poter scegliere di applicare uno piuttosto che un altro metodo

per poter misurare o analizzare una medesima caratteristica senza incorrere in problemi di confronto ed analisi dei dati.

Si inizierà quindi con l'esposizione ed una breve descrizione dei diversi metodi e delle diverse tecniche di misura ed analisi in modo da capire le principali caratteristiche di ciascuno di essi.

Si procederà quindi con una valutazione dei valori ottenuti da ciascun metodo analizzando situazioni e particolari diversi in condizioni di misura diverse come, ad esempio, il rilevamento di una stessa misura effettuata a temperature differenti dei particolari oppure effettuate da operatori diversi.

In ultimo si procederà con un confronto dei dati ottenuti dalle differenti tecniche e strumenti in modo da verificare una serie di ipotesi di indifferenza tra le differenti misure. L'obiettivo è quello di riscontrare, qualora vi siano, delle differenze sostanziali tra i diversi metodi in modo da poter definire accuratamente quello più indicato per quella determinata misurazione altresì poter stabilire quale metodo alternativo sia il più adatto per poter effettuare eventuali ricontrolli e verifiche aggiuntive.

Descrizione del prodotto e del sistema di controllo Qualità

Classificazione delle ruote dentate

Gli ingranaggi sono il sistema di trasmissione più comune nella maggior parte delle trasmissioni meccaniche. Essi vengono comunemente impiegati nelle scatole di trasmissione con la funzione di riduzione del numero di giri in ingresso dal sistema di alimentazione ovvero con l'obiettivo di aumentarne il valore fungendo come moltiplicatore di giri. Data infatti una potenza in uscita dall'albero motore, lo scopo dei sistemi di trasmissione è quello di variare il valore di coppia per ogni possibile funzione richiesta al sistema andando ad agire sulla velocità di trasmissione a scapito di una perdita dovuta alle inerzie ed all'attrito tra i diversi componenti del sistema che si può riassumere nel termine di efficienza del sistema o, per una maggior precisione, nel valore del rendimento meccanico della trasmissione secondo la seguente formula:

$$P = C \cdot \omega \cdot \mu$$

dove:

P: Potenza sviluppata dal sistema di alimentazione [kW]

C: Coppia sviluppata dal motore a quel determinato numero di giri [kN]

ω : Numero di giri del motore [n° di giri/s]

μ : rendimento meccanico del sistema di trasmissione

Supponendo che per un certo periodo il motore, termico, elettrico o qualsiasi altro sistema di generazione di moto rotatorio, giri a regime e sviluppi cioè

una potenza costante, si può avere una continua modulazione della coppia trasmessa agendo sul valore del numero di giri del motore. Si supponga, per semplicità di trattazione, che il rendimento meccanico del sistema di trasmissione non venga influenzato dalla temperatura e che esso rimanga costante per qualsiasi valore dello spettro dei possibili valori di rpm in cui entrano in gioco una serie di fattori e di dinamiche più specifiche che esulano dall'obiettivo della seguente trattazione; allora si potrà facilmente notare che all'aumentare del valore di Coppia deve necessariamente ridursi il valore del numero di giri a cui viene cui essa viene generata e viceversa.

In questo modo si riesce a sfruttare l'energia prodotta dal sistema di alimentazione che, a meno delle perdite meccaniche impossibili da eliminare completamente, potrà essere impiegata per compiere un determinato Lavoro su un sistema esterno. Più il sistema di alimentazione è in grado di raggiungere velocità elevate e maggiormente sofisticato dovrà essere il sistema di trasmissione che richiederà delle finiture superficiali e delle caratteristiche meccaniche dimensionali e dinamiche superiori per poter sfruttare il più possibile l'energia prodotta.

Probabilmente si può osare affermare che il primo meccanismo di trasmissione con cui siamo venuti a contatto nella vita e che abbiamo abilmente imparato ad usare, più o meno consciamente, è il cambio della bicicletta. Nonostante la trasmissione di questo sistema avvenga per mezzo della catena, il suo scopo ed il ragionamento che sta alla base di esso è lo stesso di qualsiasi altro sistema dotato di ruote dentate. Esso si compone infatti, nella sua versione più semplice, di un pignone montato sull'albero della ruota posteriore e di una corona dentata saldata sul sistema di pedali ed alimentata per l'appunto dallo sforzo generato dal ciclista su di essi. Oggi tale sistema è stato decisamente migliorato da un sistema di cambio manuale delle marce creando un set di ruote dentate di dimensioni e numero di denti diverse sia del pignone sia della corona e questo permette di modulare in qualsiasi momento lo sforzo che il ciclista effettua sui pedali affrontando con più facilità diversi percorsi.

Un altro sistema di trasmissione molto familiare e tecnicamente molto sofisticato con cui abbiamo quotidianamente a che fare è il sistema di cambio dell'autovettura che ci permette, spesso inconsciamente, di modulare continuamente la nostra velocità in base al terreno ed alle nostre esigenze di guida. La potenza prodotta dal motore endotermico o, più recentemente, elettrico della nostra vettura viene convogliato a terra attraverso gli pneumatici messi in rotazione da un complesso sistema di trasmissione creato ad hoc.

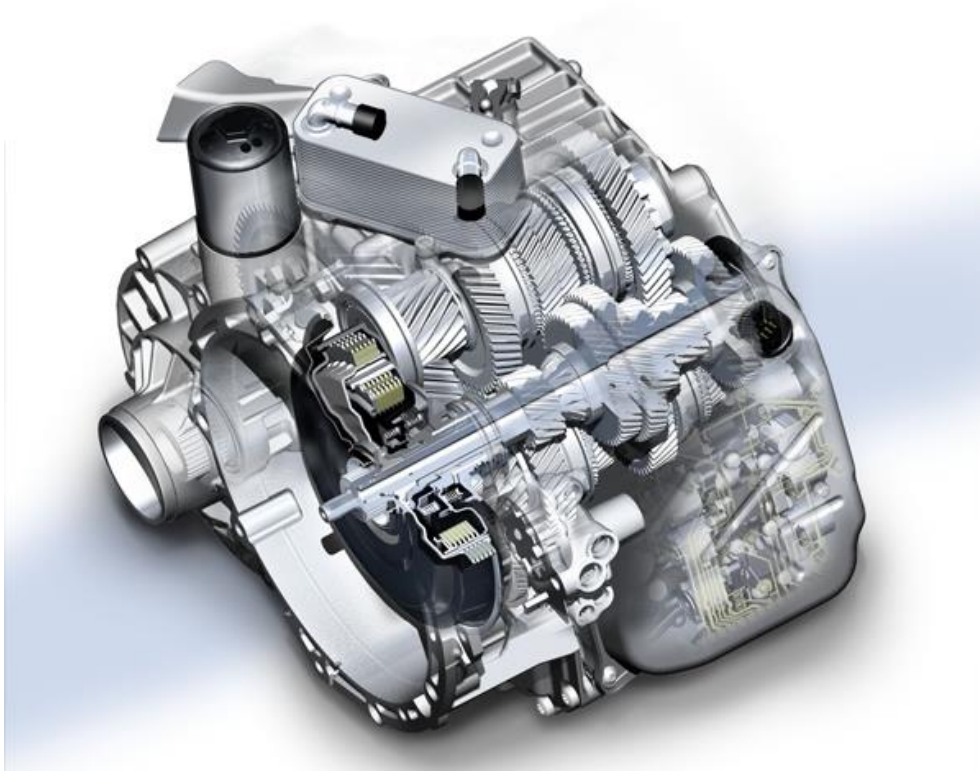


Figura 2.1 Sistema di trasmissione nell'automotive

Dato che questo sistema di trasmissione utilizza molti degli elementi che andremo ad analizzare, verrà ripreso come modello per la spiegazione anche più avanti.

Ora che si è introdotto lo scopo principale delle ruote dentate più comuni, possiamo brevemente introdurre le principali caratteristiche dei principali tipi in cui esse si articolano:

- Ruote dentate cilindriche
- Ruote dentate coniche
- Scanalati

Ingranaggi Cilindrici

Gli ingranaggi cilindrici sono le ruote dentate più semplici e comuni. Si compongono di un corpo centrale che può essere direttamente ricavato da un albero cilindrico oppure calettato successivamente su di esso attraverso diversi sistemi. Vengono utilizzate almeno due ruote dentate, una con numero di denti minore che prende comunemente il nome di *pignone* ed una con un maggior numero di denti che prende il nome di *corona*. Quando il sistema di trasmissione è un *riduttore di velocità* la potenza è in input al pignone e viene successivamente espulsa attraverso la corona. Il contrario avviene qualora si abbia a che fare con un sistema *moltiplicatore di giri* come precedentemente discusso anche per l'esempio della bicicletta.

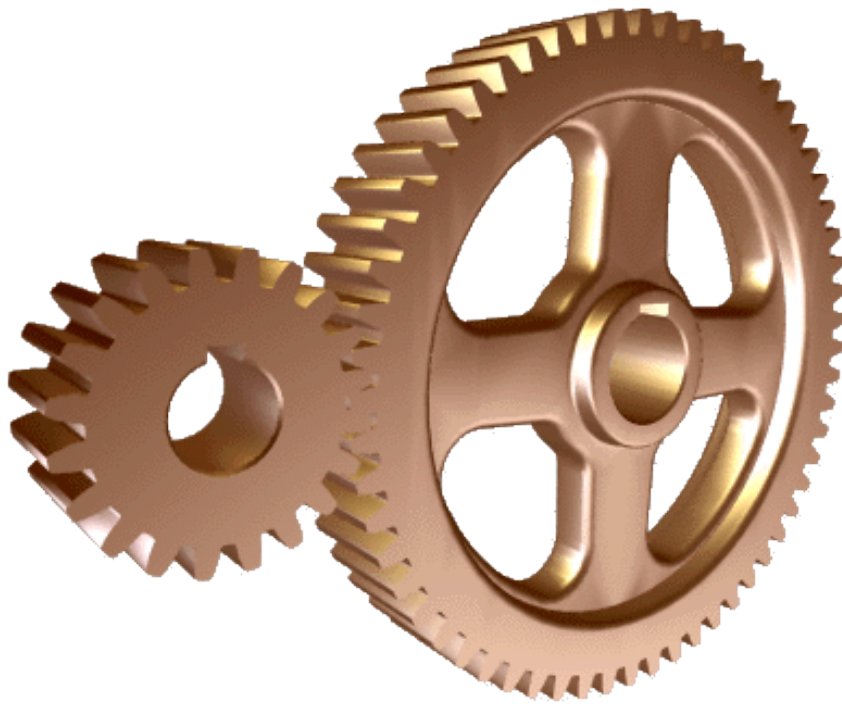


Figura 2.1 Coppia di ingranaggi cilindrici a denti dritti

Gli ingranaggi cilindrici vengono realizzati per mezzo di un *creatore*, cioè un apposito utensile che, attraverso un sistema di mutua rotazione con l'ingranaggio, taglia la superficie esterna e crea in essa dei solchi conferendo ai denti che rimangono una superficie a profilo di *evolvente di cerchio*.



Figura 2.2 Creatore per ingranaggi cilindrici

Il creatore è un utensile che viene utilizzato soprattutto per la lavorazione di ruote dentate più semplici e destinate ad applicazioni meno poco importanti, dove non è richiesta una particolare finitura e dove non sono richieste tolleranze dimensionali e di forma troppo ristrette. Qualora si debbano realizzare ruote dentate destinate ad usi particolari che richiedono una correzione del profilo ad evolvente di cerchio e in cui la “perfezione” della geometria sia molto importante, si utilizzano invece delle *mole di forma in CBN*.



Figura 2.3 Mola di forma per ingranaggi cilindrici a denti dritti in CBN

Tutti gli ingranaggi cilindrici richiedono che venga rispettato il più possibile il profilo radiale del dente poiché è grazie ad esso che si riesce ad ottenere un corretto rotolamento dei denti della coppia dentata in qualsiasi momento evitando lo strisciamento che potrebbe invece produrre abrasioni, rigature ed intaccature sulla superficie indebolendo molto il dente. Questo parametro va rispettato anche per una questione di riduzione del rumore e delle vibrazioni: se i denti di entrambe le ruote dentate non seguono la stessa geometria e non sono stati correttamente realizzati i fianchi dente si possono produrre degli urti nel momento in cui entra in presa una nuova coppia di denti che potranno sollecitare molto i denti stessi e portarli addirittura a rottura oltre a produrre un fenomeno di vibrazioni continue sui vincoli dell'albero dal quale sono stati ricavati o sul quale sono stati calettati.

Il profilo ad evolvente di cerchio si può immaginare come la linea tracciata su un foglio da una penna legata ad una corda attorcigliata ad un oggetto circolare che viene srotolata allontanandosi da quest'ultimo. Dato che questo

profilo viene quindi costruito per puro rotolamento, esso è molto adatto a permettere la trasmissione tra ruote con i denti costruiti in questa maniera.

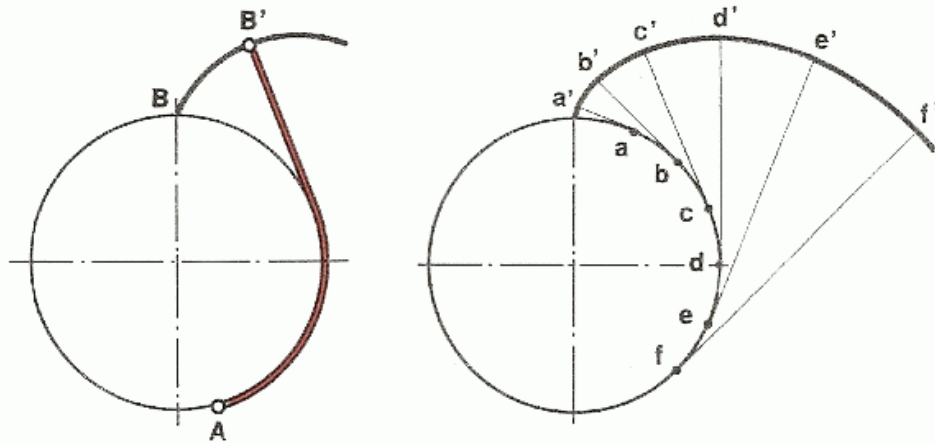


Figura 2.4 Sviluppo dell'evolvente di cerchio

Un ulteriore motivo per il quale è doveroso rispettare una corretta esecuzione del profilo ad evolvente oltre ad un'eccellente finitura superficiale è quello di evitare il *pitting* ossia un fenomeno che si genera quando vi sono delle parti in rotolamento reciproco e nel quale, qualora almeno una delle due venga sollecitata in maniera errata o eccessiva, si formano delle micro erosione delle superfici di contatto con il conseguente distaccamento di materiale che porta ad indebolimento dell'intero sistema oltre che alla conseguente frattura dei denti. Per ovviare in parte a questo problema la superficie delle ruote dentate viene accuratamente indurita attraverso dei trattamenti termici specifici tra i quali il più importante è la *cementazione*.

Le caratteristiche costruttive più importanti per le dentature sono mostrate in figura 6. Per un corretto ingranamento è importante che entrambe le ruote della coppia dentata abbiano lo stesso modulo che, oltre ad incidere sulla maggior parte delle caratteristiche della dentatura, è fondamentale per la definizione del passo $p = \pi \cdot m$ che deve essere lo stesso per entrambe le ruote per permettere un corretto ingranamento.

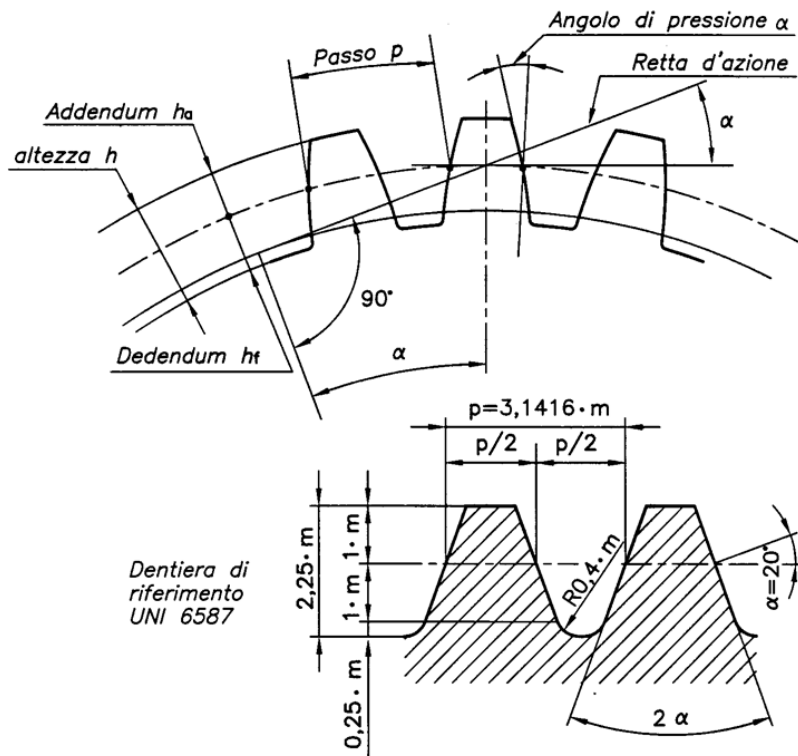


Figura 2.5 Caratteristiche costruttive delle dentature

Altri parametri fondamentali sono il numero di denti z attraverso il quale si identifica facilmente il rapporto di riduzione della coppia dentata: $\tau = z_1/z_2$; il diametro primitivo della dentatura sul quale si identifica il punto di massimo sforzo di pressione tra i due denti in presa ed attraverso la somma dei due raggi primitivi delle due ruote si identifica invece l'*interasse* di accoppiamento; l'angolo di pressione che definisce la scomposizione della forza totale di pressione in forza radiale e forza tangenziale oltre a definire l'inclinazione della retta d'azione sulla quale si sposta il punto di istantanea rotazione C durante l'ingranamento di una coppia di denti in presa. L'addendum ed il dedendum si riferiscono rispettivamente all'altezza della porzione di dente oltre il diametro primitivo fino al diametro di testa della dentatura ed alla distanza tra il diametro primitivo ed il diametro di base. Il raggio di fondo deve invece essere accuratamente dimensionato in modo da ridurre il più possibile il coefficiente di intaglio che si genera alla base del dente e che potrebbe intaccare la resistenza a flessione di quest'ultimo. L'inclinazione dei fianchi dente (angolo definito nella pratica come *angolo*

elica β) rispetto all'asse di montaggio del particolare definisce invece il tipo di ingranaggio cilindrico che potrà quindi essere:

- Cilindrico a denti dritti (angolo $\beta = 0$)
- Cilindrico a denti elicoidali o bi-elicoidali (angolo elica $\beta > 0$)

Le ruote dentate cilindriche a denti elicoidali permettono di avere più denti in presa contemporaneamente e quindi di poter trasmettere una forza maggiore, generano meno rumore e meno vibrazioni ma hanno il grosso svantaggio di dare origine anche ad uno sforzo assiale che potrebbe sollecitare molto il sistema di cuscinetti sul quale si scaricherà. Per ovviare al problema dello sforzo assiale si sono introdotte le ruote bi-elicoidali che hanno l'intera fascia di ingranamento interrotta da una gola di scarico rispetto alla quale le due metà della dentatura risultano speculari e centro del quale viene scaricata e mutuamente compensata la forza assiale uguale ed opposta generata dalle due. Questo vantaggio tecnico viene però contrastato dalla difficoltà costruttiva delle due metà della ruota dentata che dovranno essere accuratamente allineate in modo che la punta della freccia teorica generata dai due profili cada esattamente al centro dell'intera fascia della dentatura, altrimenti si genererebbero dei problemi di montaggio e degli sforzi imprevisti durante l'ingranamento con la ruota che accoppia. Un prospetto dei due diversi modelli è mostrato in figura 7.

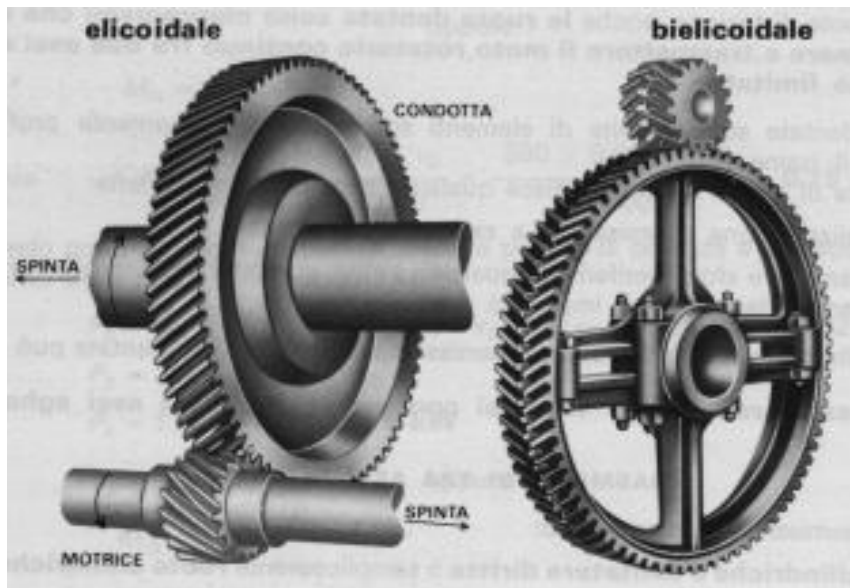


Figura 2.6 Ruote dentate cilindriche elicoidali e bi-elicoidali

Le principali caratteristiche che invece si andranno ad analizzare in fase di collaudo sono la geometria del profilo evolvente, l'inclinazione dei denti rispetto all'asse della ruota e l'eccentricità di questa rispetto all'asse di montaggio, il diametro di testa e di fondo, il passo della dentatura ed il rispetto del diametro primitivo in fase di rettifica.

Ingranaggi Spiro-conici

Si è visto che le forze che vengono scambiate dagli ingranaggi cilindrici sono distribuite lungo una retta su un piano perpendicolare agli assi di montaggio delle due dentature. Qualora vi sia invece la necessità di variare gli angoli di montaggio delle ruote per rispettare dei vincoli costruttivi, si possono usare delle ruote dentate coniche a denti diritti oppure coniche con denti elicoidali (dette anche spiro-coniche poiché hanno un angolo di spira diverso da zero) come nella seguente figura.

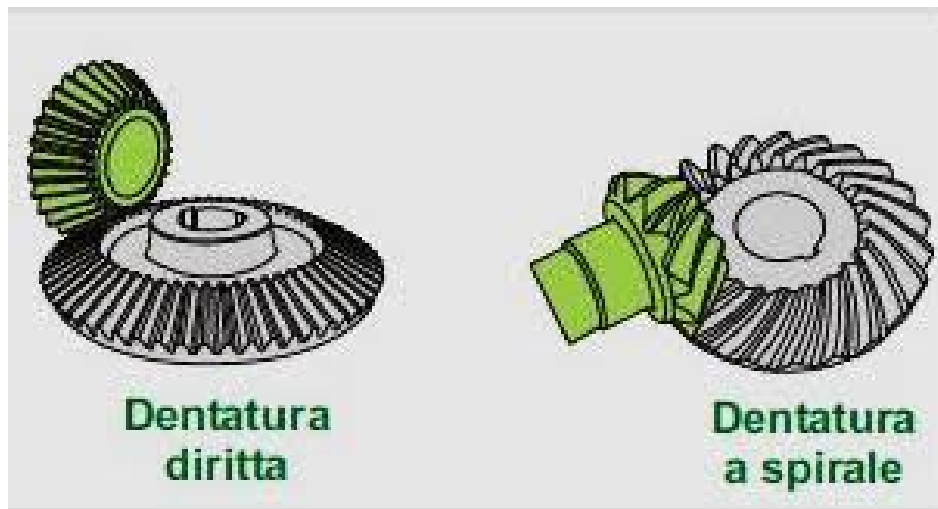


Figura 2.7 Ingranaggi conici

Si tratta di ingranaggi ottenuti ciascuno da un tronco di cono con angolo di apertura variabile su un ampio spettro di valori e grazie ai quali è possibile inclinare l'asse di output rispetto all'asse dell'albero in input. In fase di montaggio le due ruote vanno registrate per rispettare ciascuna la propria distanza di montaggio in modo che la punta dei due coni primitivi converga nel medesimo punto e non vi sia quindi eccessivo gioco tra i due ingranaggi. Esattamente come per il caso delle ruote cilindriche a denti elicoidali, anche le ruote spiro-coniche permettono una trasmissione più fluida e meno rumorosa grazie ad un maggior numero di denti in presa rispetto ai modelli a denti dritti ma anche queste generano uno sforzo assiale che verrà scaricato sui cuscinetti.

Le ruote dentate coniche elicoidali presentano un angolo di spira variabile lungo l'altezza del cono che genera dei denti a profilo circolare. Questi profili vengono ottenuti con delle apposite frese oppure delle mole di forma in CBN e si creano sul dente un fianco concavo ed un fianco convesso. Questi sono definiti attraverso due diversi raggi di curvatura interno ed esterno rispettivamente per il fianco convesso ed il fianco concavo. Quando si tratta di un pignone si è soliti lavorare un fianco per volta mentre su una corona vengono lavorati contemporaneamente entrambi i fianchi e quindi, nel caso di un errore di modellazione della mola in *fase di diamantatura*, l'errore si ripercuote su entrambi i fianchi dell'ingranaggio. Il rullo diamantato è un

apposito utensile che ha il compito di *ravvivare la mola* e di conferirle il profilo adatto alla rettifica di un particolare componente.

In questo tipo di ingranaggi il rotolamento non avviene attraverso il profilo ad evolvente ma si deve rispettare una matrice di forma dei fianchi dente elaborata in *fase di giochi e contatti* dell'ingranaggio con la coppia *master* che costituisce una superficie curva ideale sulla quale dovranno istaurarsi i contatti. Il dente negli ingranaggi conici elicoidali ha un'inclinazione continuamente variabile lungo l'asse pezzo e quindi non ha senso rilevarlo in fase di controllo mentre è molto importante che sia rispettata la fascia della dentatura, cioè che la stessa sia stata troncata in maniera corretta per evitare impuntamenti o l'impossibilità di montaggio con la ruota accoppiata.

Innesti scanalati

Gli innesti scanalati sono dei particolari profili intagliati sulla superficie dei pezzi che permettono di accoppiare in maniera non permanente due diversi particolari, ovvero permettono di calettare ad esempio le ruote dentate sugli alberi, o ancora di collegare sistemi di input ed output al e dal sistema senza variazione della velocità. Questo particolare tipo di collegamento ha infatti la caratteristica di essere statico, ossia di non rotolare, e quindi non si ha alcuna variazione della coppia e della velocità di trasmissione nell'accoppiamento. Lo scopo principale è quello infatti di permettere un accoppiamento mobile – privo cioè di moto relativo tra le parti accoppiate - tra particolari in una posizione predeterminata. Questo sistema permette di evitare la costruzione di particolari troppo complessi in un unico corpo e quindi di poter assemblare parti derivanti da lavorazioni diverse e specifiche di ognuno. L'accoppiamento non avviene in maniera permanente ma permette l'interscambio dei particolari qualora questi debbano essere sostituiti o perché abbiano raggiunto il limite garantito di ore di funzionamento o perché uno o più di essi ha subito delle varianti costruttive.

I tipi di collegamento classici sono la linguetta e la chiavetta ma entrambe sono adatte ad essere utilizzate solo in sistemi nei quali le velocità di rotazione e gli sforzi in gioco sono molto modesti anche per via del fatto che entrambe generano un valore di eccentricità che potrebbe causare l'instaurazione di pericolosi sforzi di flessione-torsione negli alberi. Qualora infatti si tratti di sistemi che sviluppano una grande potenza e nei quali vi siano alti regimi di rotazione, risulta conveniente utilizzare degli accoppiamenti con innesti scanalati per sopperire ai problemi sopra citati. I profili degli innesti scanalati possono essere vari (vedi figura sotto) ma le interfacce del maschio e della femmina devono risultare perfettamente accoppiabili: si devono cioè rispettare gli stessi parametri costruttivi delle dentature e quindi si dovranno avere lo stesso numero di denti e lo stesso modulo, ossia lo stesso passo, oltre al medesimo profilo.

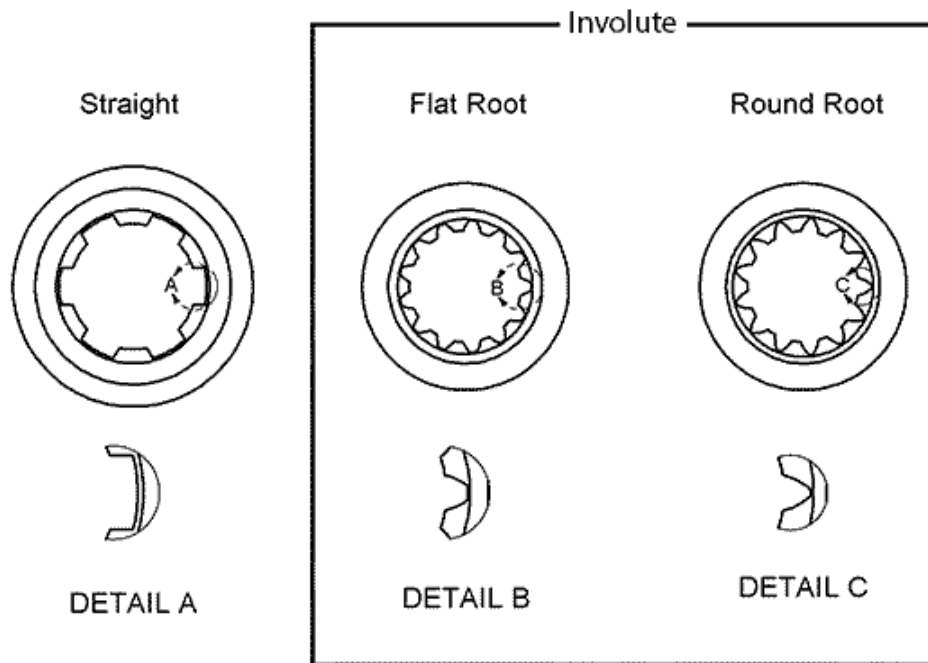


Figura 2.9 Profili innesti scanalati: a) profilo a denti diritti; b) profilo a evolvente con fondo piatto; c) profilo a evolvente con fondo a pieno raccordo

I profili scanalati sono costruiti per lavorare sui fianchi e in ambito aeronautico il profilo più utilizzato è lo scanalato cilindrico a denti diritti con centraggio sui fianchi a profilo di evolvente. Questa particolare conformazione permette alla coppia di particolari di scambiarsi lo sforzo sul

diametro primitivo, cioè nella sezione di massimizzazione delle pressioni, e di poter comunque sopperire a variazioni di rotazione o a possibili instaurazioni di vibrazioni combaciando opportunamente i contatti lungo tutto il profilo dei fianchi. Al contrario degli ingranaggi cilindrici a denti diritti a profilo di evolvente, in cui vi sono una coppia di denti in presa per volta, negli scanalati tutti i denti lavorano in presa contemporaneamente e la diversa distribuzione della pressione è ripartita in ogni settore in base all'eccentricità che, inevitabilmente, si verrà a creare tra i due particolari.

Il montaggio della coppia di scanalati potrà essere sia di tipo “con gioco” sia di tipo “con interferenza” e le posizioni reciproche saranno mantenute o attraverso sistemi di fissaggio – ghiera filettate, anelli elastici, viti – oppure attraverso i vincoli costruttivi di montaggio creati ad hoc all'interno della scatola di montaggio.

Questi sistemi sono molto utili quando bisogna estrapolare potenza dalla scatola in diversi punti della catena di riduzione: creando infatti degli alberi con a entrambe le estremità degli scanalati, si riesce a estrarre l'energia a diverse velocità che potrà poi essere facilmente sfruttata da un qualsiasi sistema esterno che verrà accoppiato con l'interfaccia dell'albero scanalato.

Inoltre, questi alberi possono anche avere lunghezze e dimensioni notevoli raggiungendo punti anche molto distanti sia all'interno che all'esterno della gearbox (la scatola ingranaggi) e su di essi possono essere ottenuti diversi scanalati in parallelo in modo da permettere il montaggio di più componenti sullo stesso sistema di rotazione.

Applicazioni

In questo paragrafo si vedrà brevemente le differenze tra le applicazioni dei sistemi di trasmissione meccanica in ambito aeronautico suddividendole in due macro-categorie: la catena principale di trasmissione della potenza e la catena ausiliaria di derivazione della stessa a tutti i sistemi secondari alla propulsione. Lo scopo di entrambi i sistemi rimane lo stesso: trasformare la potenza generata dal motore in coppia necessaria a svolgere la funzione richiesta dal/i sistema/i in output dalla gearbox.

Sistemi principali di trasmissione della potenza

I sistemi principali di trasmissione della potenza sono caratteristici degli aerei a turbo elica e degli elicotteri e, nonostante la loro mole e le loro caratteristiche costruttive peculiari, l'architettura di questi treni di ingranaggi non è così complessa. Lo scopo di questi sistemi è quello di trasmettere la potenza generata dal motore direttamente al sistema principale di movimentazione del velivolo, ossia le eliche. Tali sistemi hanno dimensioni notevoli e devono gestire una potenza molto elevata perciò a loro va dedicato particolare attenzione in fase di progettazione e di lavorazione ed elevata cura in fase di collaudo. L'insorgere di problemi ed anomalie di funzionamento in questi sistemi implica una grave ripercussione sul sistema di propulsione che potrebbe degenerare con il blocco o lo spegnimento del motore oltre alla mancata movimentazione delle pale che porterebbe a danni gravissimi e malaugurati disastri.

La trasmissione della potenza avviene interamente per via meccanica grazie all'utilizzo di diverse catene di ingranaggi atte a gestire la potenza in uscita dal motore per meglio promuovere la rotazione delle pale. Uno dei sistemi più caratteristici è sicuramente il sistema epicicloidale che genera un elevato rapporto di riduzione e quindi limita fortemente il numero di componenti in

serie altrimenti necessario se si utilizzasse un sistema di riduzione classico. Il sistema epicicloidale si compone di una corona esterna fissa sulla quale rotolano un numero dispari (solitamente 5) di ingranaggi cilindrici detti “satelliti” i quali accoppiano simultaneamente con un ingranaggio centrale al sistema e detto “solare”, il quale funge come elemento di input della potenza. L’output è invece ottenuto dal “planetario porta-satelliti”, cioè da un sistema a 5 lobi sul quale vengono montati i 5 satelliti, che ha sul corpo centrale un innesto scanalato sul quale verrà montato l’albero centrale e all’estremità del quale verrà montato l’articolato sistema di pale. La costruzione dei particolari che formano questo sistema deve essere scrupolosamente precisa per i motivi sopra citati e, risultando tutti essi dei particolari vitali al sistema di volo, le loro caratteristiche saranno soggette a tolleranze dimensionali e geometriche molto ristrette. Dati gli elevati regimi di velocità a cui saranno sottoposti questi particolari, la loro superficie di ingranamento deve necessariamente subire un processo di “superfinitura isotropica” ovvero un processo di lucidatura della superficie della dentatura che abbatta la scabrosità superficiale a livelli anche inferiori al decimo di micrometro.

Al controllo qualità di questi particolari viene data molta enfasi per via delle loro grandi dimensioni, della loro complessità costruttiva e per il fatto che il loro funzionamento risulta di primaria importanza all’intero sistema di volo. Attualmente, inoltre, si sta cercando di ridurre sia il numero di particolari necessari – modificando l’architettura della catena di trasmissione – sia utilizzando leghe e materiali più leggeri in modo da ridurre il più possibile il peso delle gearbox ottenendo un risparmio in fatto di carburante e generando di conseguenza anche un minor impatto ambientale. Uno dei primi accorgimenti messi in atto a tal fine è la limitazione nell’utilizzo di sistemi integrali di supporto a rotolamento, ossia i cuscinetti, cercando di escludere l’utilizzo di almeno un anello (solitamente quello interno del cuscinetto) e modellando la superficie dei particolari in modo da fungere da pista integrale sul quale montare direttamente i sistemi di rotolamento – sfere o rulli – al prezzo però di lavorazioni più precise e complesse. Un esempio dell’utilizzo di questo sistema è il montaggio dei satelliti, l’interno dei quali funge da pista cuscinetto, sulle borchie del planetario che vengono anch’esse appositamente

lavorate in modo da fungere da piste cuscinetto interno. In questo modo si riduce moltissimo il peso dell'ingranaggio epicicloidale e, cumulativamente agli altri accorgimenti, il peso dell'intera scatola.

Sistemi ausiliari di trasmissione della potenza

Questi sistemi sono presenti invece su tutti i tipi di sistemi di propulsione aeronautica e quindi sia sugli aerei turbo jet che su quelli ad elica. Le gearbox ausiliarie hanno il compito di estrarre potenza dal sistema principale di trasmissione per reindirizzarlo a tutti gli altri sistemi ausiliari al volo come il controllo delle diverse pompe, oppure del carrello e così via riducendo via via la velocità a fronte di una maggior coppia in output.

In questo caso si ha a che fare con un treno di ingranaggi di dimensioni molto più ridotte ma di una complessità architettonica superiore perché i punti di output sono superiori e le diverse funzioni da servire sono maggiormente distribuite lungo tutta la catena. In questi sistemi si usano prevalentemente ingranaggi cilindrici e conici di piccola taglia ma con forme molto diverse tra loro in funzione del ruolo che ognuno dovrà svolgere. Queste scatole di riduzione verranno poste sotto il corpo motore (di forma cilindrica) dal quale trarranno l'energia in input e, data la loro forma semi-circolare a mezzaluna, vengono anche chiamate scherzosamente "banane".

Tutti gli output della scatola saranno composti da appositi alberi scanalati alcuni dei quali avranno anche una funzione di "giunzione di sicurezza". Un giunto di sicurezza, o giunto di rottura, è un elemento meccanico che ha il compito di fratturarsi in un preciso punto qualora si abbia un malfunzionamento oppure un sovraccarico del sistema, in modo da preservare il sistema principale o gli organi più critici da eventuali danni. Un albero scanalato che funzioni in questo modo avrà per esempio una sezione ridotta nel quale verrà ricavata una gola circolare (si noti che si vuole comunque

evitare la generazione di punti più fragili dove possano insorgersi pericolosi coefficienti di intaglio) dimensionata in modo da arrivare a rottura qualora esso sia soggetto ad un carico superiore al limite di specifica.

Gli ingranaggi spiro-conici sono invece impiegati per variare l'angolo di trasmissione della catena e seguire più agevolmente la forma della scatola ingranaggi. Altri elementi cruciali sono rappresentati dai alcuni particolari scanalati che hanno la funzione di giunto di allineamento. Il compito di questi componenti è, data la loro forma bombata, sopperire a eventuali disallineamenti tra due alberi e permettere quindi, attraverso una parziale inclinazione, di sopperire ai problemi di sforzo di flessione-torsione ed alle elevate oscillazioni che un disassamento in un accoppiamento forzato genererebbe in loro assenza.

Ogni particolare del treno di ingranaggi delle gearbox ausiliarie potrà avere design molto diversi e si potranno facilmente trovare componenti sui quali sono contemporaneamente ricavati uno o più scanalati, ingranaggi cilindrici e/o ingranaggi spiro-conici ognuno dei quali svolgerà una diversa funzione a supporto del corretto funzionamento di tutta la catena di trasmissione. Il collaudo di questi particolari non risulta quindi meno importante o impegnativo degli ingranaggi della catena principale di trasmissione della potenza ma, data la loro funzione "secondaria", sono soggetti a tolleranze e specifiche meno stringenti.

Normativa di riferimento

In campo aeronautico l'impresa ha il compito di garantire, per legge, al cliente che ogni particolare che compone il velivolo sia conforme alle specifiche progettuali e alle norme di aeronavigabilità del prodotto nel complessivo. In campo industriale e manifatturiero ogni azienda è libera di adottare un sistema di controllo della Qualità per identificare se stessa, agli occhi del mercato, come responsabile della qualità dei beni da essa prodotti secondo le specifiche progettuali e secondo le normative civili, sociali ed ambientali. In campo aeronautico, invece, ogni prodotto deve essere conforme a determinate specifiche progettuali che dovranno essere approvate da appositi enti – nazionali, comunitari, o internazionali – e ad una serie di normative imposte per legge da organi amministrativi civili, militari o agenzie terze addette a tale compito. L'impresa sarà quindi tenuta a costituire un Sistema per la Gestione della Qualità – QMS: Quality Management System – interno all'azienda il quale ha il compito di definire le regole e le procedure da seguire in ogni fase del ciclo di vita del prodotto, i processi e le risorse da impiegare per conseguire l'obiettivo di qualità dell'azienda e la struttura organizzativa responsabile dell'implementazione di tutto l'articolato sistema di controllo e gestione.

Le attività che disciplinano il processo di navigabilità di un aeromobile (o, semplicemente, di una parte dei suoi componenti) si articolano in:

1. Certificazione delle imprese di progettazione, costruzione e/o manutenzione
2. Certificazione dei prodotti realizzati
3. Qualificazione del personale addetto ad ogni fase del ciclo di vita

Le normative di navigabilità degli aeromobili sono emesse a livello nazionale, comunitario o internazionale da apposite Commissioni. Il rispetto di tale norme e la Certificazione di Conformità dell'impresa produttrice a tali specifiche dovrà essere successivamente approvata e rilasciata da appositi enti quali l'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) per l'aviazione

civile e “ARMAEREO” in campo militare in Italia oppure l’EASA (European Aviation Safety Agency). Tali agenzie esercitano il controllo, la verifica e l’emissione delle certificazioni, nonché le attività di sorveglianza – attraverso degli audit periodici nelle imprese – per il mantenimento dei requisiti di certificazione.

Alcune Norme e Regolamenti in campo civile di applicabilità generale sono:

- EASA PART21 ed EASA PART145 (Europa)
- FAR21 e FAR145 (USA)

mentre in campo aeronautico militare sono applicabili invece le seguenti:

- AQAP (Paesi Nato)
- AER-Q-... (Aeronautica Militare)

A livello globale invece viene applicata la AS/EN 9100:2016 a tutta la catena di fornitura di tutte le diverse parti dell’aeromobile che ha il difficile compito di coniugare gli aspetti delle norme nazionali e comunitarie con i principi generali della ben più nota ISO 9001 che definisce gli aspetti generali del Sistema di Gestione della Qualità.

Oltre alle norme a livello generale ogni produttore di velivoli (Airbus, Boeing, Lockheed Martin...) può far applicare ai fornitori le proprie norme interne che sono basate sulle prime e che riflettono, per alcuni aspetti, dei bisogni legati alla particolare realizzazione delle caratteristiche di progettazione del proprio prodotto. In ultimo, ogni produttore di particolari, come nel nostro caso, può assimilare ed internalizzare tali norme costituendo una raccolta personale di norme che siano più facilmente comprensibili ed applicabili al particolare ambiente produttivo dell’impresa. Tali norme e regolamenti interni sono tuttavia approvate dai clienti e dagli enti di certificazione ma sono più difficilmente reperibili poiché soggette a protezione dei diritti e non sono soggette all’obbligo di pubblicazione.

Controllo a campione in processo: benessere alla produzione

Per gestire la produzione con ottica diretta al cliente e con l'obiettivo di evadere con puntualità e con efficacia tutte le commesse, si applica una gestione molto snella, al limite del *just-in-time*. Vengono quindi lanciati in produzione lotti molto piccoli dei diversi particolari, al limite di una sola unità quando il particolare risulta di grandi dimensioni e/o richiede una serie molto lunga di operazioni a ciclo. Per questo motivo non esistono linee dedicate alla produzione in serie dei diversi particolari ma si ha una divisione in apposite aree, celle o microcelle, ciascuna dedicata ad una specifica lavorazione di tutti o una serie di particolari che rientrano in una diversa categoria tra ingranaggi cilindrici (spur gear), spiro-conici (bevel gear), alberi (shaft) o particolari della catena di potenza (power gear). Seguendo questa logica di produzione si riesce a cambiare rapidamente l'ordine dei particolari da lavorare, ad adattare diverse macchine per eseguire contemporaneamente una stessa lavorazione su particolari che costituiscano in un determinato momento un collo di bottiglia all'evasione degli ordini o a spostarne altri su altri macchinari per dare la priorità all'esecuzione di commesse più urgenti. Modulare continuamente e in tempo reale la produzione e l'avanzamento dei diversi particolari (si tenga conto che si tratta di centinaia di parti differenti di clienti diversi) presenta il vantaggio di essere sempre in grado di far fronte ad imprevisti e a fermi macchina per manutenzioni non previste ma al prezzo di dover anche continuamente montare e smontare le macchine per via del fatto che diversi particolari richiedono diversi attrezzi di montaggio e diversi utensili.

Si perviene quindi alla conclusione che, nonostante le operazioni siano congelate ed i programmi CNC siano creati ad hoc, sia necessario settare la macchina ogni volta per garantire che il montaggio dei particolari risulti in conformità con le specifiche richieste dalla lavorazione da eseguire. Il

continuo set-up delle macchine prevede quindi che, una volta ultimata la lavorazione sul primo particolare questo venga inviato al reparto Collaudo per essere misurato e controllato. Se al termine della fase intermedia di collaudo il particolare risulta conforme alle specifiche l'operatore macchina otterrà il Benestare alla produzione e potrà proseguire con la lavorazione degli altri particolari del lotto con gli stessi parametri utilizzati per il settaggio del primo.

Qualora l'esito al controllo benestare risulti invece negativo per una o più caratteristiche, l'operatore dovrà prendere i dovuti accorgimenti, correggere i parametri per allinearsi alle specifiche, ripetere la lavorazione sul secondo particolare in ordine e inviare anche questo al controllo benestare. Il processo viene ripetuto il numero di volte necessario a far rientrare tutte le caratteristiche nei limiti di tolleranza dettati dal cartellino operativo ed i precedenti particolari dovranno essere rilavorati per risultare anch'essi conformi e poter proseguire con le successive rilavorazioni oppure, nel caso in cui una rilavorazione non sia possibile, dovranno essere scartati dalla produzione.

Si cerca in questo modo di evitare, tranne per particolari vitali che richiedano esplicitamente il controllo del 100% degli stessi presenti nel lotto e per i lotti a particolare singolo, una perdita di tempo ed un elevato costo legato alla qualità, controllando tutti i particolari prodotti nelle diverse fasi intermedie. Il principio è infatti quello di essere certi della bontà della lavorazione e della replicabilità della stessa, senza particolari deviazioni o errori, su tutti i particolari successivi a quello che ha ottenuto il benestare affidando il controllo al 100% all'operazione di collaudo finale che si svolgerà una volta che i particolari avranno ultimato tutte le operazioni previste a ciclo. Tale operazione risulta accettata ed approvata dal cliente in base alle norme vigenti sia in campo internazionale, sia a quelle specifiche del cliente e sia a quelle interne all'azienda produttrice.

Per ovviare comunque al possibile insorgersi di anomalie durante le lavorazioni, l'operatore macchina avrà a disposizione una serie di strumenti di misura, di calibri passa-non passa e di attrezzi appositamente creati per

eseguire un controllo diretto, o *autocontrollo*, su ciascun particolare lavorato. Inoltre, è previsto che in caso di sostituzione dell'utensile, di ripristino delle condizioni ottimali della macchina a seguito di manutenzione straordinaria successiva all'insorgersi di una qualunque avaria e/o fermo macchina in fase di lavorazione, il successivo particolare lavorato venga riportato nuovamente al collaudo per ottenere nuovamente il benessere. In alcune aeree relative a lavorazioni più critiche sono installati anche appositi macchinari di misura, quali tester e CMM, a disposizione degli operatori macchina che possono eventualmente controllare in modo completo e più preciso: le macchine hanno la possibilità di rilasciare appositi report di misura con il vantaggio di permettere un più chiaro "passaggio di consegne" tra operatori di turni consecutivi ed una minor dispersione di informazioni.

Il processo di controllo a benessere viene esplicitamente richiesto a ciclo per una serie di motivi: la corretta esecuzione della lavorazione ed il rispetto dei limiti di specifica è in questo modo garantito da un ente terzo (esterno all'officina); l'operatore macchina è in parte tutelato dal rischio di commettere errori di misura in fase di autocontrollo che potrebbero ripercuotersi su tutta la produzione causando danni; ed infine tutti i report rilasciati dall'apposito ente di collaudo e controllo qualità al termine dell'emissione del benessere hanno valore legale e vengono archiviati per fungere da prova in caso di necessità.

Trattandosi nel caso in esame del controllo di ruote dentate, esse saranno ottenute da barre di lega metallica attraverso una serie di operazioni successive di diverse lavorazioni ad asportazione di materiale quali processi di tornitura, fresatura, rettifica, foratura, dentatura ecc. Per ogni specifica fase di lavorazione del materiale mediante queste tecniche sarà previsto a ciclo il controllo a benessere dell'operazione. Un benessere di un'operazione di tornitura richiederà per esempio il controllo dimensionale di tutte le quote del profilo generato e di una serie di caratteristiche superficiali e geometriche quali rugosità, cilindricità, concentricità, oscillazione... Un'operazione di rettifica dell'ingranaggio richiederà invece il controllo di tutte e solo le caratteristiche relative a quella lavorazione:

- il rispetto del profilo evolvente ed il rispetto del valore massimo del diametro di inizio evolvente
- l'errore assiale di inclinazione dei denti rispetto all'asse pezzo ed il relativo errore di forma e di parallelismo tra qualunque coppia di denti della dentatura
- il valore di bombatura del dente e quello del suo centro (qualora sia prevista, si tratta di solito di bombatura circolare simmetrica)
- l'errore massimo di passo tra una qualsiasi coppia di denti adiacenti della dentatura ed il valore accumulato
- il valore del diametro interno (o di piede) e del diametro esterno (o di testa)
- il valore del raggio di raccordo di fondo dente ed il suo errore di forma
- il valore di concentricità della corona dentate (misurato al livello del diametro primitivo) rispetto all'asse del particolare costruito solitamente sulle superfici di vincolo quali le piste cuscinetto
- il valore dello spessore dente (o ampiezza vano) e/o il valore correlato di misura sui rulli o sulle sfere di dimensioni prestabilite
- il valore di rugosità della superficie del dente e del diametro di fondo dente.

Controllo a tappeto all'ispezione finale

Il controllo di tutti i particolari che giungono alla fine del loro ciclo di produzione viene eseguito dall'ente di collaudo e controllo Qualità. In questa fase si controlleranno tutte le quote, le caratteristiche e le specifiche richiamate oltre che dalle norme, anche dal disegno finale di dettaglio del particolare. Ogni quota è indicizzata tramite l'utilizzo di "balloni" numerici sequenziali che identificano in modo chiaro ed univoco ciascuna caratteristica. Ognuna di queste dovrà essere controllata e registrata attraverso l'utilizzo di apposite schede e report che, successivamente, saranno archiviate e serviranno a testimonianza della Conformità e della Qualità del particolare consegnato al cliente. Ciascuna caratteristica deve essere controllata tramite l'utilizzo di un determinato strumento o macchinario di misura o mediante una apposita tecnica esplicitati dalle norme di riferimento e dalle prassi aziendali. Alcune caratteristiche possono essere controllate e verificate alternativamente con strumenti di misura diversi e/o con macchinari diversi, ognuno dei quali restituirà dei valori più o meno accurati: si pensi per esempio ai calibri P-NP (passa-non passa) in grado di certificare solamente che la quota realizzata sia all'interno del campo di tolleranza ed alle CMM in grado invece di misurare quote con un'accuratezza di 10^{-7} metri.

In generale si possono suddividere i controlli in due macro-categorie in base al fatto che la misura sia fatta direttamente dall'operatore o mediante l'utilizzo di appositi macchinari semiautomatici di misura (semiautomatici perché è richiesto comunque l'intervento dell'operatore per il montaggio, la sostituzione e l'avviamento del macchinario):

- Controllo di Banco mediante l'ausilio del Piano di Collaudo (PdC)
- Controllo di macchina mediante l'utilizzo di appositi software

I valori misurati attraverso uno di questi metodi sono mutuamente esclusivi, nel senso che ogni caratteristica viene associata e deve essere rilevata attraverso uno solo di questi due metodi e non si può avere in alcun modo una

ripetizione o duplicazione della stessa per evitare di generare confusione ed errori.

Piano di collaudo per il controllo di banco

Il Piano di Collaudo è una matrice che ha sulle righe il numero del ballone di riferimento a quella determinata caratteristica e sulle colonne un numero sufficiente di caselle vuote dove verranno inseriti i Serial Number dei particolari misurati. Per aiutare la comprensione della misura da svolgere e per uniformare il metodo da utilizzare per il rilevamento della stessa, sono inserite altre cinque colonne che riportano esattamente:

- La collocazione del ballone sulla griglia alfanumerica del Disegno di Dettaglio e su quale foglio di esso qualora siano presenti più pagine
- Lo strumento o la tecnica da utilizzare per rilevare nella maniera la misura in questione
- Lo strumento alternativo utilizzato al posto di quello richiesto per il rilevamento di quella caratteristica
- La percentuale di particolari da controllare relativamente a quella caratteristica in funzione del fatto che questa sia vitale (controllo sul 100% dei particolari e successiva registrazione formale della quota rilevata) o secondaria (controllo ad un numero inferiore del 100% dei particolari e, per quelle meno importanti, la possibilità di non dover registrare un determinato valore)
- Lo spazio dove apporre il timbro che certifica l'avvenuta misurazione della caratteristica.

Un ulteriore accorgimento di queste schede di collaudo per snellire il lavoro dell'operatore addetto al controllo qualità è quello di ordinare le caratteristiche per strumento o tecnica di misura – e non in ordine crescente del numero dei balloni. Se da una parte questa cosa genera una trascurabile difficoltà nella ricerca del ballone (ridotta moltissimo dall'indicazione della

sua ubicazione in una determinata area della griglia del disegno), dall'altra facilità le operazioni che l'operatore deve svolgere perché, una volta che egli ha recuperato ed azzerato lo strumento di misura, potrà svolgere le misure di tutte le caratteristiche di tutti i particolari rilevabili attraverso il suo utilizzo prima di posarlo nuovamente e recuperare il successivo. Un vantaggio di questo sistema è di non dover tenere contemporaneamente sul proprio banco di lavoro tutti gli strumenti necessari, generando confusione e disordine, e di lasciare disponibili quelli non attualmente utilizzati per i colleghi. Questo genera anche un vantaggio per l'area che non deve procurarsi troppi strumenti dato che, qualora quelli disponibili siano in utilizzo, l'operatore che li necessita potrà svolgere le altre misure utilizzando invece quelli liberi a disposizione.

Ogni collaudatore è provvisto di un timbro che riporta un codice identificativo ad esso associato e, al termine della misura, dovrà apporlo nell'apposita casella. Questo sistema permette agli operatori di misurare tutte le quote possibili durante il loro tempo a disposizione e a quelli che daranno loro il cambio di capire esattamente quali caratteristiche saranno già state controllate e quindi di proseguire con le successive evitando di replicare duplicando le rilevazioni inutilmente.

Qualora l'operatore rilevi delle anomalie nelle misure dovrà redigere un apposito *Foglio Anomalie* dove dovrà registrare in maniera molto accurata il numero del ballone, la sua posizione all'interno della griglia ed eventualmente il numero del foglio del disegno, l'indicazione della caratteristica da misurare ed i valori del campo di tolleranza richiesti dal disegno, il valore anomalo reale riscontrato ed il codice seriale del particolare sul quale è presente l'anomalia. Al termine del processo di collaudo, un apposito addetto valuterà tutte le anomalie in esso registrate e si occuperà di disporre le azioni correttive da intraprendere.

Programmi di ispezione tramite CMM

Le macchine di misura a coordinate (CMM), come verrà descritto più avanti nel dettaglio, hanno delle grandi potenzialità e vengono spesso adoperate per sostituire i metodi tradizionali di collaudo di banco e ridurre i tempi degli stessi, per uniformare e standardizzare le misure su tutti i particolari di un lotto e per garantire un report di misure che sia possibile archiviare per tenere più facilmente traccia delle misure effettuate.

Dopo aver effettuato tutti i preparativi ed il set up macchina, bisogna montare il particolare seguendo le istruzioni della scheda di montaggio relativa ad esso e caricare il programma di misura richiesto. I programmi di ispezione sono una lista di elementi selezionati tra tutte le possibili caratteristiche del particolare che la macchina sia in grado di rilevare in quelle particolari condizioni di montaggio. I *Part Program*, come vengono anche tecnicamente chiamati, sono creati ad hoc per ogni determinato particolare da personale tecnico abilitato e vengono poi salvati in un database aziendale in rete dal quale si possono richiamare nel momento del bisogno. Si compongono principalmente, in base al software specifico di interfaccia con il sistema di controllo della macchina, di alcuni menù che permettano di visualizzare il “*Piano di misura*” ossia l’elemento più importante dal quale è possibile osservare quali misure verranno effettuate, con quale combinazione di tastatori, con quale modalità e velocità. Una volta effettuato il checkup dei dati e degli elementi necessari, l’operatore può far partire il ciclo automatico CNC di ispezione del particolare.

Diversi particolari richiedono diverse caratteristiche di misura e ogni particolare potrà essere misurato anche diverse volte in differenti fasi del ciclo di lavorazione, ognuna delle quali avrà magari tolleranze diverse per uno stesso elemento (particolare grezzo o finito) o richiederà il controllo di quote che dopo non dovranno essere più ripetute se risultassero conformi alle specifiche.

Il primo passo è quindi quello di stilare una lista di tutte le caratteristiche da rilevare, trasformarle in funzioni macchina ed implementarle nel programma

di ispezione. Le CMM sono in grado di misurare sia le caratteristiche costruttive dimensionali del particolare, sia le caratteristiche delle dentature e delle filettature. Per l'analisi delle dentature si necessita di tutte le informazioni relative ad essa e la macchina crea un proprio metodo ottimale di verifica di tali parametri restituendo in output un report molto dettagliato per ogni dentatura presente. Le caratteristiche da misurare e da implementare nei programmi sono scelte con molta cura perché bisogna valutare il trade off tra rapidità, accuratezza e ripetibilità della misura e possibilità della macchina di misurare ed elaborare in modo corretto ogni caratteristica selezionata. Si originano infatti dei vincoli alla possibilità di misura in base al sistema di tastatori utilizzato, al vincolo di montaggio e serraggio dei particolari in macchina e ai possibili sottosquadri che si generano. I programmi di macchina velocizzano ed accrescono il controllo di banco delle caratteristiche più importanti e difficili da rilevare (si pensi a tutte le tolleranze geometriche e di forma) ma lasciano al controllo in manuale o con altri metodi automatici la misura di caratteristiche secondarie o impossibili da rilevare in quelle determinate situazioni di lavoro.

Il format del report è composto da una o più pagine intestate con tutti i dati del particolare e del programma di misura utilizzato seguito dalla lista degli elementi e delle caratteristiche rilevate. Queste vengono presentate in una serie di colonne riportanti il numero del ballone di riferimento, la specificazione della caratteristica – se si tratta di un diametro, una distanza, una superficie, una planarità, una rotondità, una posizione ecc. – il valore target, il limite inferiore di specifica (LSI), il limite superiore di specifica (LSS), il valore di deviazione standard della misurazione ed il valore di deviazione del valore reale dal valore target comprensivo del valore d oltre tolleranza qualora la quota fosse anomala. Il report relativo alle dentature è invece specifico del software utilizzato e compatibile con la macchina ma in linea di massima si tratta della rappresentazione in ordine ed in modo compatto delle diverse caratteristiche fondamentali della dentatura. Nonostante una diversa impostazione del format di stampa dovuta all'ordine, alla diversa scala ed accuratezza grafica degli elementi ed ai colori utilizzati per la rappresentazione degli stessi, report di macchine diverse risultano

facilmente confrontabili tra loro e questo permette di effettuare verifiche di uno stesso elemento su sistemi differenti e di poter mettere a confronto gli output tra loro senza perdita di accuratezza e formalità nei dati. Per verificare la compatibilità delle diverse macchine tra loro si effettuano dei controlli incrociati in modo che la variabilità delle misure stia al di sotto di una certa percentuale. Tale metodo di verifica delle correlazioni incrociate dei dati prende il nome di *Cross Correlation* e certifica l'intercambiabilità dei sistemi di misura automatici. In ogni caso, programmi di ispezione su macchine diverse che garantiscano la stessa precisione di misura, devono poter misurare gli stessi elementi in modo che non ci sia una perdita di informazione dovuta alla non completezza dei dati raccolti.

Descrizione dei metodi di controllo delle caratteristiche del prodotto

Controllo dimensionale

Controllo con CMM

Le macchine di misura a coordinate (CMM) possono essere di diversi tipi, modelli e marchi ma le più utilizzate sono le macchine a tre assi a portale. Tali macchine sono composte da un corpo centrale sul quale è posizionato un blocco di granito che garantisce stabilità alla macchina e sopra esso viene solitamente montato un plateau di metallo, ossia una griglia con una serie di fori in cui poter montare diversi attrezzi di supporto e di tenuta del particolare. La parte mobile è composta da un portale, ovvero da una traversa mobile lungo l'asse longitudinale principale (asse x del piano cartesiano) mentre la testa porta-tastatore, ad essa collegata, scorre lungo gli altri due assi (y e z): lo spazio di misura è quindi un parallelepipedo delle dimensioni della corsa degli della macchina. In aggiunta a tale sistema vi è una tavola rotante che permette di verificare particolari in rotazione cioè di raggiungere più agilmente determinati punti altrimenti impossibili per via di possibili sottosquadri e si può affermare che questo permetta un grado di libertà in più alla macchina in particolari applicazioni.

L'interfaccia con la macchina è realizzata tramite particolari software e ogni produttore fornisce quello necessario insieme alla macchina. Non è solitamente necessario un particolare linguaggio di programmazione poiché il software garantisce una serie di comandi grafici, di funzioni, di elementi e

di caratteristiche che rendano immediati la comprensione e l'utilizzo del programma. Nonostante questo, è necessario comunque conoscere il modo in cui la macchina agisce e ragiona, ossia è importante capire come realizzare l'obiettivo di misurazione del particolare tenendo presenti i vincoli e le caratteristiche della macchina. Per ovviare a particolari problemi nella gestione delle misure, addetti qualificati sovrintendono alla creazione di appositi programmi di ispezione con l'intento di garantire una misura conforme alle norme, senza problemi, uniforme e standardizzata per l'utilizzo da parte di qualunque operatore.

Ogni elemento verrà quindi valutato dalla macchina e confrontato con il modello CAD del particolare di cui la macchina conoscerà il valore target, i limiti di tolleranza dimensionali ed i valori delle tolleranze geometriche richieste per quel dato elemento. Il primo step richiede di montare una combinazione di tastatori in grado di poter svolgere la rilevazione di tutte le caratteristiche richieste dal programma. Ogni tastatore o *probe* è un composto di un gambo in metallo con un'estremità filettata, che potrà essere appositamente avvitata sul piattello porta-tastatore, e all'altra estremità è innestata una sfera di rubino industriale di diverse dimensioni. La sfera in rubino è adatta alla misura di particolari in lega di acciaio poiché risulta molto resistente all'usura che si genera quando le parti sono in strisciamento e la dimensione e la sfericità sono di elevata precisione. Il gambo filettato potrà essere inoltre collegato a delle estensioni di diversa lunghezza e ad alcune altre snodabili permettendo così anche particolari inclinazioni e rotazioni spaziali rispetto a tutti e tre gli assi del sistema. Ogni combinazione è serializzata e potrà essere utilizzata per uno o più programmi, anche di particolari diversi, ogni qualvolta risulti adatta alla misura delle caratteristiche richieste.

La macchina conosce il suo volume di lavoro rispetto al suo *zero macchina* (machine zero point) ma necessita di una *sfera di calibrazione* e di un *master probe* - appositi e unici per quella macchina - per poter calibrare la combinazione e conoscere, rispetto allo zero macchina, sia le dimensioni della sfera del tastatore sia le loro posizioni relative e l'ingombro totale dell'intera combinazione in modo da evitare collisioni accidentali e rispettare il volume

di sicurezza generato intorno ai sistemi di supporto ed ai particolari montati in macchina. La calibrazione di tutti i tastatori avviene in serie e può essere eseguita in manuale, in semi-automatico o in automatico. Ogni probe viene messo a contatto con la sfera di calibrazione – di cui la macchina conosce l'esatta posizione e le caratteristiche dimensionali e di forma – e, con almeno una serie di sei punti in calibrazione manuale e fino a oltre una trentina in calibrazione automatica tensoriale, la macchina è in grado di rilevare il diametro e la posizione del testatore. Il procedimento deve essere ripetuto per tutti i tastatori della combinazione e si otterrà in output un protocollo di misura dove sono esplicitate tutte le caratteristiche del probe e la deviazione standard relativa alla misura. Questo ultimo valore è il più importante e va osservato attentamente ed interpretato correttamente poiché fornisce molte indicazioni sulla bontà della calibrazione e delle successive misure che verranno rilevate attraverso di esso. Si ritiene normalmente accettabile una deviazione standard (σ) dell'ordine del micrometro (10^{-6} m) ma è auspicabile un sigma inferiore, dell'ordine del decimo di micron – l'unità di misura minima che la macchina riesce a garantire con una certa precisione. Valori superiori possono invece indicare che la sfera di calibrazione o il probe possono essere sporchi, oppure scheggiati o addirittura che il gambo del probe non è stato sufficientemente ben serrato da garantire una rigidità adatta alle tensioni a cui verrà sottoposto. Va notato che la macchina applica una forza di pressione sulla superficie da tastare inferiore al Newton [N] e, solitamente viene scelta una forza di 0.2 N. Ogni ciclo di misura può altresì richiedere l'utilizzo di diverse combinazioni di tastatori che dovranno essere tutte accuratamente tarate e posizionate in una griglia a fondo macchina che ha la funzione di *magazzino tastatori*: la macchina eseguirà in automatico il cambio tastatori a magazzino ogni qual volta il ciclo di misura CNC lo richieda. Le macchine sono inoltre provviste di *sonde di temperatura*: si tratta di due sonde magnetiche che vengono attaccate sul particolare metallico per un breve lasso di tempo e che rilevano la sua temperatura superficiale. Nei programmi di ogni particolare sono implementati i coefficienti di dilatazione termica lineare e volumica relativi alla particolare lega di cui è fatto il pezzo ed il software riesce a compensare la differenza di temperatura del pezzo rilevata tramite le sonde ed il valore standard di 20 °C richiesto per il controllo. In tale modo la

macchina è in grado di riportare l'effettivo valore riscontrato in fase di misura al valore teorico che esso avrebbe se il particolare si trovasse esattamente a 20°C e di poterlo quindi confrontare con il valore target imposto. Bisogna comunque tenere presente che maggiore è la differenza di temperatura, minore è l'efficienza di compensazione delle sonde e maggiori sono gli errori di trasformazione che si possono generare; quindi è sempre buona prassi portare il particolare ad una temperatura molto vicina al valore normale e poi aiutarsi con la compensazione della macchina per raggiungere risultati più affidabili.

Una volta ultimati i preparativi e messo il particolare nella posizione richiesta dalla *scheda di montaggio* e vincolato al piano macchina o alla tavola rotante attraverso l'ausilio di appositi mandrini, si necessita di fornire alla macchina almeno due misure note in modo che essa sappia con esattezza quale sia la *work-position* del particolare: solitamente si tratta almeno di un diametro o di una superficie per creare un piano teorico e di un punto in modo da vincolarne l'altezza. Il programma di ispezione è ora in grado di agire indipendentemente e, una volta che viene lanciato, inizia la serie di misure in automatico al termine della quale verrà emesso un particolare protocollo del report di misura sul quale saranno indicati tutti i dati utili relativi alla misura, come descritto precedentemente. L'addetto al controllo dovrà valutare attentamente tutti i risultati del programma e, qualora vi siano delle anomalie nelle misure ottenute, potrà procedere alla loro verifica con un metodo alternativo o con il medesimo: si ha infatti la possibilità di effettuare anche una sola misura o una serie indipendente di esse dell'intero pacchetto di caratteristiche selezionando solo quegli elementi a cui si è interessati senza dover necessariamente ripetere l'intero ciclo di misura. A volte capita infatti che vi sia una presenza di impurità e di sporcizia sul particolare e, a seguito della valutazione dell'esito della misura del ciclo CNC - ci si accorge facilmente di questa condizione osservando elevati valori di deviazione standard oppure da picchi insoliti nel report grafico dell'elemento - e si può procedere quindi ad un'accurata pulizia del particolare ed alla verifica della conformità di quell'elemento senza dover necessariamente ripetere anche le altre caratteristiche. Il protocollo di misura viene stampato e archiviato a prova della bontà delle caratteristiche del

particolare mentre le eventuali anomalie riscontrate vengono riportate su un apposito foglio anomalie, cartaceo o elettronico, e saranno successivamente valutate.

Oltre alle tradizionali macchine di misura a portale ve ne possono essere altre in grado di svolgere diverse funzioni più o meno complesse. Un esempio di queste sono le macchine di misura create ad hoc per la misura più corretta di caratteristiche derivanti da una specifica lavorazione. Alcuni costruttori di macchine utensili CNC, infatti, hanno anche progettato delle CMM correlate in grado di ricevere i parametri di lavorazione dalla macchina utensile, di misurare nella maniera più corretta il particolare realizzato e, in base al confronto tra le quote reali rilevate e quelle target teoriche, sono in grado di fornire dei suggerimenti per le modifiche da apportare al programma CNC in modo da avere un miglior risultato atteso dopo la lavorazione del particolare successivo o la rilavorazione dello stesso. Questi sistemi sono ormai molto in voga e derivano da un successivo miglioramento delle capacità stesse delle macchine in CNC che, grazie ad un apposito sistema di tastatori inserito nel magazzino utensili sono in grado di andare a rilevare automaticamente le quote pre o post lavorazione ad ogni step previsto dal ciclo CNC per offrire all'operatore una visione in tempo reale della situazione e dei risultati ottenuti oltre che di evitare autonomamente di commettere errori di lavorazione rispettando parametri standard anziché autocorrettivi.

Altre macchine, come per esempio l'evolvimetro, sono appositamente pensate per il collaudo di particolari cilindrici che presentino ingranaggi cilindrici o innesti scanalati a profilo di evolvente. Sono infatti macchinari che, tramite una moto di strisciamento relativo tra il sistema di tastatori ed i denti, sono in grado di riprodurre la fase di ingranamento a cui esso sarà sottoposto e di rappresentare in output, attraverso delle trasformazioni matematiche e geometriche, un risultato facilmente comprensibile dall'operatore e di facile confronto con i risultati ottenibili dalle classiche prove di giochi e contatti, ormai quasi in disuso.

Le CMM garantiscono un'elevata precisione ed accuratezza, un'ottima sensibilità ed una sensazionale ripetibilità della misura come vedremo

successivamente, oltre ad una discreta rapidità di esecuzione del ciclo di misura. Per questi ed altri motivi il loro impiego è molto apprezzato e, a mano a mano che il progredire tecnologico permette loro di svolgere funzioni sempre più complesse, esse stanno rapidamente rimpiazzando i classici metodi di misura manuali attraverso l'utilizzo di strumenti da banco.

Il loro impiego, insieme al contributo offerto da software sempre più completi e all'avanguardia, permette di evitare le prove di ingranamento al banco prova che potrebbero rigare e/o compromettere lo stato superficiale del particolare prima che questa venga venduto al cliente: si pensi infatti a particolari processi di rivestimento della dentatura con film di argento e a come una prova fisica di rotolamento possa compromettere lo stato della superficie. In questo modo inoltre è anche facile e conveniente misurare e collaudare tutti quei particolari che non verranno direttamente montati nella scatola ingranaggi in azienda – sottoposta necessariamente al banco prova prima della vendita - ma che saranno spediti al cliente singolarmente (o in singoli moduli: cioè un numero limitato di particolari della catena di trasmissione vincolati costruttivamente tra loro e poi integrabili con il resto della scatola) e che devono risultare conformi all'accoppiamento senza avere la possibilità di provarli con le rispettive coppie in azienda.

Come già detto in precedenza, i controlli di CMM devono essere svolti per tutte quelle caratteristiche che richiedano un'elevata precisione o che risultino complicate nel rilievo attraverso i classici strumenti e metodi da banco. Per il rilievo di una caratteristica dimensionale quale un diametro o una superficie la macchina necessita del rilievo di almeno 4 punti per il quale tracciare l'elemento teorico che meglio rappresenta la reale geometria della superficie. Per altre caratteristiche quali le distanze invece bastano solo 2 punti. Per effettuare invece il controllo delle caratteristiche geometriche, ovvero delle tolleranze di forma, sarebbe meglio fornire alla macchina una serie più elevata di punti e questo si può ottenere attraverso una scansione continua della superficie del particolare. La macchina si avvicina ad un punto noto e, una volta riconosciuto il contatto con la superficie, se il particolare è montato su tavola girevole, questa viene messa in rotazione e il tastatore garantisce una forza di tensione equilibrata permutando il movimento relativo tra le parti in

una rilevazione continua di punti. Qualora invece i particolari siano fissati sul plateau e non siano in grado di ruotare sarà la macchina stessa a muoversi ad esso interpolando continuamente gli assi per garantire un effettivo contatto con il particolare.

La prima operazione svolta dalla macchina è quella di costruire l'allineamento del particolare in modo da allineare al suo asse principale i propri assi macchina e spostare in modo temporaneo anche il suo punto di origine delle coordinate sovrapponendolo a quello del particolare. Per fare ciò la macchina rileva gli elementi che compongono i riferimenti principali del particolare e, per i particolari cilindrici di rotazione, l'allineamento viene fatto costruendo l'asse teorico generato in due sezioni circolari del pezzo – solitamente si tratta di almeno due diametri delle piste cuscinetto sulle quale verrà vincolato il particolare in fase di montaggio – oppure di una sezione circolare e di un piano – solitamente si tratta di un diametro preciso della pista cuscinetto e di uno spallamento della stessa che ha la funzione di vincolo di scorrimento assiale, ovvero di appoggio, del cuscinetto.

Per i particolari fissati su tavola rotante invece l'allineamento risulta più complesso poiché bisogna sovrapporre l'asse della tavola all'asse pezzo almeno in due posizioni angolari – solitamente a 180° - per evitare un movimento giroscopico dell'asse pezzo. In questo modo si riesce però a compensare il disallineamento dell'asse pezzo in fase di rotazione modulando continuamente il suo orientamento.

Avendo spostato l'origine degli assi sull'asse pezzo, risulta più facile rilevare le misure su particolari cilindrici di rivoluzione ed analizzare tutte le tolleranze geometriche di posizione come run-out, concentricità, posizione, perpendicolarità ecc. I piani ed i cerchi verranno adesso generati in modo che l'asse pezzo coincida con la normale al piano generato o che contiene il cerchio. Si è così in grado di simulare l'effettivo montaggio e funzionamento del particolare riducendo la necessità di lunghe prove di banco.

Nel prossimo capitolo si cercherà di dare un'idea più chiara dei metodi di misura ottimali per ogni caratteristica entrando meglio nel dettaglio.

Controllo di banco

Il controllo di banco prevede l'utilizzo di tutto lo spettro di possibili strumenti di misura da banco e di strumenti manuali. Questi strumenti e metodi tradizionali sono sempre più minacciati dallo sviluppo tecnologico di macchinari di misura automatici e ad elevate performance ma, dato il costo di questi ultimi che viene spiegato solo per volumi di produzione decisamente ampi, gli strumenti di misura classici vengono attualmente utilizzati presso che in tutte le officine. Il loro vantaggio è anche quello di poter essere facilmente tenuti ed utilizzati a bordo macchina in officina per le verifiche ed i controlli in corso di lavorazione mentre le grandi macchine di misura necessitano di ambienti asettici, climatizzati e molto ampi. Per questi e tutta una serie di altri motivi si continua a sviluppare strumenti di misura da banco sempre più all'avanguardia che permettano precisione ed accuratezza sempre più fini.

Il controllo dimensionale di banco prevede il rilievo ed il controllo di tutte le caratteristiche richieste sul Piano di collaudo. Tale piano, come già detto, è provvisto di un'apposita colonna nella quale viene consigliato all'operatore il metodo o lo strumento più adatto al controllo di quella caratteristica. Nulla vieta comunque di utilizzare strumenti alternativi qualora l'utilizzo di quello consigliato sia impossibilitato: risulta maggiormente apprezzato l'utilizzo di uno strumento più accurato, più preciso e più sensibile mentre è vietato l'utilizzo di uno strumento meno sensibile. Risulta quindi positivo l'utilizzo di un micrometro da banco al posto di un nonio a corsoio poiché si garantisce una più elevata sensibilità di misura riuscendo ad apprezzare un valore di un'unità di misura inferiore e quindi una maggior precisione ed accuratezza nella rilevazione del valore reale mentre è sbagliato fare il contrario perché si incorre in una perdita di informazioni fondamentali impoverendo la misura. Un ulteriore esempio è il seguente: da un punto di vista puramente dimensionale, non tenendo quindi conto degli errori di forma del particolare, è preferibile utilizzare un micrometro per interni per rilevare l'esatta quota di un diametro anziché utilizzare un semplice *calibro passa-non passa* ma in

questo caso si incorre invece nella perdita di informazioni inversa. Il calibro garantisce sia il rispetto delle tolleranze dimensionali previste sia di quelle di forma: il lato *non passa* è costruito sul valore del limite di specifica superiore (LSS) mentre il lato *passa* è costruito sul valore del limite di specifica inferiore (LSI) e deve poter scorrere lungo tutto il profilo cilindrico verificando contemporaneamente di non incorrere in errori di forma quali restringimenti lungo il profilo o curvatura di questo ecc. Per poter effettuare lo stesso tipo di controllo con un micrometro da interni bisognerebbe rilevare una serie di misure lungo tutto il profilo cilindrico dell'elemento ed in una serie di posizioni angolari diverse. Questo richiederebbe un grande dispendio di tempo e genererebbe confusione dovendo confrontare diversi rilievi per poi restituire una media del valore comunque priva di utili informazioni se non di un valore numerico che invece il calibro passa-non passa non è invece in grado di indicare.

A fronte di queste utili osservazioni, l'esperienza insegna che esistono strumenti più o meno sensibili, più o meno precisi ed accurati ma, principalmente, che esiste uno strumento o un metodo più adatto di altri per carpire in modo più opportuno le caratteristiche di un elemento effettivamente utili per il suo controllo. Un buon addetto al controllo Qualità ha quindi il compito ed il dovere di eseguire le misure più appropriate per fornire le minime informazioni necessarie a deliberare il particolare in maniera conforme alle norme aziendali ed alla normativa di riferimento.

Per la valutazione di tutte le caratteristiche è disponibile un'ampia gamma di strumenti di misura da banco ed è normalmente previsto che il controllo, per esempio, di una quota con tolleranza centesimale (10^{-5} m) venga effettuato con uno strumento in grado di garantire una sensibilità maggiore, cioè di fornire un valore di un'unità di misura inferiore e quindi un micrometro per esempio. Il limite tecnico impone però che tolleranze dell'ordine del micron vengano rilevate con strumenti in grado di leggere questi valori e si richiede solo di utilizzare quelli a disposizione con la più alta precisione possibile o, in alternativa, di eseguire il controllo con le CMM in grado di dare una lettura (anche se poco affidabile dato che l'errore macchina è dell'ordine di $1,6 \cdot 10^{-5}$

⁶ m) dell'ordine del decimo di micron o, comunque, di garantire maggior precisione ed accuratezza.

Tutti gli strumenti di misura con elevata risoluzione necessitano di essere azzerati e tarati su elementi di riscontro molto precisi: si tratta dei blocchetti di riscontro, o *blocchetti Johnson*, per gli strumenti da esterno o degli anelli di riscontro per gli strumenti da interno. Altri invece possono richiedere l'utilizzo di un calibro orizzontale per altezze, o *altimetro*, millesimale per essere tarati. Essi vengono tarati su un valore noto del campo di tolleranza (LSI, LSC o LSS) e, in fase di misura, lo scostamento letto sull'orologio analogico o dal display digitale, fornisce il valore di deviazione da valore noto. Altri strumenti invece non necessitano di essere azzerati in alcun modo come nel caso dei tamponi o anelli lisci passa-non passa, degli anelli o dei tamponi filettati, delle spine calibrate per la verifica dei fori, o degli anelli e dei tamponi scanalati poiché essi sono certificati dall'apposito reparto di metrologia per garantire un corretto controllo.

Altre quote di banco possono essere rilevate attraverso strumenti, metodi e/o macchinari alternativi ai classici strumenti da banco. Un raggio o uno smusso, per esempio, possono essere confrontati con delle apposite maschere metalliche appositamente rettificate che ricreano il negativo dell'elemento e dette comunemente "*raggiere*". Si appoggia la raggiera sull'elemento da verificare e si osserva se essa combacia perfettamente con la superficie o se nel punto centrale di contatto passa la luce: in questo caso quella misura di maschera è troppo grande e bisogna selezionarne una di una unità inferiore. Questo strumento ha una bassa risoluzione ed una precisione molto ridotta e che vengono ulteriormente amplificate dalla capacità dell'operatore di usarlo in maniera corretta perciò viene utilizzato per il controllo di caratteristiche di importanza secondaria e con ampi margini di tolleranza.

Uno strumento molto utile invece per rilevare profili molto lunghi, complessi o punti di intersezione teorici è il *profilometro/rugosimetro*. Si tratta di uno strumento nel quale una testa scorrevole e reclinabile ha la capacità di scorrere lungo due assi principali e di seguire, attraverso l'utilizzo di appositi tastatori e l'applicazione di una certa forza di pressione, il profilo del particolare. Un

software importa i dati su un computer e l'operatore potrà modularli, interrogando la macchina attraverso una serie di specifiche funzioni, per ottenere il valore di tutti gli elementi e delle caratteristiche del profilo. Si riescono a misurare una lunga serie di elementi quali distanze, angoli, raggi e punti di intersezione oltre ad alcune caratteristiche geometriche quali la rettilineità e l'ortogonalità. Qualora si tratti di dover misurare sottosquadri ed elementi più complicati, specialmente nei profili interni dei particolari, è possibile costruire anche solo un profilo parziale mediante l'utilizzo di apposite cere e/o resine per ottenerne e valutarlo con più semplicità al profilometro.

Questa macchina permette inoltre, attraverso il cambio dei tastatori, di eseguire anche i rilievi di rugosità sulle superfici lavorate e di poterle visualizzare e valutare, attraverso il software, selezionando tutte le voci di interesse da una lunga serie di opzioni in base alle specifiche richiamate dalla norma di riferimento applicata a quel determinato particolare.

Controllo con macchine di misura ottiche

Per introdurre il concetto di funzionamento che sta alla base delle macchine di misura ottiche di nuova generazione partiamo dalla descrizione del loro primo prototipo: il proiettore. Esso è un macchinario statico formato da una sorgente di luce (una lampadina), una slitta mobile che può scorrere lungo i tre assi principali del piano cartesiano e che può compiere una rotazione lungo intorno all'asse verticale, sia in senso orario sia in senso antiorario, su un arco di pochi gradi; un corpo centrale all'interno del quale risiede un sistema di lenti e di specchi, uno schermo opaco di proiezione circolare ed infine un pannello provvisto di display digitale che esprime le coordinate della slitta rispetto al suo punto di zero tavola oppure rispetto al punto di azzeramento fornito dall'operatore.

Per prima cosa si sceglie l'ingrandimento che si vuole ottenere sullo schermo e si inserisce la lente corrispondente al valore desiderato: solitamente esse sono prodotte in set standard con ingrandimenti a 10x, 20x, 50x e 100x. Si posiziona quindi il particolare sulla slitta e si accende la sorgente luminosa. Un fascio di luce colpisce il particolare e l'ombra prodotta viene raccolta, amplificata dalla lente di ingrandimento e reindirizzata sullo schermo opaco dal sistema di specchi all'interno della macchina. Attraverso l'ausilio delle guide della slitta si deve posizionare il pezzo in maniera che l'immagine proiettata sullo schermo risulti il più chiara e nitida possibile allontanandolo oppure avvicinandolo alla sorgente luminosa.

Una volta messo a fuoco il particolare si può iniziare la misurazione del pezzo. Si sposta a destra o a sinistra e in alto o in basso la slitta e si prendono le distanze azzerando la corsa degli assi in un punto noto dell'immagine proiettata del pezzo ogni qualvolta se ne abbia la necessità.

In questo modo è facile rilevare tutte le quote esterne del particolare non soggette a sottosquadro; si possono misurare i raggi con l'ausilio di un disco trasparente graduato avente una serie di cerchi concentrici in cui viene numerato in modo differente il valore corrispondente all'ingrandimento selezionato; si possono misurare gli angoli ruotando il disco dello schermo in modo da allineare le sue linee assiali con l'immagine proiettata della superficie inclinata e leggere il valore di rotazione su una riga circolare fissata esternamente allo schermo; infine si possono facilmente leggere i punti di intersezione avendo noti il diametro o la distanza da un punto di riferimento. Per tutti gli elementi che non si riescono a proiettare sullo schermo è possibile, invece, riprodurre il negativo con la cera o con la resina (stesse considerazioni fatte per l'utilizzo del profilometro) e visualizzare solo questo in dettaglio tramite il proiettore.

Il grosso problema di queste macchine è la scarsa precisione poiché la messa a fuoco del particolare risulta essere molto soggettiva e, nonostante la precisione centesimale degli assi della tavola scorrevole, la ripetibilità e l'accuratezza della misura risultano poco soddisfacenti. Il suo utilizzo è limitato infatti a misure di quote non critiche dove il campo di tolleranza è

molto ampio e dove si riesce comunque ad avere una buona messa a fuoco della superficie.

La nuova concezione di queste macchine invece ha permesso di eseguire queste operazioni in modo completamente automatizzato. Modelli all'avanguardia come la *Laser Optik* sono composti di un corpo centrale a cabina alla base del quale, al centro, vi è una tavola rotante sulla quale possono essere posizionate delle punte di diverse dimensioni. Nella parte superiore una guida scorrevole, invece, possiede una contropunta e, regolandosi in altezza, permette il serraggio di diversi particolari di rivoluzione. Non vi sono limiti alle dimensioni ed alla forma dei particolari, se non che quelli generati dagli ingombri fisici e dalla massima corsa della macchina e dal fatto che essa non è in grado di misurare elementi e caratteristiche interne al particolare o sottosquadri generati al suo esterno. La parte più importante della macchina è composta da una slitta mobile con una serie di telecamere e di lenti e che comunica direttamente con il computer di bordo della macchina.

Per effettuare una misura si può procedere in due modi:

- a) Qualora non sia già presente il programma con il ciclo di misura, si può inserire il particolare in macchina e serrarlo sulle punte. Sulla contropunta mobile è presente un lettore che definisce alla macchina l'altezza dal punto di zero e limita la corsa della slitta ottica al solo particolare evitando di causare anomalie nella rilevazione del particolare. Si apre un foglio bianco sul menù dei programmi della macchina e si avvia la misurazione automatica. La macchina mette in rotazione il particolare ad un predeterminato numero di giri ed il gruppo ottico scorre lungo l'asse pezzo fino a quando non è riuscito ad elaborare tutte le possibili quote rilevabili.

Il software elabora i dati raccolti, presenta un'immagine del particolare con la quotatura dei principali elementi e apre un menù con le altre quote di dettaglio rilevate. L'operatore può intervenire su ognuna eliminandola – qualora essa debba essere rilevata con un altro strumento o macchina – oppure, selezionandola, potrà definire i

parametri del valore centrale target e del campo di tolleranza. Per ogni elemento è selezionabile anche la lista delle tolleranze geometriche che la macchina è in grado di fornire e anche queste possono essere appositamente quotate. Una volta eseguito l'intero controllo e dopo che è stata stilata la lista delle caratteristiche di interesse, si può salvare il programma che potrà poi essere nuovamente utilizzato per il controllo in momenti diversi degli stessi particolari. Si riavvia il ciclo di misura e la macchina fornisce questa volta un report dettagliato dei valori di tutti gli elementi della lista con il codice a disegno (ballone), il valore reale e la deviazione dal Limite di Specifica Centrale.

- b) Si procede al serraggio del particolare in macchina e si carica il programma ad esso relativo già costruito in precedenza e memorizzato sul computer. Si avvia la misura e si valutano gli esiti del report.

Tali macchine risultano essere molto veloci e molto precise: esse hanno una risoluzione dell'ordine del micron ed un eccellente mix di precisione ed accuratezza, inoltre impiegano solo pochi minuti per rilevare un numero considerevole di quote. Il loro impiego è però poco sviluppato poiché il loro limite è quello di non riuscire a rilevare quote in presenza di sottosquadri, di non riuscire a misurare le caratteristiche delle dentature e di presentare problemi qualora sulle superfici siano ricavate gole e fresature di qualunque tipo che, una volta messe in rotazione, genererebbero nella misurazione della macchina delle anomalie di forma.

Tali macchine sono comunque in grado di misurare accuratamente anche elementi molto precisi e, dati la possibilità di ripetere in serie moltissimi particolari diversi, il poco tempo impiegato nel ciclo di misura oltre ad un utilizzo molto semplice ed immediato, vengono spesso adoperati in un ambiente come quello di riferimento poiché eliminano un più lungo, costoso e meno preciso controllo attraverso i classici metodi di misura manuale dei particolari.

Si è visto finora come sia possibile, attraverso l'utilizzo di particolari accorgimenti e tenendo conto delle diverse implicazioni sopra citate e di molte altre ancora, poter misurare una serie di caratteristiche dimensionali adoperando indifferentemente e/o alternativamente una fra le tante possibilità offerte dalla metrologia per le misurazioni di caratteristiche dimensionali e costruttive. Vediamo ora altri 2 aspetti che invece sono fondamentali per il Controllo Qualità ma che non hanno, ad oggi, alcun metodo sostitutivo.

Controllo visivo

Il controllo visivo consiste nella verifica della conformità superficiale del particolare: l'obiettivo è quello di verificare che tutte le parti, sia interne che esterne, siano prive di non conformità. Esistono apposite norme, sia interne all'azienda che norme di riferimento internazionali, che stabiliscono se una serie di difetti di lavorazione o difetti accidentali siano accettabili o meno.

Si va in generale ad osservare che tutta la serie di lavorazioni subita dal particolare sia avvenuta nella maniera più corretta e che non abbia in qualche modo danneggiato il particolare. Si ricercano bolli, intaccature, rigature, strappature, testimone di lavorazioni precedenti, vibrazioni, gradini ecc. Il particolare va controllato in tutte le sue parti e qualora si identifichino uno o più non conformità, non accettabili secondo le norme richiamate dal disegno, l'operatore deve segnalarle sull'apposito foglio anomalie e identificare il punto esatto o l'area interessata sul particolare.

Se si rileva un'intaccatura su un diametro, per esempio, l'operatore deve cerciarla fisicamente sul particolare e segnare sul foglio anomalie il codice di pallinatura di quel disegno, l'area della griglia in cui esso è presente, una breve descrizione dell'anomalia riscontrata e dell'entità della stessa e il seriale del particolare sulla quale è presente. L'addetto al controllo del foglio

anomalie avrà quindi tutte le informazioni per comprendere l'entità della non conformità e dovrà valutare se si può far eliminare tale anomalia con un processo di aggiustaggio oppure se sia necessario segnalare al suo superiore il problema e procedere con una rilavorazione del particolare. Se il difetto interessa zone critiche del particolare non si può far riparare il particolare ma bisogna necessariamente effettuare una rilavorazione mentre, se essa interessa zone marginali del pezzo, si può procedere ad "aggiustarla" in un'apposita area dedicata con personale specializzato.

Tutti i particolari soggetti ad aggiustaggio e/o a rilavorazione dovranno essere nuovamente controllati visivamente e dimensionalmente nelle aree interessate per verificare l'avvenuta eliminazione dell'anomalie e la conformità di quella parte.

Durante il controllo dimensionale del particolare, non è affatto detto che si riesca anche a verificare la presenza di tali non conformità con i metodi citati nei paragrafi precedenti perciò questo controllo garantisce l'effettiva conformità del particolare sotto tutti gli altri aspetti ed in questo modo si ottiene il controllo al 100% di tutte le caratteristiche a disegno.

Controllo durezza

Il controllo durezza è uno dei controlli non distruttivi più importanti: esso garantisce che il particolare abbia effettuato con successo tutta una serie di trattamenti termici o di deformazione superficiale richiesti dal disegno.

Il controllo avviene utilizzando un macchinario, il durometro, caratterizzato da una serie di penetratori e di precarichi di bilanciamento. I durometri, così come i penetratori, hanno forme e dimensioni diverse e sono ognuno specifico di una determinata scala di misura della durezza: le più comuni per il controllo dei materiali metallici sono le scale Brinell, Rockwell e Vickers. Ogni scala

ed il proprio penetratore sono adatti per il controllo di determinati materiali e se si utilizza una scala non adatta a quel materiale si rischia di ottenere dei valori fasulli e fuorvianti. I valori delle scale di misura sono molto diversi uno dall'altro ma esiste comunque la possibilità di confrontare valori di scale diverse tra loro utilizzando apposite tabelle di conversione.

Gli ingranaggi, per esempio, subiscono un processo di cementazione che conferisce alla dentatura una resistenza all'usura molto elevata e quindi aumenta molto il valore di durezza del dente. Essi dovranno essere verificati sia precedentemente al trattamento per verificare che la durezza a cuore, ossia del materiale grezzo di partenza, sia ad un livello sufficiente e sia dopo il trattamento superficiale per verificare che esso sia andato a buon fine e che si siano rispettati i parametri di durezza richiesti e cioè che si sia ottenuto il giusto bilanciamento tra rigidità, resistenza all'usura e fragilità del materiale.

Il trattamento termico o i processi di indurimento superficiale (quali la pallinatura con pallini di acciaio) possono interessare solo aree localizzate del particolare e quindi possono essere richieste verifiche di durezza in diversi punti del particolare. Data l'importanza del controllo, esso deve essere effettuato su tutti i particolari prodotti e una non conformità nei valori riscontrati implica un problema superiore a qualsiasi altro difetto dimensionale o visivo poiché la durezza delle parti è una proxy di garanzia tra le più importanti della durata e della qualità del particolare.

Queste prove, quando avvengono utilizzando dei durometri manuali classici, richiedono che l'impronta sia successivamente osservata ad un microscopio o proiettore ottico mentre nei modelli più recenti – automatici o semiautomatici – il controllo viene fatto direttamente dalla macchina e si può leggere il valore corrispondente alla scala utilizzata sullo schermo. Il durometro deve essere periodicamente tarato utilizzando dei particolari provini di lega dei quali è nota la durezza. I provini sono solitamente dei blocchetti di lega e sono reperibili in commercio e hanno le due superfici più estese lavorate a specchio. Il provino viene quindi penetrato e, se il valore letto dal durometro è molto prossimo al valore indicato sul provino di

riscontro, allora esso misura in maniera corretta altrimenti bisognerà aggiustare il precarico della macchina per portare il valore letto a quello target.

Nonostante la prova di durezza sia ritenuta un controllo non distruttivo per via della minuscola impronta che lascia sul particolare, in alcuni casi essa potrebbe generare delle tensioni residue molto pericolose nell'intorno dell'impronta praticata perciò deve essere effettuata in aree non soggette a particolari sforzi e non si deve abusare del test sul particolare. Per questi motivi anche ciascun blocchetto di riscontro potrà essere utilizzato solo per un numero finito di volte poiché per norma, si deve lasciare un determinato spazio tra un'impronta e l'altra per non incorrere in una deviazione dei valori di test dovuta alle micro-deformazioni plastiche generate nell'intorno della precedente impronta.

Classificazione delle caratteristiche costruttive e metodi di misura applicabili

In questo capitolo l'obiettivo è di introdurre una serie di caratteristiche comuni a tutte le ruote dentate, agli alberi dentati ed alla maggior parte dei componenti presenti nella catena di trasmissione all'interno di una scatola motore. Si proverà, oltre a fare un breve elenco delle stesse, a definire per ciascuna le possibili modalità di controllo utilizzabili e quelle che, maggiormente, garantiscono un'efficacia nei risultati ottenuti.

Si inizierà a vedere le caratteristiche dimensionali e geometriche di alcuni elementi ritenuti critici per garantire un effettivo livello di Qualità del particolare e per il corretto funzionamento del sistema. Si procederà poi con quelle caratteristiche costruttive di minore importanza ai fini della precisione e del funzionamento e che permettono un campo di tolleranza molto ampio.

In ultima analisi, si vedranno dapprima le caratteristiche degli ingranaggi e successivamente quelle degli scanalati.

Lo scopo è di riassumere tutte le informazioni scritte in precedenza e di focalizzarsi maggiormente sul raggiungimento dell'obiettivo di questo lavoro che verrà trattato in maniera pratica nel capitolo successivo. Si intende quindi spiegare qui il procedimento utilizzato nella parte pratica di raccolta dei dati.

Caratteristiche dimensionali critiche

Le caratteristiche dimensionali critiche sono specificamente riconosciute dal disegno e dalle norme e implicano per gli elementi a cui si riferiscono un'elevata precisione costruttiva e quindi un campo di tolleranze molto ristretto. Questi elementi sono solitamente gli attori principali durante la fase di moto della catena di trasmissione e si tratta di elementi di interfaccia, di ingombro e di vincolo con il resto del sistema. Il rispetto dei vincoli costruttivi in questi elementi è fondamentale per il corretto funzionamento poiché essi garantiscono che il montaggio, il moto e la distribuzione degli sforzi generati avvengano come richiesto.

Di questa famiglia di caratteristiche critiche fanno anche parte quasi tutte le caratteristiche delle ruote dentate, ma queste verranno trattate successivamente in un paragrafo a parte.

Uno dei principali elementi costruttivi critici è il “*diametro pista*”, ossia la superficie cilindrica che fungerà da alloggiamento per il cuscinetto volvente di rotolamento o direttamente come pista interna di rotolamento delle sfere o dei rulli. Tale elemento sarà soggetto ad una tolleranza dimensionale molto ristretta e ad una possibile serie di tolleranze geometriche che limiteranno gli errori di forma sulla sua superficie.

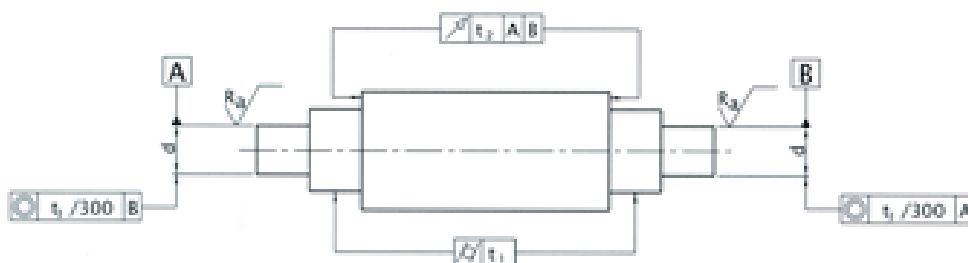


Figura 4.1 Albero con sedi cuscinetto e relative tolleranze geometriche

Per il controllo del valore numerico si può procedere in diversi modi: a) misura con micrometro millesimale, b) misura con CMM, c) misura con macchina ottica, d) misura con rotondimetro.

Va innanzitutto considerato che, escludendo il possibile errore di forma implicito della superficie, la misurazione di diametro su una superficie circolare può condurre ad alcuni errori: se la misura non avviene lungo un piano ortogonale all'asse del cilindro, si rileva un'ellisse anziché un cerchio e questo comporta una elevata deviazione standard da cui potrebbe derivare un elevato errore di forma e quindi un valore di oltre tolleranza nell'analisi delle tolleranze geometriche. Per ovviare a questa eventualità, qualora si usi una macchina di misura qualsiasi, il primo passo è quello di creare l'asse pezzo secondo le condizioni di vincolo o secondo le indicazioni del disegno oppure, semplicemente, costruire un piano di azzeramento in base al quale il cerchio dovrebbe essere contenuto in una superficie complanare a questa. Questo ultimo metodo richiede di mettere quindi in piano il particolare rispetto al rasamento¹ più vicino dato che, costruttivamente, esso viene generato nella stessa lavorazione di rettifica del diametro contiguo attraverso l'utilizzo di una mola di forma che ha le superfici perfettamente ortogonali tra loro; oppure si può creare un piano di azzeramento rispetto ad uno dei riferimenti richiesti a disegno.

Allo stesso modo si ragiona anche nel rilievo manuale della misura attraverso un micrometro: lo strumento deve essere abilmente tenuto fermo, in piano e le punte devono essere posizionate nella massima direzione radiale della superficie in modo da rilevare esattamente il diametro e non una qualsiasi corda di esso. Nella misura manuale del diametro, il micrometro è quindi in grado di misurare il valore del diametro della sezione circolare su cui appoggiano le sue due punte perciò esso deve essere misurato in almeno tre punti diversi sulla stessa sezione e si potrà poi scegliere se indicare il valore minimo, il valore medio o il valore massimo riscontrati oppure, qualora sia utile, tutti o una coppia di questi valori, ad esempio min-Max. Inoltre, se la superficie cilindrica risulta molto lunga, bisognerà rilevare la stessa serie di

¹ Si intende per rasamento lo spallamento di appoggio assiale del cuscinetto. I termini vengono utilizzati in modo equivalente in questo testo.

tre valori in almeno una sezione prossima allo spallamento, una centrale ed una all'estremità opposta della pista e scegliere nuovamente quali e quanti di questi tre valori presentare. Come è facile notare il procedimento risulta molto lungo, articolato e difficile da applicare in maniera corretta: si otterrebbe una serie di dati che non spiegherebbe – a meno di una misura perfetta e di una superficie esente da qualsiasi errore di forma – nel modo più corretto e veritiero il valore del diametro reale controllato. Va ulteriormente precisato che, a fronte di tutta questa serie di misure, è difficile se non impossibile ricavare un valore da attribuire alle tolleranze geometriche relative al diametro e, per il rilievo ulteriore di queste, bisognerebbe ricorrere ad altri metodi o strumenti.

Per questo tipo di elementi si preferisce quindi il controllo attraverso una macchina. I risultati che si ottengono dai metodi b), c), e d) sono pressoché identici invece, a meno di qualche variazione nella precisione e nell'accuratezza dello strumento.

Il controllo con CMM permette di rilevare, attraverso un minimo di 4 punti per sezione trasversale fino al controllo in scansione completa punto-punto della stessa, il valore del diametro in quante sezioni si necessitano e di tenerle separate oppure di costruire un cilindro teorico che meglio lo rappresenta attraverso una regressione opportuna della nuvola dei punti rilevati, oppure, ancora, di rilevare direttamente un valore del cilindro teorico eseguendo una scansione elicoidale, con passo modulabile a piacere, dell'intera superficie. Il rotondimetro, lo strumento ideato ad hoc per questo tipo di misure, utilizza proprio questo ultimo metodo per eseguire una scansione il più possibile precisa della superficie e dà addirittura la possibilità di plottare la misura del rilievo topografico della superficie. La macchina di misura ottica scansiona invece tutta la superficie in rotazione e genera anche essa un cilindro teorico.

Con queste analisi così precise le macchine sono in grado di fornire, per ogni sezione di misura, il valore del *cerchio massimo inscritto*, il valore centrale del cerchio teorico che meglio rappresenta quello centrale ed il valore del *cerchio minimo circoscritto* (qualora si voglia analizzare l'intera superficie rilevata si avranno invece i valori corrispondenti dei tre cilindri).

Questi tre valori sono alla base della valutazione degli errori di forma del particolare e si possono ottenere i valori corrispondenti quindi alla *rotondità* – nel caso di sezione circolare – o della *cilindricità* – nel caso di superficie cilindrica.

Nel caso in cui, invece, si richieda di valutare la *concentricità* di una sezione circolare oppure la *coassialità* della superficie cilindrica teorica, si deve necessariamente disporre dell'asse pezzo e quindi non basta azzerare l'orientamento del pezzo su un piano. Lo stesso discorso vale per il run-out², ossia dell'oscillazione – in questo specifico caso di tipo radiale – della superficie intorno all'asse pezzo che richiede, per l'appunto, che quest'ultimo sia stato precedentemente definito. Va però precisato che, qualora il run-out sia richiesto rispetto ai centri di costruzione del particolare, esso potrà essere valutato solo utilizzando la macchina di misura ottica oppure attraverso il controllo in manuale su *banchetto prova*.

Il banchetto di prova è composto da una coppia di punte coniche coassiali rotanti (cono ISO di 60° di apertura), una delle quali è fissa mentre l'altra scivola su una guida ricavata nel basamento. Il particolare viene vincolato tra le punte e viene serrata quella mobile fissandolo assialmente.

² Run-out è il termine inglese comunemente utilizzato per definire il valore di oscillazione di una superficie rispetto ad un elemento di riferimento. Generalmente l'oscillazione nei particolari di rivoluzione può essere di tipo radiale o assiale e l'elemento più comune preso come riferimento è l'asse pezzo. Il run-out radiale è la composizione degli errori di concentricità e di rotondità di una superficie cilindrica mentre il run-out assiale è la composizione degli errori di planarità e di ortogonalità di una superficie ortogonale all'asse pezzo.

In entrambi i casi l'oscillazione può essere "singola" qualora sia sufficiente valutare il valore solo in una qualsiasi sezione di interesse della superficie oppure "doppia o totale" qualora essa debba essere verificata uniformemente su tutta la superficie interessata.

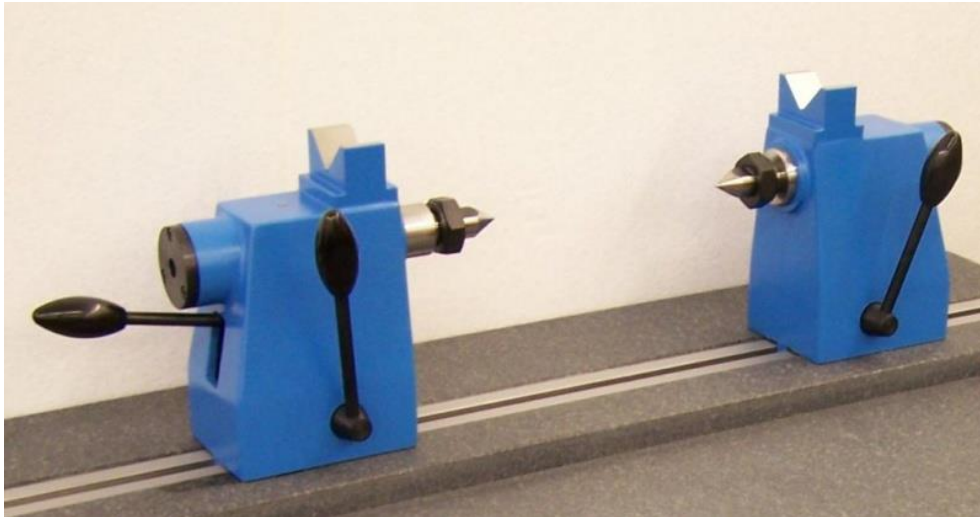


Figura 4.2 Banchetto di prova punta e contropunta

Con l'utilizzo di un pupitast millesimale ci si appoggia sulla superficie da controllare e si azzerò lo strumento. Successivamente si mette in rotazione il particolare e osserva sull'orologio dello strumento lo scostamento tra il massimo ed il minimo valore raggiunti per definire il valore di oscillazione radiale. Si può ottenere anche il valore di oscillazione assiale rispetto ai centri di lavorazione dei particolari cilindrici appoggiando la testina dello strumento sulla superficie e mettendo in relazione il particolare. La valutazione del risultato è la stessa del caso radiale. In entrambi i casi di oscillazione è possibile misurarne il valore in più sezioni e successivamente decidere come procedere con l'elaborazione dei dati raccolti. Il controllo può anche essere svolto appoggiando il particolare sulle sedi cuscinetto oppure sulle superfici cilindriche di interesse su un altro banco costituito invece da due sedi volventi, ognuna delle quali è composta da una coppia di rulli liberi di ruotare.

La versione più semplice permette il controllo di alberi simmetrici che non possono essere controllati su punta e contropunta mentre versioni più complesse permettono di registrare le staffe in altezza in mono da compensare la differenza tra i diametri pista e, eventualmente, controllare il corretto posizionamento parallelo del particolare rispetto al piano di scorrimento delle staffe.



Figura 4.3 Banchetto di prova di rotolamento con rulli

Un limite all'utilizzo di alcune delle alternative precedenti si presenta per esempio nel caso di controllo di una superficie cilindrica interna. Manualmente, se gli ingombri fisici del particolare lo permettono, essa può essere misurata con un micrometro da interni a 3 punte ma la misura risulta spesso difficile ed imprecisa nel caso di diametri con tolleranze molto ristrette. Questo problema può essere facilmente risolto utilizzando una CMM e costruendo una combinazione di tastatori ad hoc per la misura del dato elemento mentre non potranno essere utilizzati né il rotondimetro – pensato per le sole misure di superfici esterne – né la macchina di misura ottica – in primis perché il particolare è serrato sui centri tra le punte e poi perché il sistema ottico non è reclinabile ma si muove all'esterno, lungo l'asse del particolare.

In linea generale però, si può affermare che scelta di uno piuttosto che di un altro metodo sia soggetta al trade-off tra economicità e qualità, ossia che verta sui tempi, sui costi, sulla precisione della misura e sulla disponibilità di risorse: scegliere un metodo più preciso, per esempio, richiede tempo, disponibilità della macchina e dell'operatore e può risultare del tutto inutile qualora non si abbia necessità di verificare eventuali tolleranze geometriche correlate. Questo concetto vale per qualsiasi tipo di misura si voglia effettuare, compresa l'ispezione delle ruote dentate.

La misura di una distanza invece può essere ottenuta invece da una serie più ampia di strumenti ma i principi generali sulla scelta di quale metodo utilizzare sono gli stessi presentati in precedenza. Qualora si trattasse di una distanza critica come quella che intercorre tra gli spallamenti di due sedi cuscinetto, detta comunemente “luce” o, in gergo, “quota pacchetto”, il campo di tolleranza risulta molto ristretto rispetto al valore più o meno grande della quota nominale. Il controllo di questa quota deve essere eseguito con cura perché un valore troppo inferiore al LSI darebbe vita ad un fenomeno di gioco e di instabilità del cuscinetto in fase di registrazione e di montaggio mentre un valore troppo superiore al LSS genererebbe difficoltà di montaggio e sforzi residui che potrebbero compromettere il buon funzionamento del cuscinetto.

Il controllo di una distanza può essere eseguito alternativamente da: a) altimetro digitale, b) CMM, c) macchina di misura ottica. L’altimetro digitale è uno strumento manuale molto sensibile che ha una testina scorrevole verticalmente sulla quale possono essere montati una serie di tastatori intercambiabili in base alla specifica misura da ottenere.



Figura 4.4 Altimetro digitale
(www.trimos.com)

L’azzeramento dello strumento può essere fatto in qualsiasi punto del piano di appoggio in granito e “perfettamente” planare oppure direttamente su un punto di qualsiasi superficie del particolare. Per l’azzeramento sul particolare si devono prendere diversi punti sulla stessa superficie che non risulterà perfettamente ortogonale all’asse pezzo e si sceglierà come punto di zero il massimo, il minimo o uno dei valori intermedi tra quelli rilevati. Si alza la testina scorrevole e si sposta il corpo dell’altimetro fino a portarlo in prossimità della nuova superficie da

rilevare e si ripete l'operazione di raccolta di una serie di valore scegliendo poi quello che meglio spiega la misura. Il problema con questo strumento da banco è che il particolare soffre inevitabilmente di una serie di errori di forma e le superfici risulteranno difficilmente complanari tra loro. Un primo errore è quello dovuto all'appoggio del particolare: maggiore è la superficie di appoggio sul piano dello strumento e maggiore è l'errore che ne deriva in fare di misura. Per limitare questo valore si può utilizzare una serie di boccole rettificate per limitare l'area di contatto con il particolare per esempio appoggiandolo su uno spallamento della pista cuscinetto, oppure, si possono utilizzare una serie di blocchetti di taratura per limitare ulteriormente il contatto in due o tre punti al massimo e ovviare così in buona parte all'errore esterno di appoggio. Un ulteriore difetto è presentato dalla difficoltà di rilevare misure su superfici nascoste o difficilmente raggiungibili per via di possibili sottosquadri. Il rilievo di una serie molto ampia di punti può comunque confondere e lascia troppa libertà di azione all'operatore che potrà, volontariamente o involontariamente, ottenere un valore che sia o meno all'interno del campo di tolleranza. Tale metodo non riesce inoltre a fornire alcuna informazione sulla forma e sulla posizione relativa delle superfici e risulta per tale motivo conveniente solo nel caso di ricontrolli o verifiche aggiuntive o qualora non si debbano verificare le tolleranze geometriche relative a quegli elementi.

Un controllo completo e meno soggetto all'errore umano è invece possibile sia con l'utilizzo di CMM sia con le macchine di misura ottica. Entrambe riescono a costruire l'asse pezzo teorico e a bilanciare in questo modo qualsiasi errore di montaggio e possono eseguire la misura attraverso una scansione, tattile nel primo caso ed ottica nel secondo, dell'intera superficie circolare. Durante il ciclo di misura sono in grado di fornire sia il valore della quota dimensionale che i valori di tutte le tolleranze geometriche richieste e possono quindi restituire una serie di valori molto più precisi da cui si possano ricavare un insieme di informazioni molto complete. Esse garantiscono, in base all'algoritmo di misura del programma, di fornire una elevata ripetibilità della misura oltre ad una accuratezza più che soddisfacente. Il maggiore vantaggio però è rappresentato dal fatto che, al contrario dell'altmetro

digitale, esse possono facilmente eseguire una composizione di misure ovvero, una volta raccolti una serie di punti indipendenti a diverse altezze, è possibile ottenere qualsiasi valore di distanza tra di loro componendoli in modo rapido e senza dover invece azzerare e misurare ogni volta ciascuna distanza tra essi.

Si supponga ora di avere una serie di fori circolari su una cartella e di dover misurare la loro posizione rispetto all'asse pezzo e quella relativa tra loro. Il controllo manuale risulterebbe molto complesso, lungo ed inaffidabile qualora fosse possibile la sua esecuzione ma sarebbe comunque impossibile verificare la posizione rispetto all'asse teorico del particolare. Il controllo con una macchina di misura è invece in grado di fornire, attraverso la misura di ciascun foro con una serie di passaggi semplici e perfettamente ripetitivi, un insieme di informazioni molto dettagliate. Con un ciclo di misura di pochi minuti si è infatti in grado di ottenere il valore del diametro di ciascun foro e l'errore di forma ad essi associato, il valore di posizione di ciascun foro rispetto all'asse pezzo comprensivo di distanza radiale e deviazione angolare e quindi anche l'errore relativo tra i fori stessi che può risultare molto utile in fase di montaggio.

Si possono fare una serie infinita di esempi pratici di rilievo ma la maggior parte delle misure rilevate attraverso macchine automatiche è in grado di garantire una precisione superiore delle informazioni ed una ripetibilità molto elevata poiché, con semplici accorgimenti in fase di set up macchina, è possibile eliminare molti errori.

Caratteristiche dimensionali minori

Si intende, in questo lavoro, per caratteristiche dimensionali minori tutto l'insieme di caratteristiche che non sono funzionali alla trasmissione delle forze e che non si riferiscono ad elementi di interfaccia e di montaggio con gli altri organi della scatola motore. Il controllo di tali elementi, che risultano caratterizzati da tolleranze molto ampie e delle quali alcune possono essere controllate a campione su un singolo elemento del lotto, può avvenire con l'utilizzo di strumenti da banco e di tecniche meno precise.

Il controllo di una superficie circolare soggetta al processo di pallinatura³ non richiede l'utilizzo di strumenti precisi quali il rotondimetro o le CMM poiché la compressione indotta sulla superficie genera inevitabilmente delle deformazioni della sua forma. Il diametro avrà allora tolleranze decimali che potranno essere facilmente rilevate con l'utilizzo di un classico nonio a corsoio centesimale senza dover necessariamente utilizzare un micrometro come nel caso visto in precedenza. Il controllo dell'errore di forma, richiesto spesso sotto forma di oscillazione della superficie, avrà anch'esso dei valori molto elevati proprio per tenere conto implicitamente della deformazione generatasi a seguito del processo. L'operazione di pallinatura viene infatti eseguita su tutte quelle superfici non soggette a contatti con altri particolari e quindi non si necessita di una buona forma superficiale quanto di una buona resistenza perché spesso si tratta di mozzi o di cartelle di ruote dentate. Il run-out sarà quindi facilmente rilevabile in modo manuale vincolando il particolare sul banchetto – punta e contropunta oppure sui supporti a rulli qualora esso sia richiesto rispetto alle piste cuscinetto – mediante l'utilizzo di un pupitast centesimale.

³ La pallinatura è un'operazione che consiste nel martellamento superficiale a freddo del particolare eseguito con un violento getto di "pallini" sferici, da cui il nome, di piccolissime dimensioni e di diversi materiali, dal vetro all'acciaio. Essa provoca una deformazione plastica di compressione della superficie che si propaga fino a qualche decimo di millimetro nel materiale sottostante e, tecnicamente, serve a migliorare la distribuzione superficiale delle tensioni residue aumentando la resistenza a fatica del pezzo trattato. Per tale motivo e per via del suo ridotto costo, questo processo è molto utilizzato in campo aeronautico ed automobilistico.

Non è affatto vietato che entrambe queste misure vengano effettuate tramite le macchine ma, come spesso viene richiesto per queste misure, esse possono essere rilevate a campione su un numero finito di particolari del lotto e quindi si avrebbe un'abbondanza di informazioni in output dalla macchina di basso interesse a fronte di un costo evitabile per via dei tempi più lunghi di controllo. Ad ogni modo, sia le CMM che le macchine di misura ottica, possono rilevare in modo semplice questi valori qualora si necessiti invece la loro registrazione nelle apposite schede di collaudo.

Come abbiamo visto quando si parlava dei vari controlli di banco, un raggio di raccordo può essere facilmente controllabile mediante l'utilizzo di apposite raggiera oppure utilizzando un proiettore ottico con fattore di ingrandimento adatto, che semplificano molto il controllo di tutti gli elementi esterni. Qualora si tratti invece di raggi di raccordo sulla superficie interna di un particolare cavo, il controllo con la raggiera o con il proiettore ottico risulteranno impossibili da eseguire. Esso potrà essere verificato in maniera diretta di profilometro oppure attraverso il rilievo del profilo da un'impronta di resina per tutti quegli elementi dove invece risulti difficoltosa la misura. Per evitare tutta questa serie di procedimenti invece risulta molto efficace, in questo caso, la misura attraverso la CMM. La macchina può infatti tastare una serie di punti sulla superficie del raccordo oppure eseguire una scansione continua lungo una linea assiale in modo da ricavare con esattezza il valore del raggio e la sua posizione.

Nel caso in cui si abbia invece da misurare un punto di intersezione teorico o reale tra due elementi la macchina può facilmente costruirlo rilevando un numero sufficiente dei due elementi che si intersecano e conoscere il valore del diametro o della distanza a cui questa avviene. Lo stesso processo può essere effettuato con l'utilizzo di un proiettore ottico se il punto è un punto reale e se si riesce a visualizzarlo con facilità sullo schermo ma è molto complicato ed impreciso rilevare in questo modo un punto di intersezione teorico, ossia che non esiste più fisicamente sul particolare poiché, per esempio, vi è stato praticato uno smusso o un raccordo. Si potrà utilizzare in alternativa il profilometro attraverso il quale è possibile agire sul rilievo del profilo mediante l'utilizzo di funzioni particolari che permettono di creare

elementi teorici sovrapponendoli agli elementi reali profilati e di generare così angoli, punti di intersezione e distanze. Per determinate misure però gli ingombri del particolare e quelli del tastatore utilizzato possono dare vita a misure difficoltose da realizzare o molto imprecise mentre, altre volte, è necessario avere un punto di riferimento con valore noto (ad esempio un piano o un diametro) al quale riportare tutti i valori rilevati: si può incorrere quindi in imprecisioni di valutazione per cui questo metodo va utilizzato solo per quelle misure, appunto, relative ad elementi costruttivi minori.

Si supponga di dover conoscere il valore di un diametro di una superficie conica esterna ad una distanza prefissata (quota base) da un piano di riferimento. La superficie conica sarà soggetta ad una tolleranza angolare che permette ad ogni sezione circolare di avere un determinato valore sempre più ampio man mano che si procede dalla punta verso la base del cono. Il controllo può essere fatto in maniera meno precisa attraverso l'utilizzo di un proiettore ottico e in maniera più accurata con l'utilizzo di una CMM o di una macchina di misura ottica. Con il proiettore, una volta scelto il fattore di ingrandimento desiderato – si noti che i valori delle dimensioni reali del particolare non sono soggetti a variazione in funzione dell'ingrandimento adoperato – si azzerava l'asse verticale della guida mobile sul piano di riferimento e ci si sposta assialmente della quota base prescritta dal disegno. Ci si deve posizionare su un lato del cono e si azzerava anche il secondo asse trasversale dopodiché si scorre nel verso opposto del cono fino ad incontrare il punto speculare sulla superficie conica che combacia con il riferimento di azzeramento: la corsa della tavola, che si può leggere sul display digitale a bordo macchina, indica il valore del diametro di quella sezione di cono. Il metodo risulta comunque molto sommario perché soffre di alcuni errori relativi al piano di appoggio utilizzato, al tipo di ingrandimento utilizzato ed alla messa a fuoco dell'immagine che si è riuscita ad ottenere oltre che dell'errore naturale legato al gioco delle guide meccaniche della slitta mobile. Il controllo con CMM elimina questo tipo di errori e migliora la qualità della misura e la bontà dei risultati ottenuti. La macchina azzerava il riferimento assiale sul piano richiesto e, successivamente, rileva una serie di punti su diverse sezioni del tronco di cono parallele al piano di azzeramento generando

infine un cono ideale che meglio approssima la superficie reale. In questo modo la macchina è in grado sia di affermare con precisione l'angolo reale di apertura del cono, sia l'errore di forma a cui è soggetta la superficie, sia il valore del diametro della sezione di cono alla distanza richiesta. In alternativa a questi due metodi il controllo può essere eseguito anche con le macchine di misura ottiche in modo automatico e con gli stessi ragionamenti utilizzati dalle CMM ma i valori raccolti saranno comunque inferiori, in fatto di precisione ed accuratezza, a quelli rilevati dalla CMM seppur più completi e precisi di quelli ottenibili dal proprio predecessore analogico.

Il controllo con la macchina di misura a coordinate è anche l'unico metodo realmente efficace nella misura di simili caratteristiche qualora si tratti di superfici coniche interne al particolare poiché il procedimento di misura sarebbe lo stesso descritto in precedenza. Un simile controllo con le macchine di misura ottiche o con il proiettore ottico risulta impossibile da effettuare e, in alternativa può essere invece effettuato con l'utilizzo del profilometro ma la misura soffrirebbe degli stessi problemi esposti in precedenza oltre che del fatto che si necessiterebbe di una serie di informazioni sugli altri elementi del particolare molto più abbondanti.

Il ruolo delle CMM viene ulteriormente amplificato qualora si debba ottenere, in alternativa al valore di un diametro in una precisa sezione del cono, del valore dello spessore di una cartella generata da una superficie conica interna ed una esterna, con angoli di apertura simili o meno.

Caratteristiche degli ingranaggi

Nel prossimo capitolo si vedrà come analizzare i report delle macchine di misura in merito alle caratteristiche costruttive degli ingranaggi mentre in questo paragrafo lo scopo è quello di presentare quali siano le caratteristiche che vanno osservate. Come anticipato precedentemente, la prima caratteristica da prendere in considerazione degli ingranaggi è la misura della forma dell'evolvente per gli ingranaggi cilindrici e, rispettivamente, il rilievo topografico per gli ingranaggi spiro-conici. Il profilo del fianco dente viene controllato o attraverso una macchina di misura oppure attraverso una macchina per il controllo dei giochi e dei contatti. La prima misura è decisamente più precisa ed indicativa perché è in grado, per ogni particolare, di rappresentare esattamente la caduta dell'evolvente e di osservare la presenza di anomalie.

Il secondo metodo consiste invece nello spalmare una pasta su un piccolo settore di denti dell'ingranaggio di produzione e di vincolarlo sul macchinario. Si esegue quindi manualmente l'accoppiamento con un ingranaggio "Master", ossia un particolare che risulti costruttivamente "perfetto" nel senso che presenta tutte le caratteristiche reali molto prossime al loro valore nominale a disegno. Una volta che si sono ottenute in macchina le giuste condizioni di ingranamento – allineamento ed interasse – si esegue il rotolamento reciproco tra i due particolare azionando il master. Durante il rotolamento, l'accoppiamento tra i denti in presa lascia l'impronta sulla pasta nelle zone dove è avvenuto il contatto mentre il resto della superficie del fianco dente rimane intatta. Si appoggia quindi un apposito nastro sul fianco dente che esegue il negativo dell'impronta di contatto e poi lo si confronta con le altre impronte ottenute invece dall'ingranamento tra una coppia di ingranaggi "Master". Tale operazione viene eseguita su almeno 3 o 4 denti differenti del settore analizzato. Se l'impronta ricade all'interno del campo di tolleranza prescritto intorno all'impronta master e sono assenti segni di rigature, intaccature o altre anomalie, allora il particolare risulta conforme.

Tale controllo è valido sia per gli ingranaggi cilindrici, sia a denti dritti che elicoidali, sia e soprattutto, per gli ingranaggi spiro-conici. Oggi però i primi vengono agevolmente controllati attraverso le macchine di misura o l'evolvimetro mentre tale controllo manuale risulta molto utile per il controllo di giochi e contatti degli ingranaggi spiro-conici dove l'interasse di ingranamento deve essere appositamente registrato attraverso il valore del "Contributo al gioco" ottenuto dalla prova dell'ingranaggio di produzione con il master. Si vedrà più avanti come tale controllo possa invece essere alternativamente interpretato mediante il controllo con le macchine di misura.

Concentrando invece l'attenzione sugli ingranaggi cilindrici, ogni particolare potrà avere una dentatura normale oppure corretta. Nel primo caso il profilo del dente segue la teoria classica delle ruote dentate semplici mentre il secondo è caratterizzato da una diversa geometria del dente, sempre eseguito a profilo di evolvente, ma con una diversa distribuzione delle pressioni di contatto lungo il fianco. Tali modifiche si traducono in una differente "caduta" dell'evolvente che viene espressa da una diversa forma del campo di tolleranza della rappresentazione geometrica del profilo del fianco dente. La macchina infatti compara il profilo reale letto durante la misurazione con il profilo teorico ideale e restituisce una tracciatura rappresentativa delle deviazioni costruttive realizzate in fase di lavorazione. La figura 4.5 rappresenta la tracciatura di una dentatura corretta di un ingranaggio cilindrico a denti dritti mentre la figura 4.6 rappresenta la tracciatura parabolica di una dentatura cilindrica elicoidale.

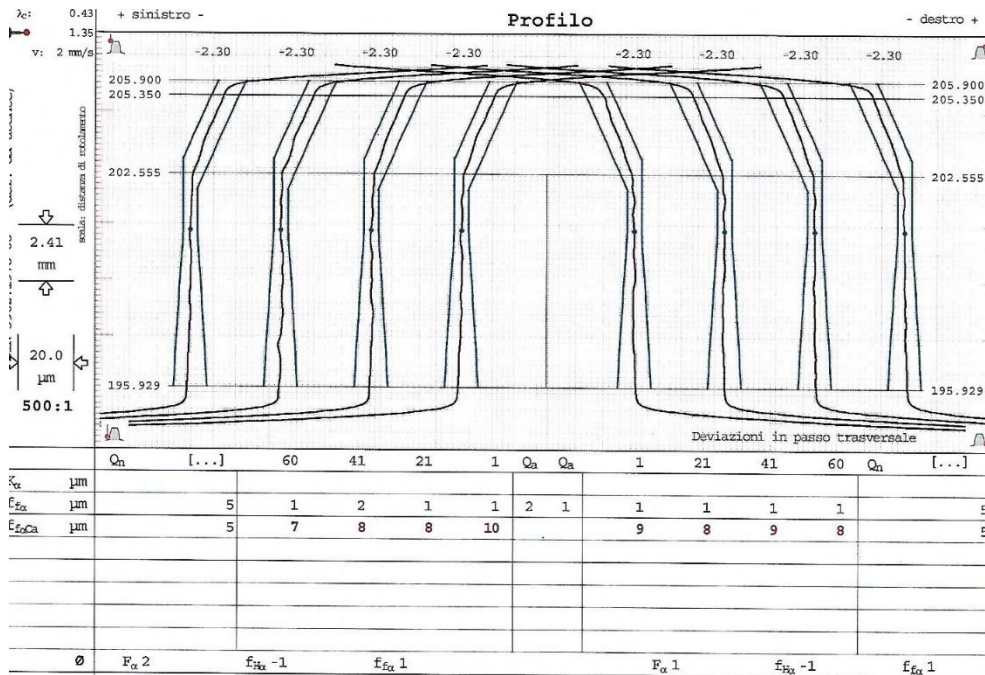


Figura 4.5 Misura del profilo di evolvente di un ingranaggio cilindrico a denti dritti

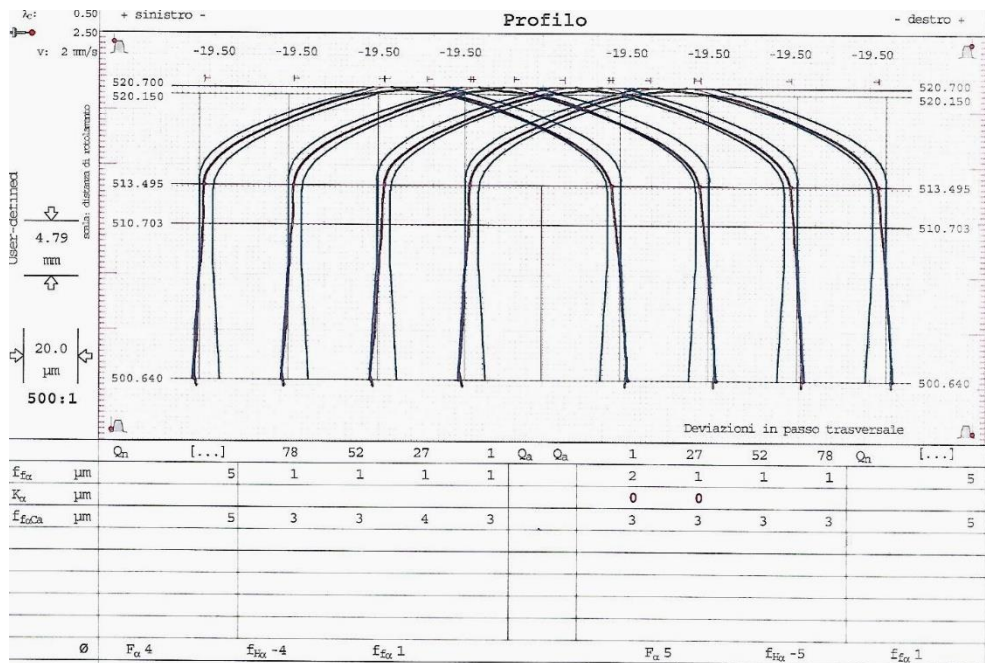


Figura 4.6 Misura del profilo di evolvente di un ingranaggio cilindrico a denti elicoidali

La curva nera irregolare rappresenta le deviazioni del profilo reale del dente, che si estende dal diametro minimo di rettifica o diametro efficace di inizio evolvente fino al diametro esterno (meno il valore massimo accettato degli smussi di testa dente), rispetto al profilo ideale e deve essere contenuta all'interno del campo di tolleranza definito dalle linee estreme. Il profilo reale deve inoltre essere contenuto all'interno di una "banda di ondulazione", di ampiezza inferiore all'intero campo di tolleranza, ed essere esente da errori di forma quali brusche variazioni, concavità o convessità per una lunghezza superiore al 20% della lunghezza di rotolamento e vibrazioni o strappature. Con un ingrandimento sufficiente del profilo si è in grado di avere anche una prima indicazione del valore della rugosità del fianco dente e, un collaudatore esperto, è quindi in grado di affermare se eventuali deviazioni del profilo siano dovute alle condizioni di lavorazione dell'utensile, a errori nella geometria del profilo (ad esempio rigature o strappature) oppure a sporcizia. Tale esito è possibile grazie al fatto che, per norma, il controllo dei profili radiale e longitudinale del dente, deve essere effettuato su almeno 3 denti approssimativamente a 120° oppure su 4 denti approssimativamente a 90° . Infatti, qualora un'anomalia oppure una particolare condizione geometrica si presenti ripetutamente su tutti i denti analizzati, essa sarà dovuta intrinsecamente alla lavorazione svolta mentre se essa si presentasse su un solo profilo, bisognerebbe procedere con delle ipotesi alternative sulla sorgente. Un discorso simile è valido anche per il controllo del profilo longitudinale del dente dove lo scopo primario è quello di analizzare l'errore di inclinazione del fianco dente rispetto all'asse del particolare. Anche in questo caso, infatti, si devono osservare sia il valore di inclinazione, ottenuto tracciando una linea teorica di interpolazione dei punti positivi e negativi della superficie del fianco, sia, appunto, l'errore di forma della superficie. La figura 4.7 è una rappresentazione delle tracciature del fianco dente analizzate mediante CMM per un ingranaggio a denti dritti con i fianchi bombati.

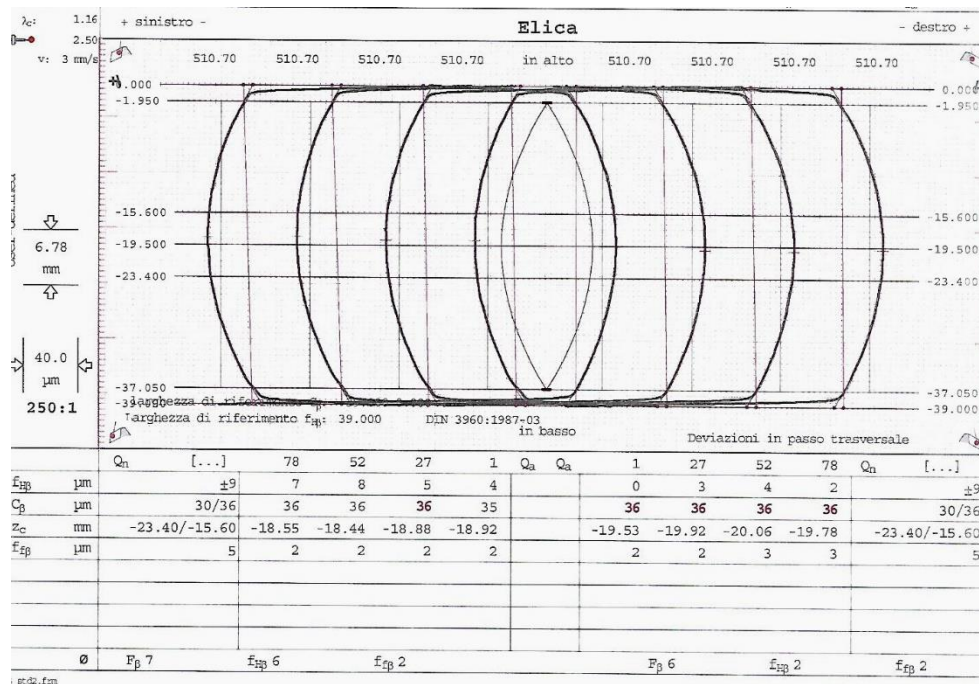


Figura 4.7 Misura del profilo longitudinale del fianco dente di un ingranaggio cilindrico a denti elicoidali

La bombatura, in questo caso circolare simmetrica, viene interpretata numericamente come il valore del punto della curva alla massima distanza dalla linea retta che congiunge le due estremità della fascia del dente mentre l'inclinazione del dente rispetto all'asse è proprio la differenza di inclinazione tra i due punti più estremi dell'intera fascia del dente. Per questo profilo è richiesto dalle norme che esso sia consecutivamente esente da particolari errori di forma per almeno il 90% dell'intera fascia del dente e che le variazioni ricadano in una banda di ondulazione, che segue il profilo reale, di un'ampiezza pari a quella definita per il profilo evolvente. Tutti gli ingranaggi presentano delle restrizioni sul valore della massima differenza di inclinazione tra una coppia qualsiasi di denti della stessa dentatura. Il motivo di ciò è permettere un ingranamento fluido ed una distribuzione delle pressioni esente da generazione di sforzi multidirezionali che diventino causa dell'instaurazione di pericolose vibrazioni della ruota dentata.

Per quanto riguarda l'errore di passo o di divisione dell'ingranaggio, la macchina si posiziona con il tastatore (di raggio inferiore al minimo raggio di fondo dente richiesto a disegno) al valore del diametro primitivo della ruota

e misura, punto dopo punto, lo spessore dente o, equivalentemente, l'ampiezza vano realizzate in fase di lavorazione. Dividendo quindi il passo per due si ha il valore teorico di una delle due precedenti caratteristiche che può essere confrontata con le specifiche del disegno e, analizzando l'errore di passo tra gli stessi fianchi di denti consecutivi, si può ottenere il valore di errore dente/dente (f_p) e il valore cumulato dell'intera ruota (F_p). La seguente figura presenta un report di tale misura.

opportuno il valore di eccentricità della dentatura ed il valore intrinseco dell'errore di forma generato inevitabilmente in fase di rettifica, si perviene al valore del run-out dell'ingranaggio rispetto all'asse del particolare. Sempre attraverso questo tipo di ispezione e poter permettere anche un possibile controllo alternativo manuale, la macchina è in grado di fornire i valori del minimo, massimo e del valore medio della distanza leggibile con un micrometro qualora venissero inseriti in almeno due vani a 180° dei rulli o delle spere di un diametro noto. Il controllo con i rullini viene eseguito sulle dentature cilindriche a denti diritti mentre il controllo con le spere è adatto per gli ingranaggi elicoidali ma nulla vieta che vengano utilizzate anche per quelli a denti diritti. Si noti inoltre che per dentature a denti pari sono sufficienti 2 soli rullini mentre per quelle a denti dispari sono necessari 3 rullini di cui due vanno messi in due vani consecutivi mentre il terzo in quello a loro diametralmente opposto. Si evince che il controllo con micrometro è meno restrittivo e meno preciso del controllo con CMM ma esso viene richiesto per norma poiché è un modo efficace di valutare tale caratteristica in qualsiasi ambiente, anche privo di macchine di misura. Le ultime due caratteristiche misurabili di macchina sono il diametro di piede o diametro di fondo dente o, ancora, diametro interno ed il diametro di testa o diametro esterno dell'ingranaggio. Tali diametri vengono ottenuti dalla macchina battendo una serie di punti sia sul fondo sia sulla testa ed ottenendo i valori di minimo, massimo e valore medio dei cerchi teorici che vanno confrontati con i dati richiesti a disegno. Un esempio di tale rilevazione è presentato nella seguente figura.

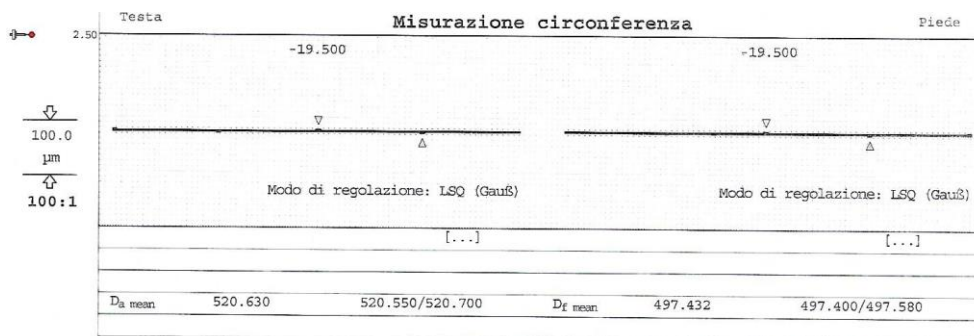


Figura 4.9 Misura dei diametri interno ed esterno di una dentatura cilindrica

Oltre alle caratteristiche misurabili di macchina, per una ruota dentata è importantissimo controllare anche, con metodi alternativi, il valore del raggio di fondo dente che deve essere superiore al minimo prescritto a disegno ed esente da presenza di testimone di lavorazione precedente (ossia che deve essere stato completamente lavorato e pulito in fase di rettifica finale post trattamenti termico della dentatura) ed il valore della rugosità del fianco dente. La dentatura viene lavorata assialmente perciò il valore della scabrosità deve essere rilevato lungo il profilo ad evolvente di cerchio per una distanza minima da coprire tutta la fascia di rotolamento del dente o, qualora non fosse possibile per via di ingombri o altre difficoltà, comunque per una lunghezza sufficientemente significativa. Le norme o il disegno specificano il valore del cut-off da utilizzare e quali valori della scabrosità, oltre al valore aritmetico medio (R_a), sia necessario riscontrare sul particolare.

Caratteristiche degli scanalati

Per quanto riguarda gli scanalati valgono gli stessi concetti espressi per gli ingranaggi cilindrici a meno di alcune osservazioni. In primis, tali elementi non sono sottoposti a rotolamento reciproco ma l'accoppiamento è fisso, perciò il profilo ad evolvente in questo caso dovrà essere rispettato per assicurare un miglior assorbimento della distribuzione delle pressioni che, per via del gioco dell'accoppiamento e del mutuo disallineamento tra il maschio e la femmina e l'asse dei loro rispettivi particolari, potrebbe indurre il particolare a lavorare anche su una porzione del fianco dente ampia rispetto al punto di contatto teorico sul diametro primitivo. L'inclinazione dei denti è controllata per evitare che gli stessi siano sghembi e generino pericolose distribuzioni delle pressioni lungo la fascia che inducano forti vibrazioni ma

non è comunque richiesto un parallelismo restrittivo. L'errore di divisione e la misura della quota rulli sono invece molto importanti poiché garantiscono che siano stati rispettati i valori di spessore dente o di ampiezza vano e che non vi siano sezioni della dentatura particolarmente più sollecitate di altre in fase di trasmissione. Allo stesso modo la misura dei diametri di testa e di fondo oltre che un sufficiente valore di raggio di fondo garantiscono l'assenza di impuntamenti e della formazione di particolari fattori di intaglio che portino il particolare a rottura per fatica. Una buona rugosità superficiale garantisce invece una maggior resistenza ad usura della superficie del particolare.

Una norma molto utilizzata per le caratteristiche costruttive generali dei profili scanalati è l'ANSI B92.1 che si occupa anche di definire in modo specifico ed esaustivo anche le caratteristiche costruttive dei tamponi o degli anelli scanalati "passa" – "non passa". Il controllo con i calibri scanalati risulta infatti un metodo semplice ed esaustivo sia per il controllo dell'errore di divisione, che dello spessore dente/ampiezza vano oltre che del profilo evolvente poiché essi sono il negativo del profilo eseguito nelle condizioni di minimo e massimo materiale sul fianco dente specificati a disegno. Sono esenti da tale controllo i valori dei diametri interno ed esterno della dentatura, l'errore di inclinazione dei denti dello scanalato e della concentricità del diametro primitivo rispetto all'asse del particolare che devono essere ispezionati con un metodo alternativo. Naturalmente, qualora una delle due prove risulti anomala (il calibro scanalato "passa" risulta non passante oppure il calibro scanalato "non passa" risulta passante), deve essere eseguito un controllo completo di macchina della dentatura per individuare tutte le possibili cause scatenanti di tale anomalia.

Casi Applicativi

Nelle seguenti pagine verranno presentati alcuni dei dati raccolti in merito alle principali caratteristiche di interesse delle ruote dentate⁴. I dati, come anticipato, sono stati raccolti su un numero significativo di campioni dello stesso particolare aeronautico prodotti in parte in serie ed in parte in momenti differenti. Attraverso il rilevamento delle misure con diversi metodi, si proverà ad osservare se vi siano sostanziali differenze tra di loro che suggeriscano di usarne uno piuttosto di un altro oppure che addirittura indichino una probabile non applicabilità di quel metodo/strumento a quel particolare tipo di misura. In qualche modo, in questo lavoro, si è anche tentato di stabilire grossolanamente anche il livello di precisione di ciascuno strumento, soprattutto per quanto riguarda la ripetibilità e la riproducibilità della misura. Alcune misure sono state effettuate nelle medesime condizioni sia dello stesso operatore, sia da operatori diversi anche in tempi diversi. Si è quindi giunti a stabilire quale fosse il modo migliore per effettuare la misura cercando di minimizzare questi errori e di avvicinarsi il più possibile al reale livello di precisione dello strumento o del macchinario. Tali dati non sono stati svolti su tutta la serie di particolari ma solo su un piccolo campione di essi e, in seguito a ciò si è stabilito quale fosse il miglior allineamento in macchina e la condizione migliore di misura in manuale del particolare (in questo caso si è per esempio cercato di toccare il meno possibile sia gli strumenti di misura sia i particolari, per evitare delle possibili alterazioni termiche delle superfici da misurare).

⁴ Si vuole sottolineare che tutti i valori numerici qui espressi sono stati opportunamente modificati per rispetto delle Norme in materia di Copyright e di segretezza. La bontà dei dati non è stata comunque in alcun modo alterata per quanto riguarda lo scopo di questo trattato

Misura di un diametro

Si è scelto di misurare il diametro rettificato di una sede per cuscinetto volvente in modo da restringere molto l'errore al solo rilevamento della misura ed escludendo in buona parte l'errore di forma della superficie analizzata. Si è rilevato infatti, in accordo sia con l'utilizzo del Rotondimetro e sia con la CMM, che l'errore medio di rotondità rilevato in diverse sezioni – di 4 dei 16 particolari in esame – della superficie cilindrica si attestava intorno $2\mu\text{m}$. Ciò potrebbe essere un possibile fattore della variazione di alcune misure rilevate con metodi diversi sui medesimi particolari. Un altro motivo è da attribuirsi alla temperatura ed all'umidità dell'ambiente: molti particolari sono stati misurati in tempi diversi sia della giornata sia del periodo dell'anno, e ripresi più volte per effettuare le diverse prove.

Per questa caratteristica i valori di specifica risultano essere:

- LSI = 50,019 mm
- LSC = 50,024 mm
- LSS = 50,029 mm

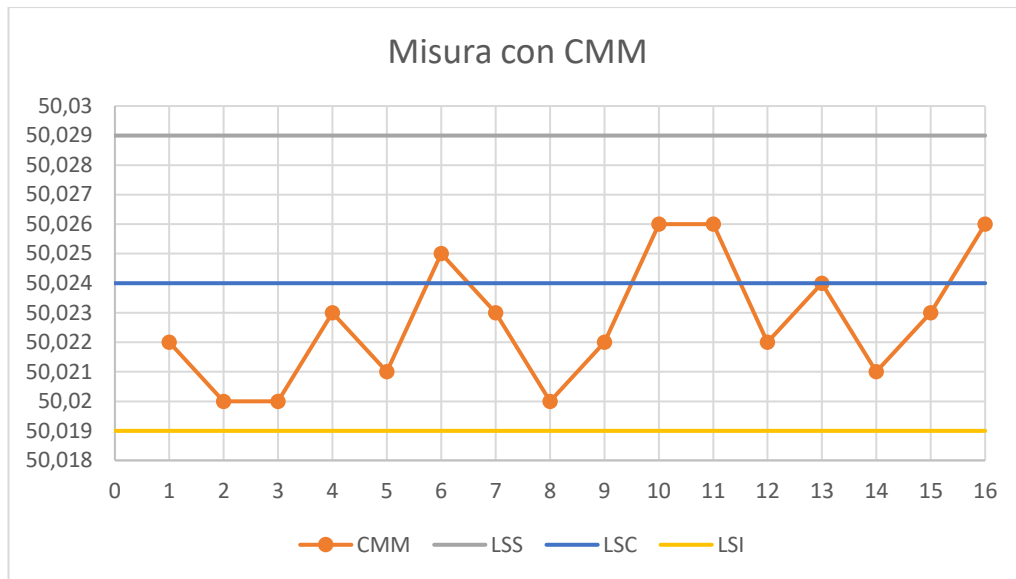
Controllo con CMM

Il controllo con CMM è stato effettuato prendendo la misura del diametro in 3 sezioni differenti del particolare e facendone una media: questo esclude anche alcuni errori dovuti alla cilindricità dell'intera superficie oltre che alla rotondità di ogni sezione di misura. Il controllo è stato effettuato misurando in scansione a 360° ogni sezione dopo che il particolare era stato allineato in macchina prendendo come riferimenti una sezione qualsiasi della pista stessa ed il piano costruito sulla superficie dello spallamento adiacente. Quando la tavola rotante viene messa in moto si crea però un errore di posizionamento del particolare dovuto all'allineamento non preciso e quindi all'inevitabile

errore di concentricità tra l'asse pezzo generato in fase di lavorazione e l'asse motore della macchina. Si è osservato tuttavia che grazie all'allineamento descritto in precedenza si riusciva ad escludere anche tale errore: misurando per punti e non in scansione il particolare, il valore medio e di deviazione standard associato a tali misure erano pressoché identici a quelli ottenuti per scansione. I dati relativi a tali misure sono presentati nella tabella seguente.

Misura	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	50,022	50,021	50,022	50,022	0
2	50,02	50,021	50,02	50,02	-0,002
3	50,02	50,019	50,02	50,02	0
4	50,022	50,023	50,024	50,023	0,003
5	50,021	50,022	50,021	50,021	-0,002
6	50,025	50,025	50,025	50,025	0,004
7	50,023	50,023	50,022	50,023	-0,002
8	50,02	50,021	50,02	50,02	-0,003
9	50,023	50,022	50,021	50,022	0,002
10	50,026	50,025	50,026	50,026	0,004
11	50,027	50,026	50,025	50,026	0
12	50,022	50,022	50,023	50,022	-0,004
13	50,024	50,024	50,025	50,024	0,002
14	50,021	50,021	50,021	50,021	-0,003
15	50,024	50,023	50,023	50,023	0,002
16	50,026	50,027	50,026	50,026	0,003

Il seguente grafico rappresenta la distribuzione dei valori rilevati all'interno del campo di tolleranza dei limiti di specifica.



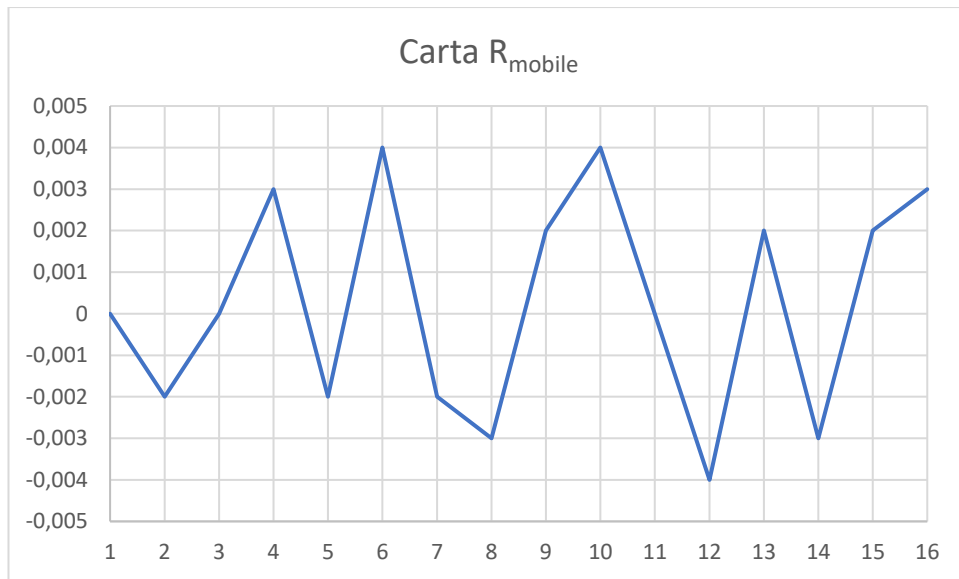
Tutti i particolari misurati risultano conformi al limite di specifica e notiamo che la maggior parte di essi si situa al di sotto del valore centrale. I valori della media, della varianza e della deviazione standard associati a tale controllo sono rispettivamente:

$$\mu = 50,023 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,002145 \text{ mm}$$

Trattandosi in questo testo di controllo al Controllo Finale e non in processo, non ha alcun senso parlare di Carte di Controllo ma, per uno scopo puramente illustrativo ed accademico, si è voluto anche rappresentare una carta R_{mobile} che tenga conto della differenza tra una misura e l'altra dei particolari scelti in modo casuale in periodi differenti. Tale misura può risultare utile per un confronto tra metodi diversi per identificare quanto possa variare una misura da un'altra, riferite allo stesso particolare, semplicemente utilizzando metodi diversi.



Controllo con macchina ottica

Il controllo con la macchina ottica è stato ottenuto serrando il particolare tra le punte della macchina. Una volta messa in rotazione la macchina, essa ha potuto scansionare e registrare il profilo del particolare al quale sono state associate le caratteristiche geometriche richieste a disegno. Avviando una seconda scansione la macchina è stata in grado di fornire il valore del diametro di ciascun particolare ricostruendo tutta la superficie cilindrica di interesse mentre il particolare era in rotazione. Con un apposito filtro di eliminazione dei valori aberranti si è riusciti ad eliminare alcuni punti anomali dovuti a presenza di impurità (specialmente granelli di polvere) sulle lenti della macchina oppure sulla superficie del particolare. I valori ottenuti sono rappresentati di seguito.

Particolare	Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media	R _{mobile}
1	50,021	50,022	50,022	50,022	0
2	50,024	50,023	50,022	50,023	0,001
3	50,02	50,019	50,019	50,019	-0,004
4	50,022	50,023	50,024	50,023	0,004
5	50,023	50,024	50,023	50,023	0
6	50,028	50,026	50,026	50,027	0,004
7	50,021	50,021	50,022	50,021	-0,006
8	50,02	50,021	50,02	50,02	-0,001
9	50,022	50,022	50,024	50,023	0,003
10	50,026	50,025	50,026	50,026	0,003
11	50,027	50,029	50,027	50,028	0,002
12	50,023	50,022	50,023	50,023	-0,005
13	50,024	50,024	50,026	50,025	0,002
14	50,023	50,024	50,023	50,023	-0,002
15	50,023	50,023	50,023	50,023	0
16	50,027	50,026	50,025	50,026	0,003

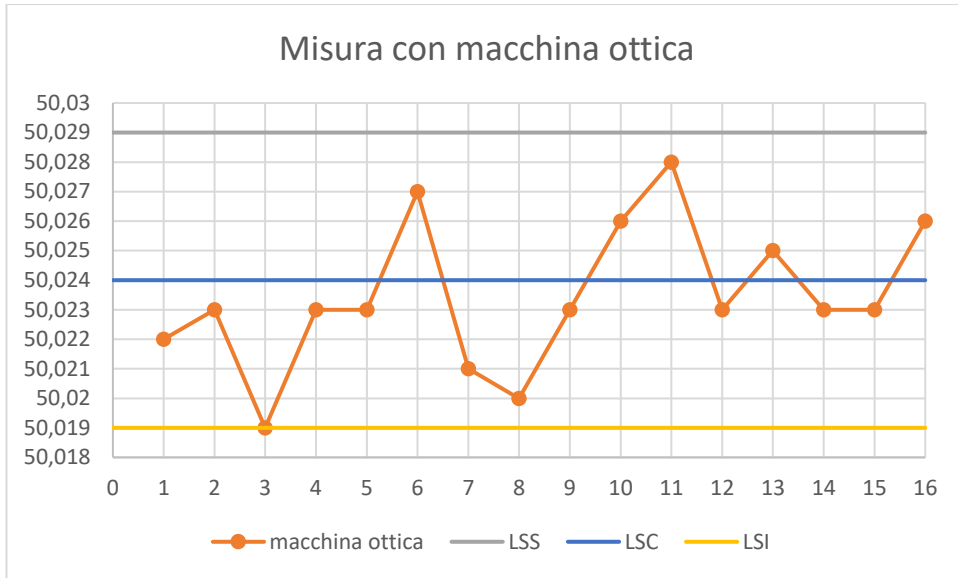
Con questo tipo di misura si ottengono rispettivamente i seguenti valori di media, varianza e deviazione standard:

$$\mu = 50,023 \text{ mm}$$

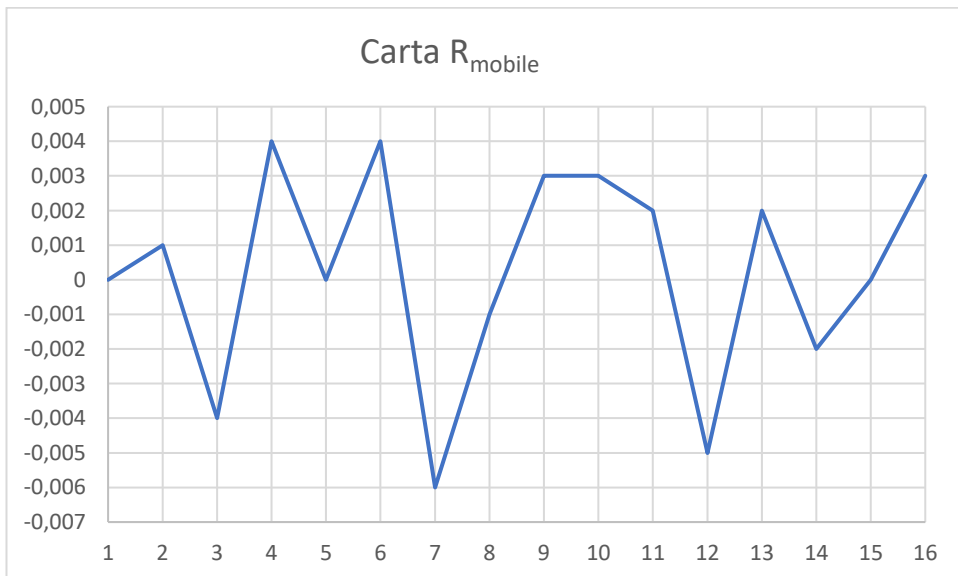
$$\sigma^2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,002449 \text{ mm}$$

La distribuzione di questi valori all'interno del campo di tolleranza è il seguente:



Il particolare numero 3 risulta, al valore medio, sul minimo della tolleranza a disegno ma ancora conforme alle specifiche, mentre gli altri elementi seguono una distribuzione variabile intorno al valore centrale. Possiamo costruire anche per questa misura il grafico del Range mobile che esprima la differenza tra una misurazione e la successiva di particolare differenti.



Controllo con rotondimetro

Il controllo con il rotondimetro è stato effettuato pressoché nello stesso modo di quello mediante CMM: si sono misurate tre sezioni distinte della sede cuscinetto di ciascun particolare dopo aver allineato il particolare in modo da minimizzare gli effetti distorcenti di misura dovuti ad errori di montaggio.

Particolare	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	50,021	50,021	50,022	50,021	0
2	50,019	50,02	50,021	50,02	-0,001
3	50,02	50,021	50,021	50,021	0,001
4	50,023	50,023	50,024	50,023	0,002
5	50,02	50,02	50,02	50,02	-0,003
6	50,025	50,024	50,024	50,024	0,004
7	50,021	50,022	50,022	50,022	-0,002
8	50,02	50,021	50,02	50,02	-0,002
9	50,022	50,022	50,021	50,022	0,002
10	50,024	50,025	50,026	50,025	0,003
11	50,027	50,028	50,027	50,027	0,002
12	50,023	50,022	50,022	50,022	-0,005
13	50,022	50,022	50,021	50,022	0
14	50,021	50,021	50,021	50,021	-0,001
15	50,025	50,024	50,023	50,024	0,003
16	50,027	50,028	50,026	50,027	0,003

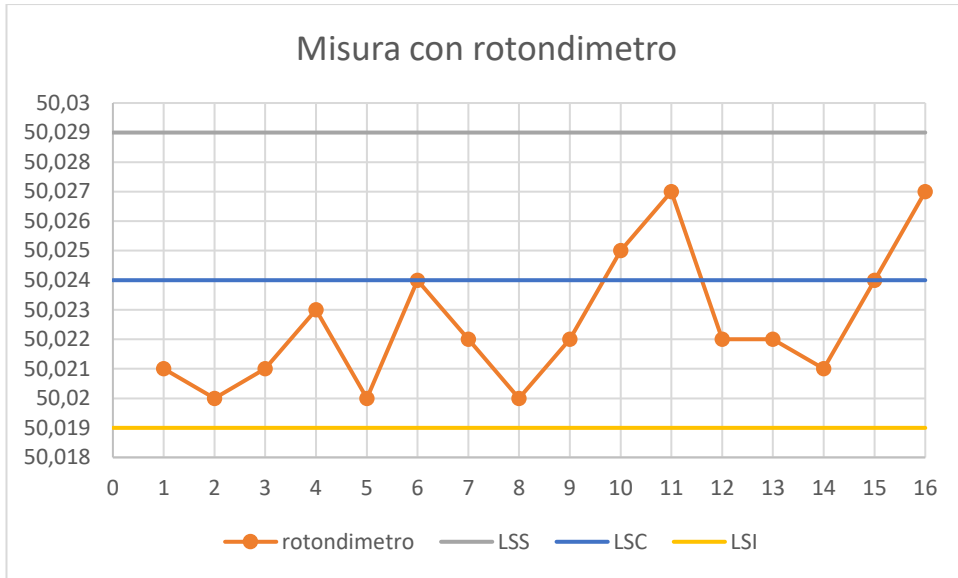
I valori associati di media, varianza e deviazione standard risultano rispettivamente:

$$\mu = 50,023 \text{ mm}$$

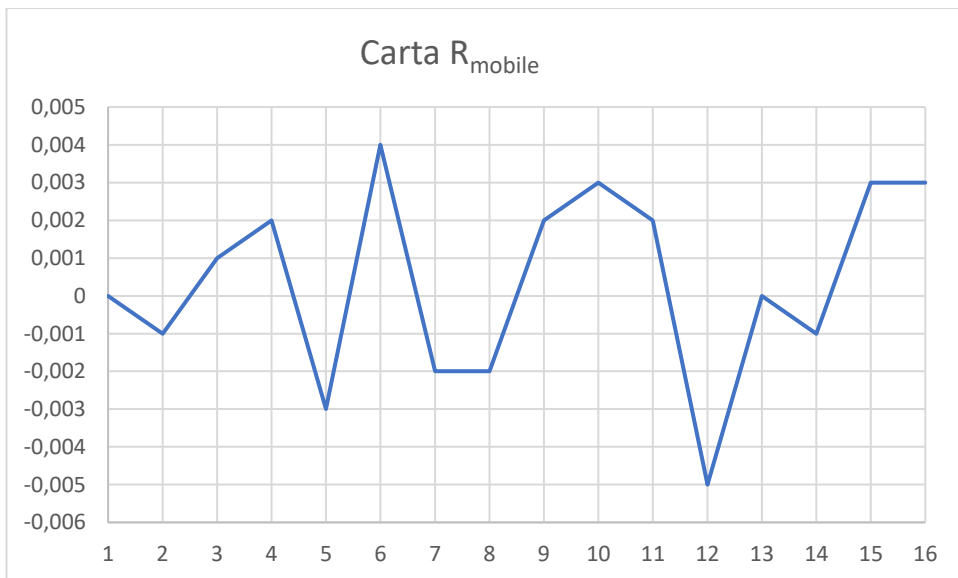
$$\sigma^2 = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,002279 \text{ mm}$$

La distribuzione dei valori all'interno dei limiti di specifica è espressa nel seguente grafico:



I valori di scostamento tra le misure di due particolari consecutivi sono invece rappresentati nel seguente grafico del Range mobile.



Controllo con micrometro

Il controllo con tale metodo è, tra tutti e 4 quelli utilizzati, il più difficile da attuare volendo ottenere un buon livello di misurazione. Il micrometro è stato azzerato con l'utilizzo dei blocchetti Johnson al valore di 50,020 mm e l'orologio ha una sensibilità di 0,001 mm. Sono state effettuate due o tre prove per ogni misura in 3 differenti sezioni del particolare e, in questo caso, l'allineamento del pezzo avveniva orientando lo strumento sia orizzontalmente per trovare il punto di massimo della sezione circolare, sia verticalmente per riuscire a misurare il più possibile in piano la sezione in modo tale da definire il valore di un raggio anziché un qualsiasi valore assiale di un'ellisse (riscontrabile qualora la misura non fosse avvenuta in modo perfettamente ortogonale all'asse della sede cuscinetto). Gli errori di misura in questo caso sono dovuti più all'errore umano che non allo strumento di misura o alla geometria stessa del particolare. Si ottengono errori sia in fase di azzeramento dello strumento, che si possono poi propagare in ogni misura successiva, sia in fase di rilevamento stesso della misura con l'errato posizionamento dello strumento. Tale metodo, inoltre, esegue una misura diametrale in solo due punti della superficie ed esclude così, al contrario degli altri metodi, di ottenere una media del valore elaborando anche l'errore di forma della superficie: si potrebbe ottenere un valore nella sezione più ristretta oppure in quella massima che sarebbero solo parzialmente indicativi della reale geometria del particolare. I valori ottenuti sono i seguenti:

Particolare	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	50,02	50,022	50,022	50,021	0
2	50,019	50,021	50,022	50,021	0
3	50,02	50,019	50,019	50,019	-0,002
4	50,026	50,026	50,024	50,025	0,006
5	50,024	50,022	50,021	50,022	-0,003
6	50,025	50,025	50,024	50,025	0,003
7	50,023	50,025	50,024	50,024	-0,001

8	50,024	50,024	50,023	50,024	0
9	50,023	50,024	50,023	50,023	-0,001
10	50,024	50,026	50,025	50,025	0,002
11	50,029	50,028	50,027	50,028	0,003
12	50,023	50,022	50,022	50,022	-0,006
13	50,025	50,026	50,026	50,026	0,004
14	50,022	50,021	50,02	50,021	-0,005
15	50,024	50,024	50,024	50,024	0,003
16	50,028	50,028	50,026	50,027	0,003

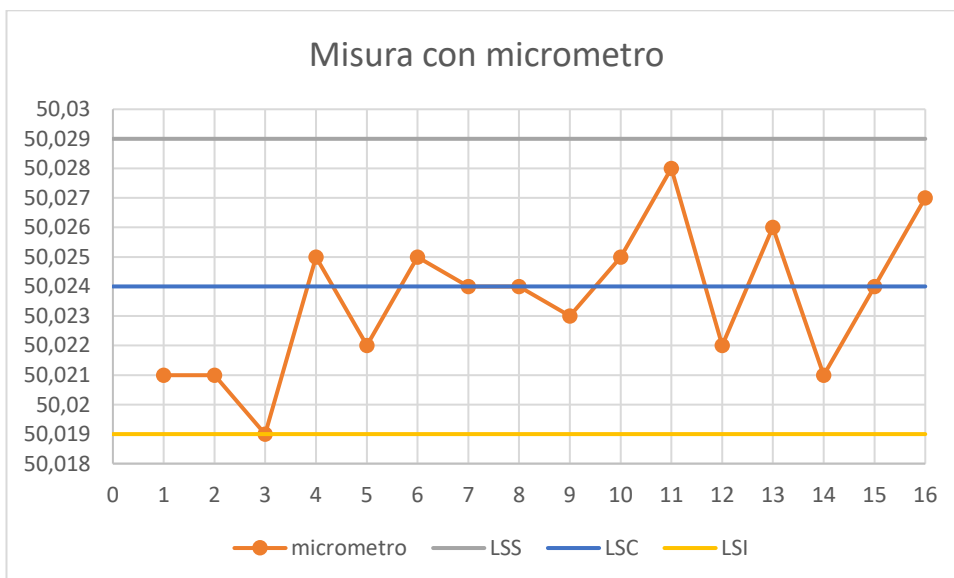
A valori medi di tali misure sono associati i rispettivi valori di media, varianza e scarto tipo:

$$\mu = 50,024 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

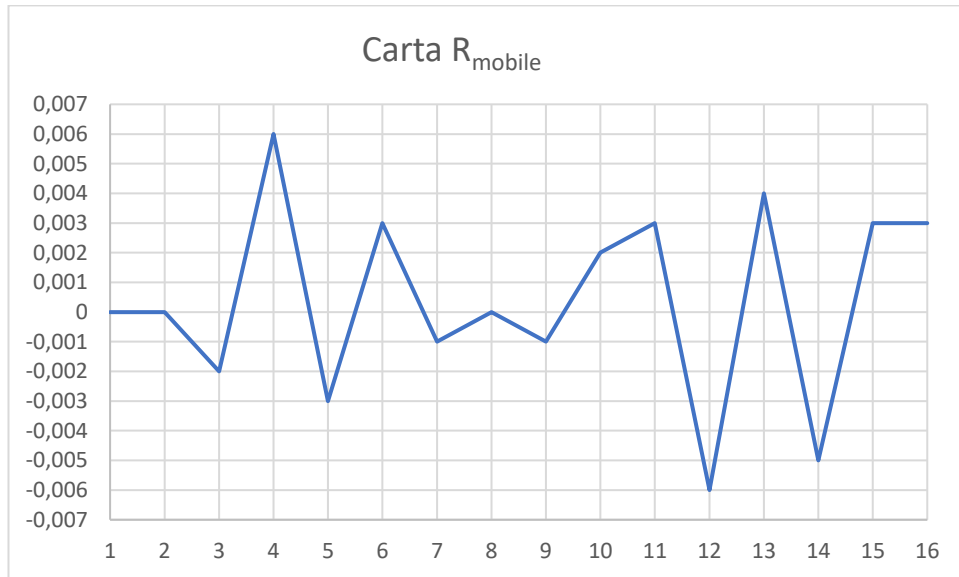
$$\sigma = 0,002449 \text{ mm}$$

I valori medi ottenuti per ciascun particolare sono così rappresentabili:



Anche in questo caso non si rilevano punti anomali, a parte il valore del particolare numero 3 che risulta sul minimo del campo di tolleranza. Analogamente, i valori del range mobile da una misura all'altra, sono

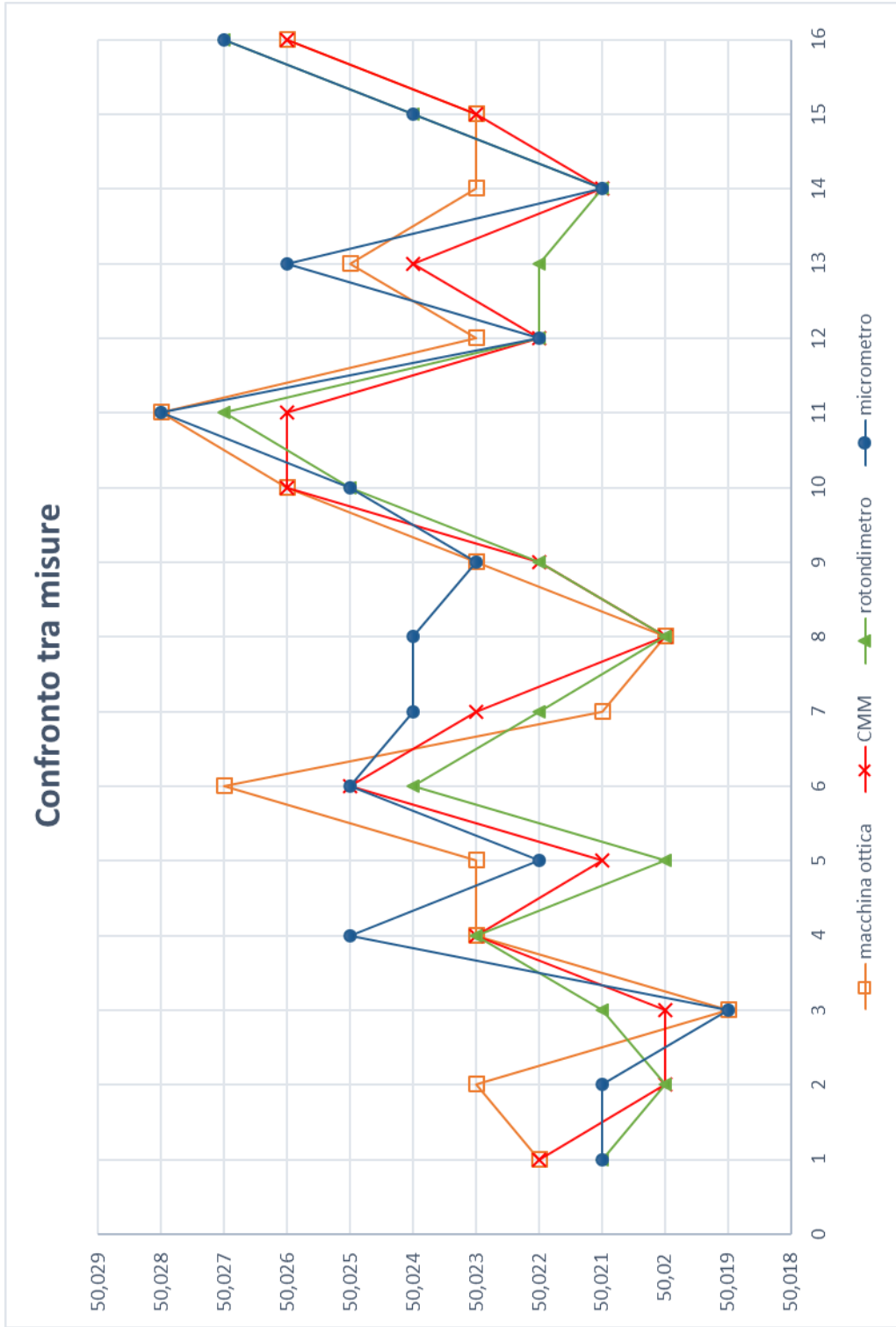
rappresentati qui sotto per evidenziare meglio come discostino le medie delle misure da un particolare all'altro.



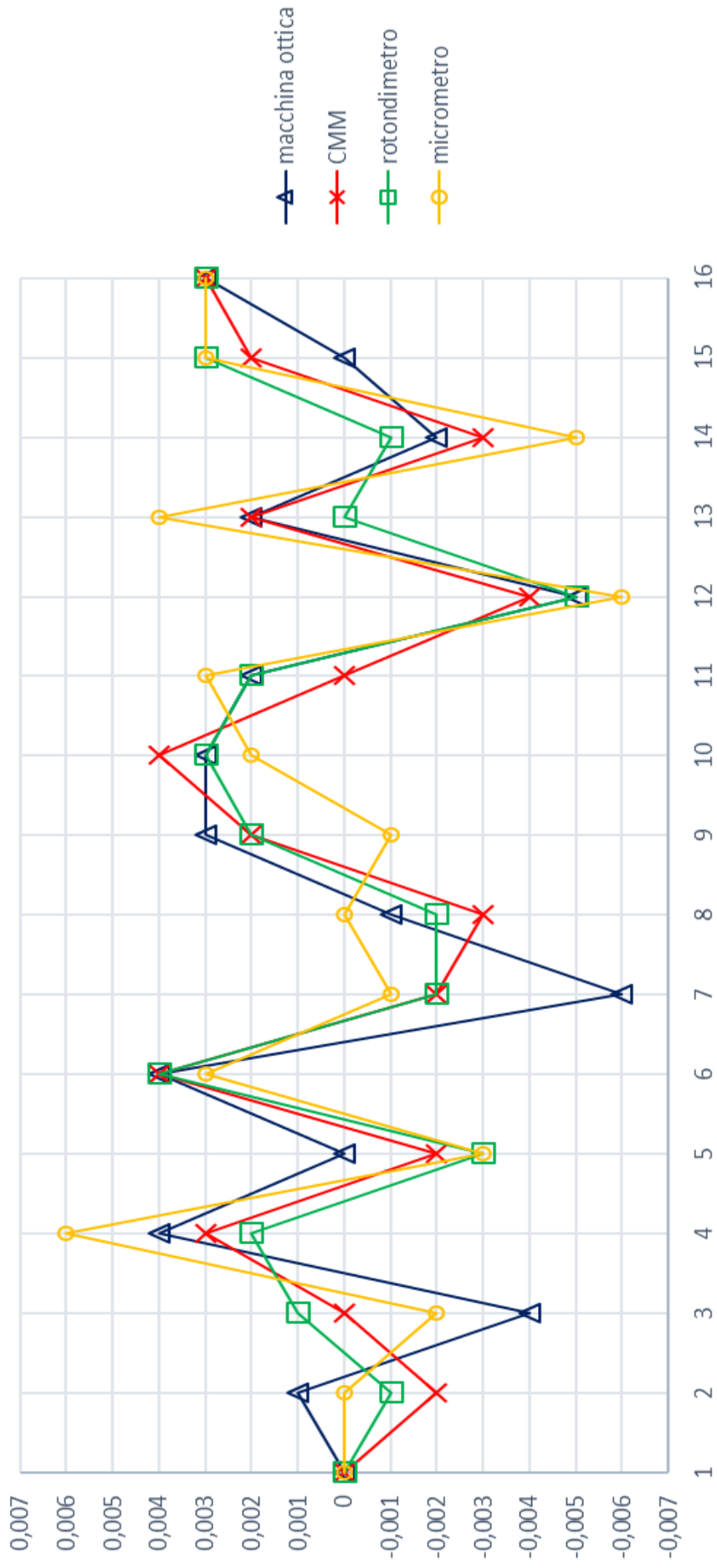
Confronto delle misure

In questo paragrafo si intende mettere a confronto graficamente i risultati ottenuti mediante i diversi metodi per osservare come le misure varino tra loro con l'utilizzo di un metodo piuttosto che di un altro. Il seguente grafico mette a confronto le misure rispetto ai limiti di specifica. Si può osservare ora più facilmente che, rispetto allo stesso particolare, gli andamenti delle tre macchine sono molto simili mentre i valori ottenuti con il micrometro per ogni particolare discostano anche di molto da un punto all'altro.

Nel successivo grafico invece è rappresentato lo scostamento, come Range mobile, delle misure da un particolare all'altro per ciascun metodo. I risultati rappresentati in questo grafico sono simili a quelli della media ma



Confronto R_{mobile}



Misura di una distanza

In questo paragrafo ci interessiamo di analizzare la misura della distanza tra gli spallamenti delle due sedi cuscinetto del particolare in esame. La misura è effettuata sia con strumenti da banco che con le macchine. Per ogni particolare – gli stessi trattati nel caso precedente – si sono nuovamente rilevate 3 misure di cui viene poi fatta la media per cercare di bilanciare l'errore di accuratezza della misurazione basato sulla precisione e sulla sensibilità dello strumento utilizzato. Tale quota presenta i seguenti limiti di specifica a disegno:

LSI = 138,150 mm

LSC = 138,200 mm

LSS = 138,250 mm

Il campo di tolleranza risulta quindi essere di 0,100 mm, simmetrico rispetto al valore nominale e cioè $\pm 0,050$ mm. Una simile misura presuppone che si debba utilizzare uno strumento con una sensibilità di un ordine di misura inferiore al valore del campo di tolleranza per ottenere una buona accuratezza della misura ma, essendo il nonio digitale lo strumento da banco più utilizzato a bordo macchina per ottenere almeno una prima idea delle quote realizzate, si è scelto di rilevare le misure anche con tale strumento. Tutti gli altri strumenti presentano invece la capacità di lettura dell'ordine di 10^{-6} m perciò si ritengono decisamente adatti a simili rilievi.

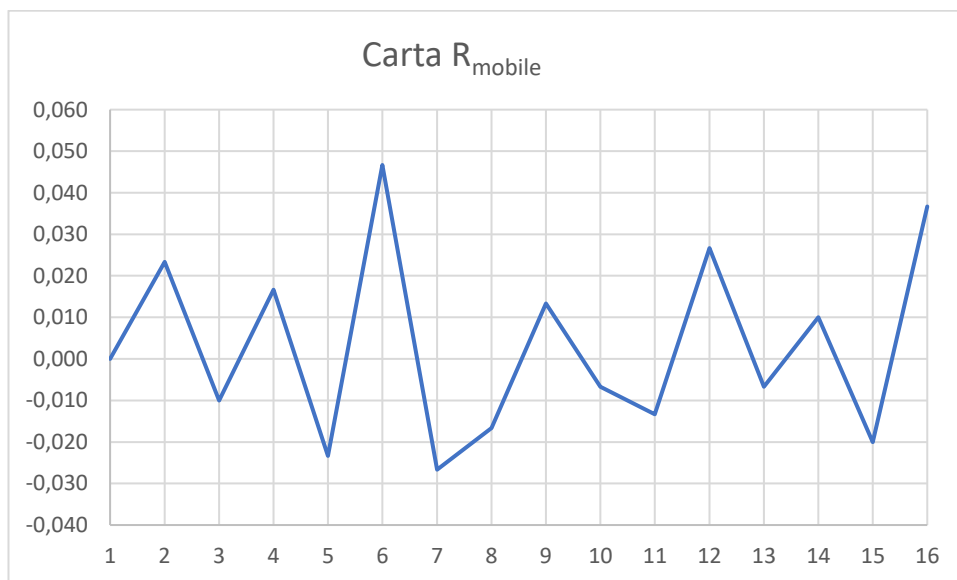
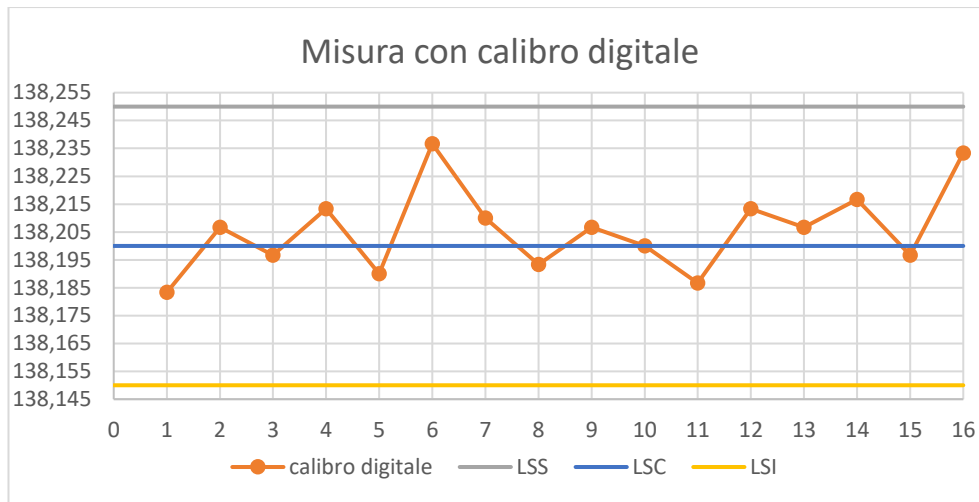
Misura con calibro digitale

Per il rilevamento di tale distanza si è utilizzato un calibro digitale a corsoio centesimale, ossia in grado di rilevare valori dell'ordine di 0,01 mm. La

misura è effettuata bloccando il particolare sul banchetto, tra punta e contropunta, in modo da tenerlo fermo nello spazio ma di permettere altresì la rotazione intorno al suo asse in modo da riuscire a rilevare tre misure, più o meno a 120° una dall'altra, per avere un valore medio che riduca in parte alcuni errori di misura. I dati raccolti sui particolari sono i seguenti:

Particolare	Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media	R _{mobile}
1	138,18	138,19	138,18	138,183	0,000
2	138,21	138,21	138,2	138,207	0,023
3	138,19	138,2	138,2	138,197	-0,010
4	138,22	138,21	138,21	138,213	0,017
5	138,19	138,19	138,19	138,190	-0,023
6	138,24	138,23	138,24	138,237	0,047
7	138,21	138,21	138,21	138,210	-0,027
8	138,19	138,2	138,19	138,193	-0,017
9	138,2	138,21	138,21	138,207	0,013
10	138,2	138,2	138,2	138,200	-0,007
11	138,19	138,19	138,18	138,187	-0,013
12	138,21	138,22	138,21	138,213	0,027
13	138,21	138,21	138,2	138,207	-0,007
14	138,22	138,21	138,22	138,217	0,010
15	138,2	138,19	138,2	138,197	-0,020
16	138,23	138,24	138,23	138,233	0,037

Per un miglior confronto con gli altri strumenti, si è scelto di rappresentare il valore medio con un'accuratezza millesimale anziché centesimale propria dello strumento. In questo modo, avendo effettuato più misure sullo stesso particolare, siamo in grado di fornire un valore teorico più apprezzabile e più vicino al valore reale del particolare, almeno sotto da un punto di vista teorico. I valori registrati sono graficamente rappresentati di seguito insieme all'andamento del range mobile, ossia dello scostamento del valore medio tra due particolari prodotti consecutivamente.

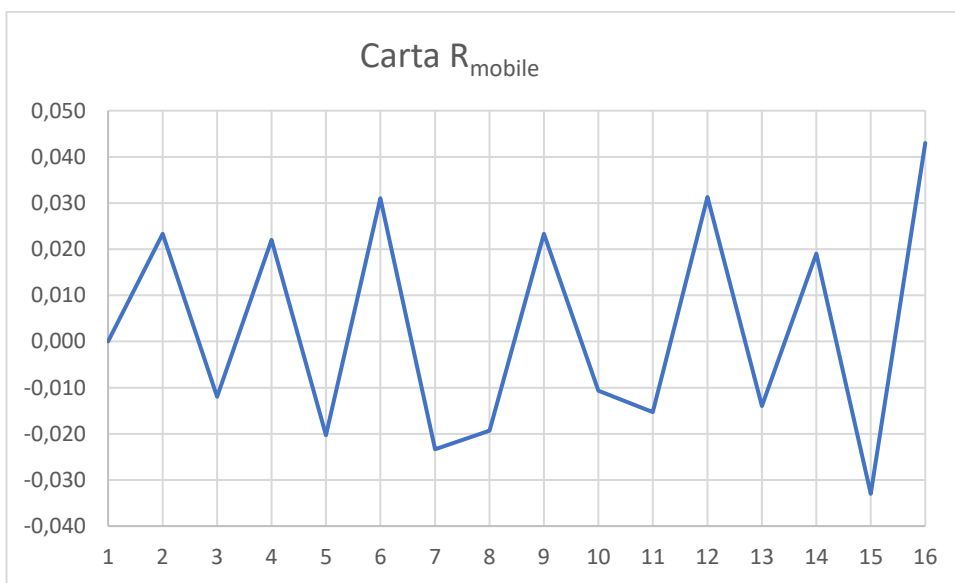
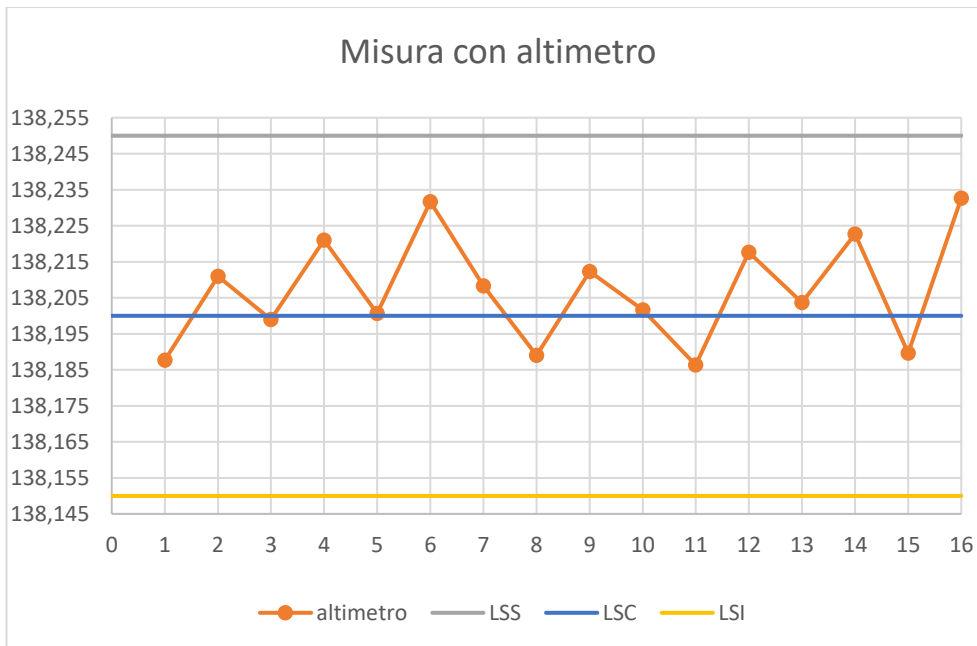


Misura con altimetro

La misura mediante altimetro risulta molto agevole qualora si debbano misurare dei punti su superfici la cui normale va nella stessa direzione mentre è assai complicato, per via degli ingombri del tastatore e delle caratteristiche costruttive del particolare, qualora siano su superfici opposte. Siccome nel nostro caso la sua geometria non ci permette di misurare direttamente la quota luce, si è dovuto fare in modo di realizzare un pannello di appoggio del

particolare che minimizzasse i punti di contatto tra pezzo e plateau dello strumento e che potesse fungere come piano di riscontro e di azzeramento. Si sono quindi presi tre blocchetti Johnson di uguale dimensioni e si sono posizionati in modo tale da potervi appoggiare sopra i particolari riducendo al minimo il punto di contatto tra questo e gli stessi ma garantendo comunque stabilità al particolare. Si è provato a verificare il valore di planarità riscontrato sui tre blocchetti dopo essersi azzerati in un punto solo di uno dei tre la massima differenza ottenuta era dell'ordine di $3 \cdot 10^{-6}$ metri. A questo punto si è proceduto al controllo della distanza utilizzando lo strumento per battere solo una serie di punti solo sul rasamento più in altro mentre l'altro era a contatto con la superficie di azzeramento che veniva ricontrollato ad ogni cambio di particolare da misurare. Dopo aver ruotato il particolare di circa 120° per volta per ottenere 3 valori differenti della stessa distanza tra le medesime superfici, i valori rilevati sono qui raccolti:

Particolare	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	138,186	138,188	138,189	138,188	0,000
2	138,213	138,209	138,211	138,211	0,023
3	138,197	138,198	138,202	138,199	-0,012
4	138,219	138,222	138,222	138,221	0,022
5	138,198	138,201	138,203	138,201	-0,020
6	138,234	138,231	138,23	138,232	0,031
7	138,208	138,209	138,208	138,208	-0,023
8	138,189	138,187	138,191	138,189	-0,019
9	138,211	138,213	138,213	138,212	0,023
10	138,202	138,203	138,2	138,202	-0,011
11	138,186	138,187	138,186	138,186	-0,015
12	138,216	138,219	138,218	138,218	0,031
13	138,205	138,203	138,203	138,204	-0,014
14	138,223	138,221	138,224	138,223	0,019
15	138,191	138,19	138,188	138,190	-0,033
16	138,233	138,234	138,231	138,233	0,043



Misura con proiettore

Per una miglior messa a fuoco della superficie si è scelto di utilizzare un ingrandimento ottico di 50x del particolare. Il problema qui è stato posizionare il particolare in modo perfettamente ortogonale rispetto al fascio

di luce: una leggera inclinazione del pezzo genera un riflesso distorto che confonde le misure e può alterare in modo sensibile il rilievo della quota. Si è quindi pulito accuratamente il piano di appoggio della slitta mobile del proiettore e si sono posizionati tre spessori uguali e con le superficie lappate a specchio sui quali si è appoggiato il particolare facendolo toccare in tre soli “punti” per evitare l’accumularsi di errori di posizionamento. Ogni particolare è stato azzerato su una delle 2 superfici parallele e poi ci si è spostati verticalmente fino a far combaciare il piano dell’altra con la linea orizzontale di zero dello schermo. A questo punto il particolare è stato ruotato altre due volte di circa 120° per ottenere 3 misure sulle quali fare la media e provare quindi a contrastare l’errore di posizionamento. I valori ottenuti sono:

Particolare	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	138,195	138,188	138,198	138,194	0,000
2	138,203	138,209	138,204	138,205	0,012
3	138,208	138,203	138,204	138,205	0,000
4	138,221	138,218	138,219	138,219	0,014
5	138,192	138,188	138,193	138,191	-0,028
6	138,227	138,231	138,236	138,231	0,040
7	138,218	138,22	138,215	138,218	-0,014
8	138,202	138,2	138,201	138,201	-0,017
9	138,217	138,213	138,213	138,214	0,013
10	138,207	138,209	138,211	138,209	-0,005
11	138,193	138,195	138,197	138,195	-0,014
12	138,218	138,22	138,219	138,219	0,024
13	138,211	138,209	138,213	138,211	-0,008
14	138,215	138,221	138,22	138,219	0,008
15	138,198	138,204	138,206	138,203	-0,016
16	138,229	138,234	138,236	138,233	0,030

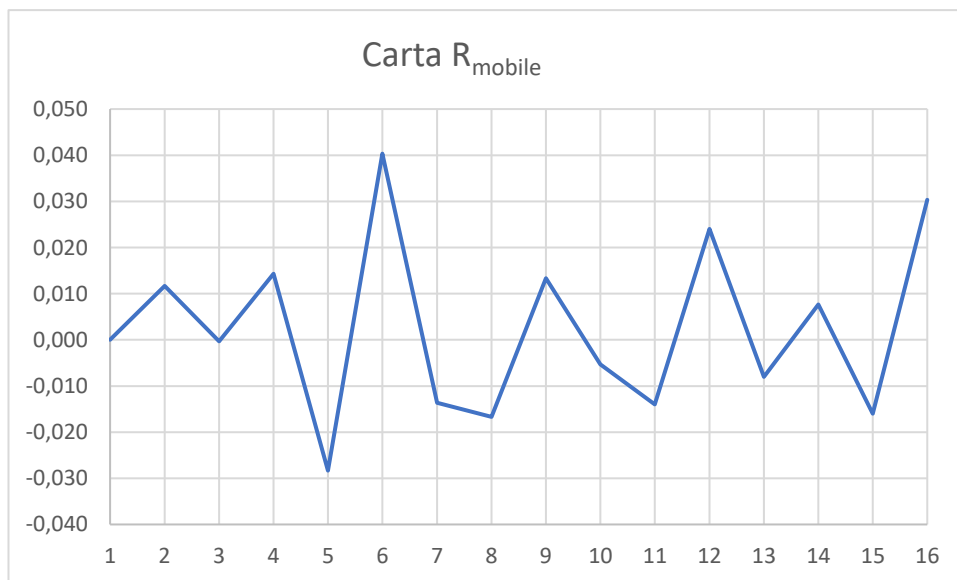
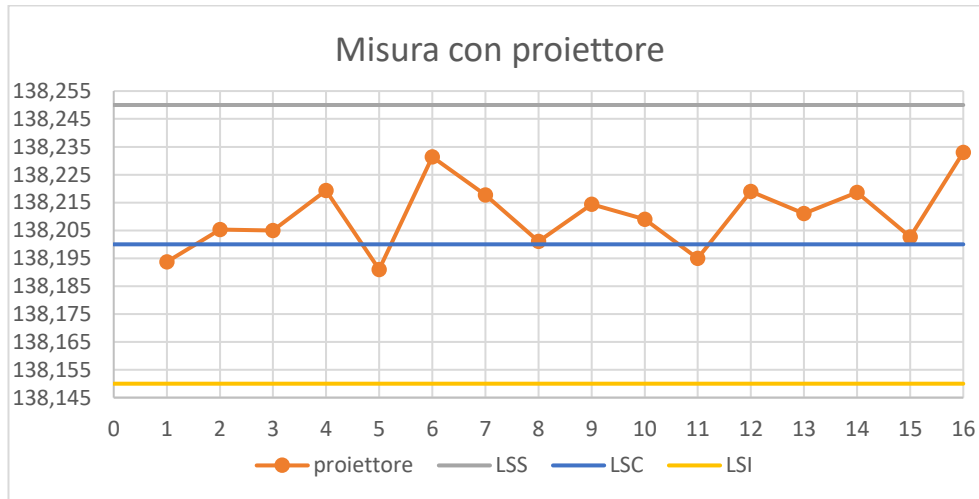
I valori di media, varianza e deviazione standard associati ai valori medi delle diverse misure sono, rispettivamente:

$$\mu = 138,210 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 156 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,012485 \text{ mm}$$

I dati medi raccolti sono rappresentati graficamente nel seguente grafico:



Misura con macchina ottica

Il particolare è stato vincolato tra le due punte rispetto ai suoi centri e al primo avvio della scansione la macchina si è costruita il profilo del particolare di rivoluzione. Sono state indicate poi alla macchina le misure da elaborare, rispetto a quali elementi allineare il particolare (in questo caso le due piste cuscinetto adiacenti ai due rasamenti da misurare) e quali filtri utilizzare per l'eliminazione dei valori aberranti⁵. Si sono svolte, per ciascun particolare, tre misure di cui è stata fatta la media e che sono di seguito riportati.

Particolare	Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media	R _{mobile}
1	138,188	138,19	138,189	138,189	0,000
2	138,211	138,209	138,211	138,210	0,021
3	138,199	138,198	138,202	138,200	-0,011
4	138,223	138,224	138,224	138,224	0,024
5	138,204	138,202	138,203	138,203	-0,021
6	138,234	138,235	138,235	138,235	0,032
7	138,211	138,211	138,213	138,212	-0,023
8	138,193	138,193	138,191	138,192	-0,019
9	138,216	138,217	138,215	138,216	0,024
10	138,202	138,203	138,202	138,202	-0,014
11	138,19	138,191	138,192	138,191	-0,011
12	138,216	138,214	138,214	138,215	0,024
13	138,208	138,207	138,208	138,208	-0,007
14	138,221	138,221	138,22	138,221	0,013
15	138,193	138,193	138,192	138,193	-0,028
16	138,236	138,234	138,235	138,235	0,042

⁵ I filtri non alterano in alcun modo il valore dimensionale della misura del particolare ma hanno l'effetto di eliminare eventuali picchi oltre un certo valore percentuale dell'errore ammesso dalla macchina per non distorcere il reale valore della media.

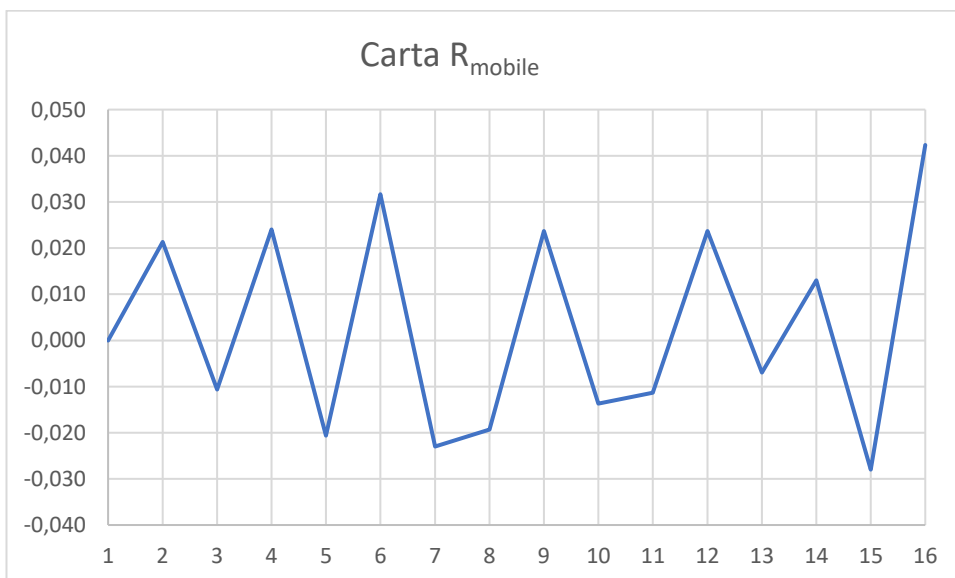
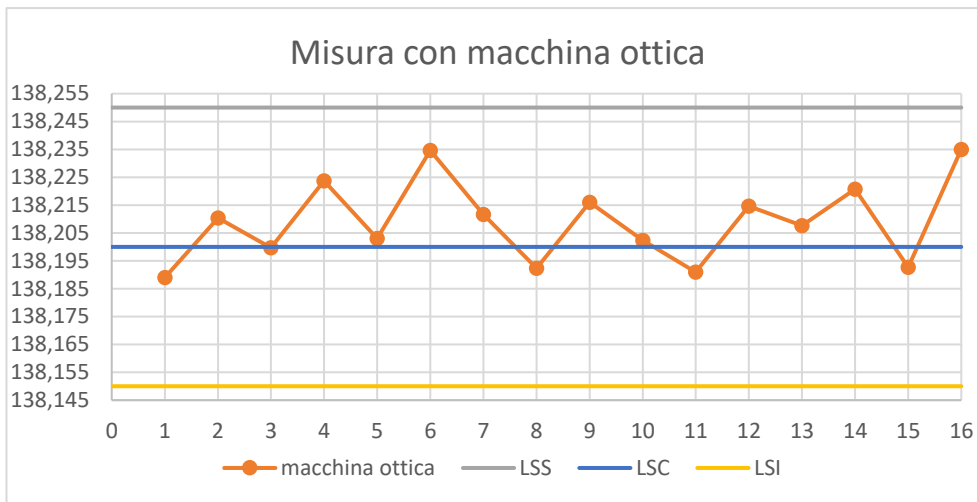
I valori della media, della varianza e dello scarto tipo sono rispettivamente:

$$\mu = 138,209 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 214,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,014638 \text{ mm}$$

Le rappresentazioni grafiche dei valori medi e dello scostamento degli stessi da un particolare al successivo sono espone qui di seguito.



Misura con CMM

Per uniformare e velocizzare il rilievo di tali quote, si è preferito allineare il particolare in macchina rispetto alle sedi cuscinetto e rilevare la distanza tra i due rasamenti costruendo due piani teorici per punti e non per scansione. La macchina genera un piano infinito che ha per normale l'asse del particolare ma i due piani reali possono essere tra loro sghembi e comporta una diversa distanza tra loro man mano che ci si allontana dall'asse pezzo. Per sopperire a tale problema si può indicare alla macchina sia il diametro minimo interno, sia il diametro esterno della sezione anulare planare che si vuole analizzare in modo che la macchina tenga conto dei punti massimo, minimo e medio di distanza tra i due piani in questo intervallo radiale. La misura è stata effettuata tre volte per ciascun particolare prendendo una serie di punti in un arco di circa 120° ogni volta su entrambi i piani di misura. I valori ottenuti sono:

Particolare	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	138,191	138,19	138,189	138,190	0,000
2	138,208	138,209	138,209	138,209	0,019
3	138,203	138,201	138,202	138,202	-0,007
4	138,22	138,221	138,221	138,221	0,019
5	138,204	138,205	138,203	138,204	-0,017
6	138,233	138,233	138,235	138,234	0,030
7	138,211	138,211	138,21	138,211	-0,023
8	138,191	138,193	138,192	138,192	-0,019
9	138,215	138,215	138,216	138,215	0,023
10	138,2	138,203	138,202	138,202	-0,014
11	138,192	138,191	138,19	138,191	-0,011
12	138,213	138,214	138,212	138,213	0,022
13	138,205	138,205	138,206	138,205	-0,008
14	138,219	138,22	138,218	138,219	0,014
15	138,192	138,191	138,192	138,192	-0,027
16	138,232	138,233	138,231	138,232	0,040

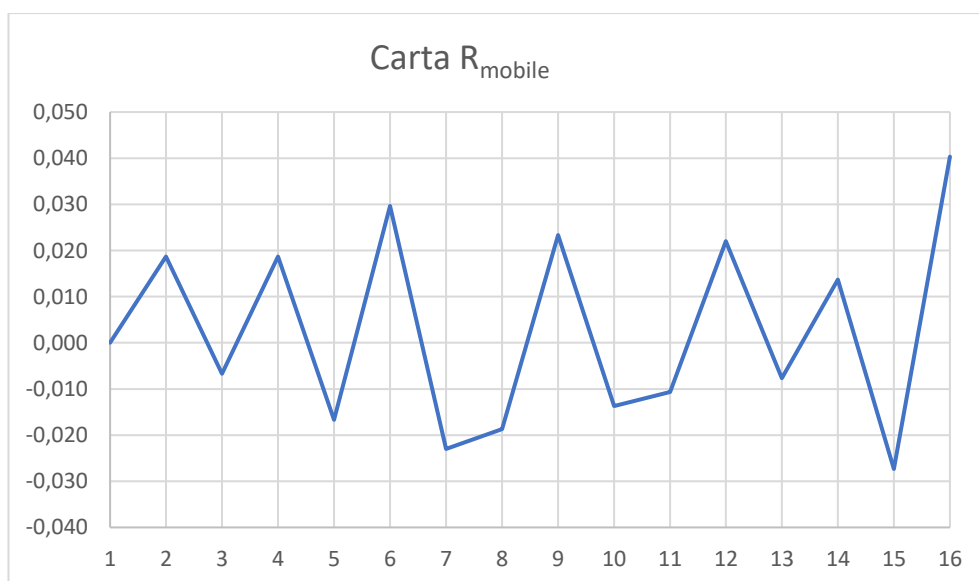
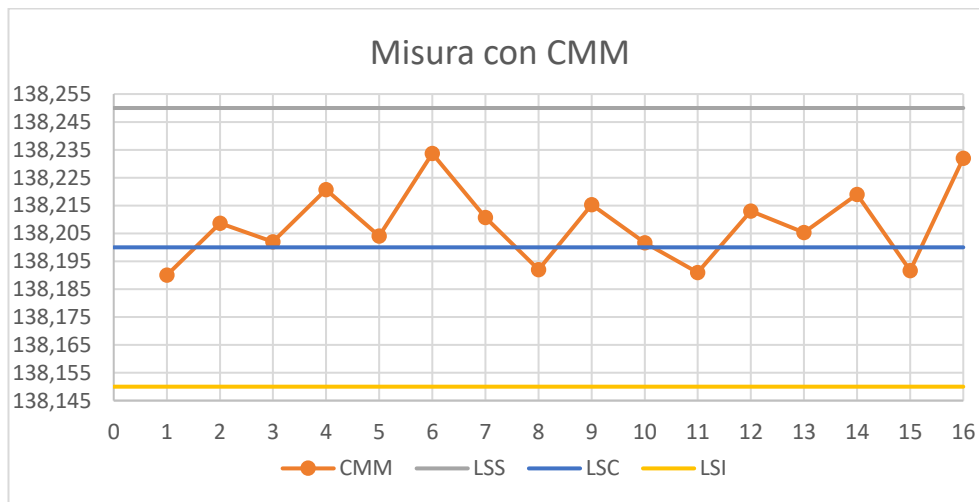
I valori associati di media, varianza e deviazione standard ai valori medi dei sopra riportati sono rispettivamente:

$$\mu = 138,208 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 189,1 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,013753 \text{ mm}$$

Di seguito sono rappresentati graficamente, all'interno del campo di tolleranza, i valori medi ottenuti e la differenza tra un valore medio ed il successivo per ogni misura effettuata.



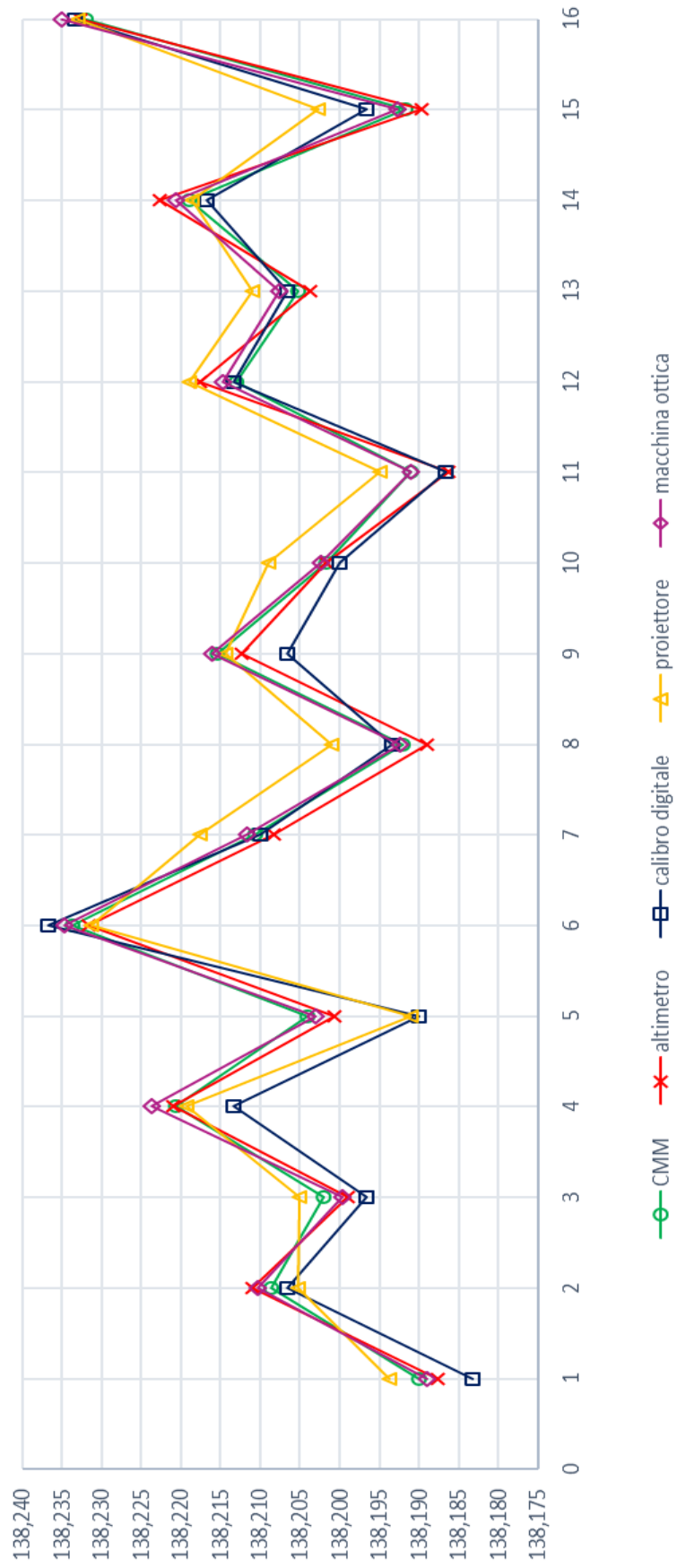
Confronto delle misure

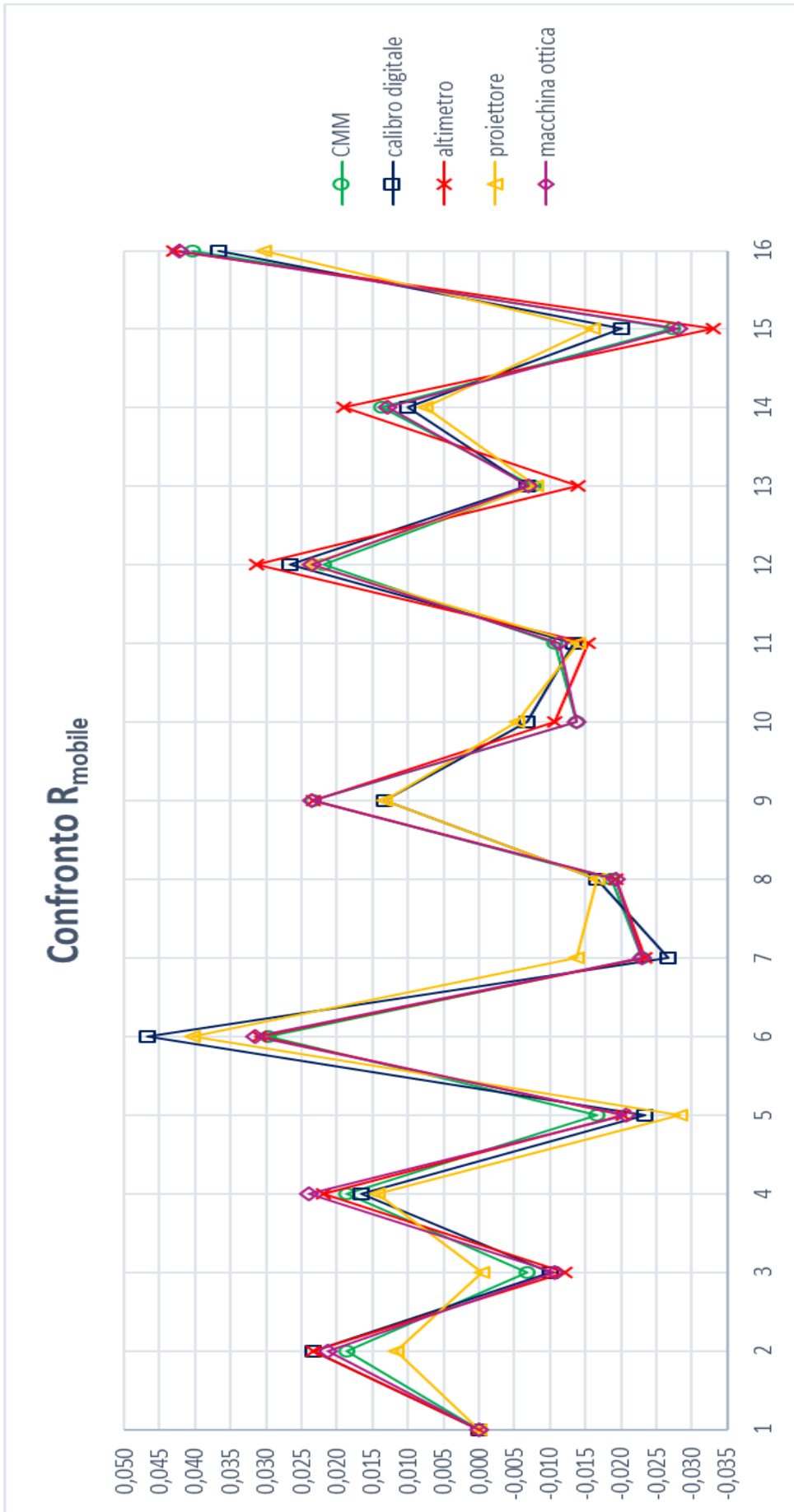
In questo paragrafo si vogliono mettere a confronto, esattamente come è stato fatto per la misura del diametro, i risultati ottenuti con i precedenti metodi per osservare sia dal punto di vista del valore medio che dall'andamento dello scostamento tra diverse misure come si possano spiegare i risultati ottenuti.

Il primo grafico mostra l'andamento dei valori medi ottenuti con ciascun metodo. Non vengono più rappresentati i valori dei limiti di specifica dato che si è osservato che, attraverso il rilievo con ciascuno dei precedenti strumenti, non si rilevano valori anomali oltre tolleranza. Tale grafico serve ad osservare come, per ogni particolare, un differente strumento o macchinario, fornisca un diverso valore di quella stessa caratteristica presa in esame. Si osserva immediatamente che la CMM, la macchina di misura ottica e l'altimetro hanno un andamento pressoché sovrapposto in molti punti, cioè presentano per molti particolari, dei risultati molto simili e poco differenti gli uni dagli altri. Una prima osservazione da fare è che, nonostante i valori della grande media di tutte le prove eseguite sia molto simile tra tutte le misure, i valori delle singole prove possono essere molto inconsistenti se paragonati tra prove diverse. Il metodo meno preciso e più distante dagli altri risulta essere il proiettore ottico che, proprio per via della difficoltà di una lettura precisa della proiezione, presenta valori molto distanti dagli altri per dei grandi tratti. Valori intermedi ma ancora poco precisi rispetto a quelli ottenibili dagli altri, sono dati dal calibro digitale che risulta quindi un metodo semplice e veloce per avere, almeno in prima analisi, un'idea dei possibili range di valori ricercati. Gli altri 3 metodi, restituendo per molti particolari valori molto prossimi gli uni agli altri, garantiscono un buon livello di fiducia della misura ed una buona alternativa di misura gli uni per gli altri. Dal confronto del range mobile osserviamo invece il livello di replicabilità della misura. Alcuni strumenti o macchinari, per esempio, nonostante forniscano dei valori medi differenti tra loro, qualora presentino un andamento molto simile del range mobile, possono indicare che vi può essere una staratura di uno dei due dato che esso potrebbe leggere gli stessi valori dell'altro ma con un Δ di errore fisso. Si osserva che il proiettore restituisce valori molto dispersivi rispetto a

quelli raccolti dagli altri metodi mentre il calibro presenta andamenti molto prossimi a quelli degli altri 3 metodi ma molto altalenanti in fatto di perfetta sostituibilità con gli altri metodi.

Confronto dei valori medi





Misura di un run-out

In questo paragrafo l'obiettivo è quello di riprendere in mano tutti i particolari ed ottenere per ognuno il valore dell'oscillazione della sede cuscinetto precedentemente misurata, rispetto alla richiesta del disegno. Esso richiede infatti un run-out assoluto massimo di 0,0127 mm dell'elemento rispetto all'asse costruito sulle due sedi cuscinetto del particolare. In questo caso il campo di tolleranza è il valore assoluto dell'oscillazione e, essendo il minimo valore nullo (totale assenza di errore di forma e di eccentricità del particolare rispetto all'asse) e non essendo permesso, per definizione del concetto espresso dalla tolleranza geometrica stessa stessa, alcun valore negativo, ricaveremo solo valori positivi. Essendo la pista un vincolo e quindi un riferimento principale, ci si deve aspettare comunque un valore rilevato basso dato che, costruttivamente, la maggior componente del run-out sarà dovuta, in questo caso all'errore di forma della sede stessa. Tale errore non potrà comunque, teoricamente, essere molto elevato poiché la pista è un elemento primario preciso dovendo ospitare il cuscinetto ed essendo uno dei punti di scarico delle tensioni dal particolare al resto del sistema esterno. Proprio come i precedenti test, si sono effettuate tre prove per ogni strumento/macchinario utilizzato in modo da mediare la variabilità del metodo di misura utilizzato e dell'errore intrinseco del particolare.

Misura con pupitast

Per effettuare tale misura si è dovuto preparare il banchetto di prova con i supporti a rulli sui quale appoggiare il particolare. Trattandosi di un run-out rispetto alle piste cuscinetto, si è modificato in altezza ognuno dei sostegni per compensare le differenze diametrali dei due elementi di vincolo ed avere il particolare in piano. Si è quindi appoggiata la punta sferica del pupitast sulla superficie cilindrica, tenuto fermo dal suo attrezzo a gomito snodabile e una base magnetica per evitare spostamenti indesiderati, e si è registrata la

pressione dello strumento in modo che in quel punto l'orologio segnasse lo zero. Ponendo manualmente in rotazione il particolare si è osservato l'andamento generale dell'oscillazione dell'orologio nell'intero arco di 360° gradi. A questo punto, per una miglior interpretazione della misura letta sullo strumento, si è cercato sulla superficie il punto di minimo letto dallo strumento e si è nuovamente azzerato il valore letto dall'orologio del pupitast millesimale: in questo modo, essendo per definizione il run-out una tolleranza geometrica con valore assoluto positivo, si è potuto interpretare più correttamente il valore letto e successivamente compararlo con la specifica a disegno. Come anticipato, la misura è stata fatta su 3 diverse sezioni della sede cuscinetto in modo da avere una miglior interpretazione del valore fornito tenendo quindi anche conto dell'errore di forma implicito dell'elemento. I valori ottenuti sono qui riassunti:

Particolar e	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	Range
1	0,008	0,009	0,008	0,008	0,001
2	0,006	0,008	0,005	0,006	0,003
3	0,007	0,008	0,008	0,008	0,001
4	0,005	0,005	0,006	0,005	0,001
5	0,009	0,01	0,009	0,009	0,001
6	0,007	0,004	0,006	0,006	0,003
7	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000
8	0,006	0,006	0,005	0,006	0,001
9	0,008	0,007	0,009	0,008	0,002
10	0,006	0,008	0,008	0,007	0,002
11	0,009	0,01	0,01	0,010	0,001
12	0,008	0,006	0,006	0,007	0,002
13	0,007	0,011	0,009	0,009	0,004
14	0,005	0,006	0,005	0,005	0,001
15	0,011	0,007	0,009	0,009	0,004
16	0,007	0,006	0,008	0,007	0,002

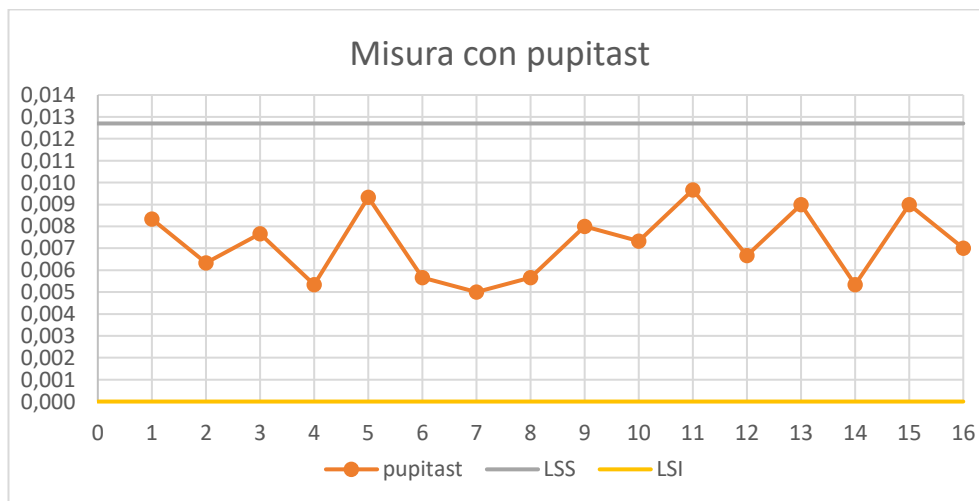
I valori di media, varianza e deviazione standard valgono rispettivamente:

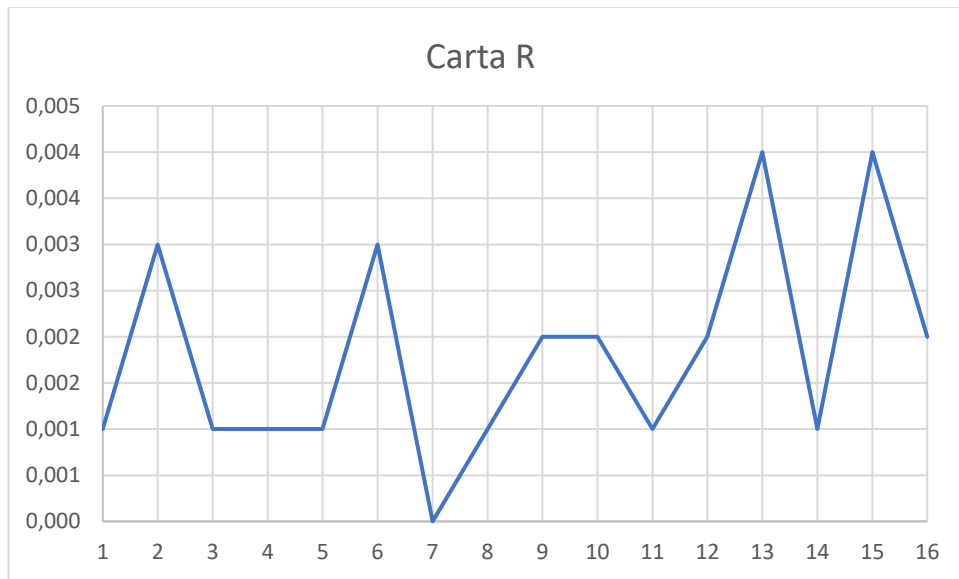
$$\mu = 0,007 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,001568 \text{ mm}$$

La rappresentazione grafica dei valori medi di ogni particolare è osservabile nel primo grafico mentre nel secondo grafico si è voluto rappresentare, al contrario delle precedenti prove, non più il valore del range mobile da un particolare di produzione al successivo ma il valore del range di variabilità di misura per ogni particolare relativamente ai tre valori ottenuti per ognuno di essi. Tale dato non è molto significativo ma, in prima battuta, risulta utile per capire la variabilità di ciascuno strumento/macchinario nel misurare gli stessi elementi. Se i valori fossero troppo discordi da un metodo all'altro, si dovrebbe accendere un campanello d'allarme nella testa del collaudatore che lo induca a cercare le cause di tale anomalia.





Misura con Rotondimetro

Il particolare viene bloccato nella parte inferiore su un mandrino autocentrante con griffe da interno, la macchina viene avviata e il mandrino posto in rotolamento. L'allineamento, con l'utilizzo di un apposito tastatore con la punta sferica in rubino industriale, viene eseguito per contatto di strisciamento su entrambe le piste e crea l'asse di riferimento del particolare. Una volta effettuato l'allineamento completo tra asse pezzo e asse della tavola rotante della macchina, si procede ad indicarle quali elementi e quante sezioni di questo si necessita rilevare. Nel nostro caso, proprio come per gli altri due strumenti, si è scelto di rilevare tre sezioni differenti della stessa pista cuscinetto. Risulta doveroso precisare che tale elemento è posto in alto, lontano dalla base e dal punto di ancoraggio del particolare e che tale montaggio con particolare a sbalzo potrebbe generare degli errori a causa appunto dell'oscillazione osservata a tale distanza dal vincolo di rotazione: il particolare potrebbe soffrire di un movimento giroscopico che causi errori nella valutazione dell'errore di run-out proprio del particolare. I risultati ottenuti da tale prova sono i seguenti per tutti i particolari:

Particolar e	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	Range
1	0,005	0,006	0,008	0,006	0,003
2	0,004	0,003	0,003	0,003	0,001
3	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000
4	0,004	0,002	0,002	0,003	0,002
5	0,005	0,004	0,005	0,005	0,001
6	0,005	0,002	0,005	0,004	0,003
7	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000
8	0,003	0,002	0,003	0,003	0,001
9	0,005	0,002	0,003	0,003	0,003
10	0,002	0,003	0,003	0,003	0,001
11	0,009	0,01	0,01	0,010	0,001
12	0,004	0,003	0,004	0,004	0,001
13	0,003	0,006	0,003	0,004	0,003
14	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001
15	0,008	0,007	0,007	0,007	0,001
16	0,003	0,002	0,004	0,003	0,002

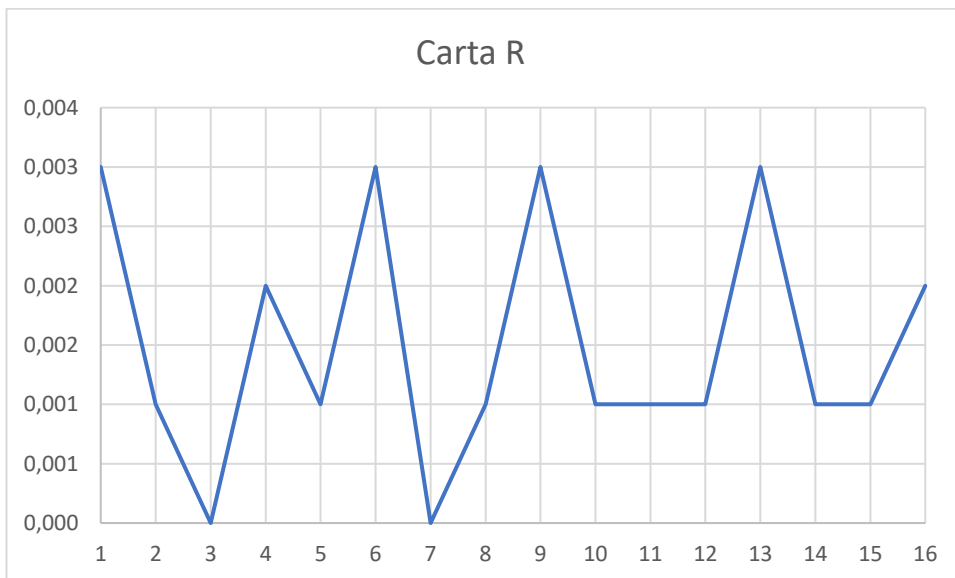
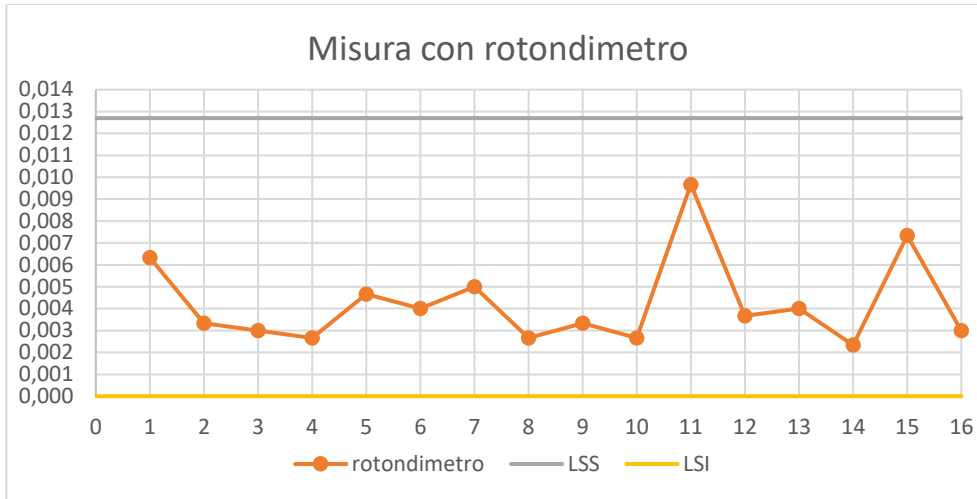
I valori di media, varianza e di deviazione standard relativi a questo metodo valgono rispettivamente:

$$\mu = 0,004 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,002006 \text{ mm}$$

I dati raccolti sono rappresentati graficamente nelle seguenti figure.



Misura con CMM

Il serraggio del particolare in macchina risulta identico a quello del caso precedente: il pezzo viene ancorato internamente alla base con 3 griffe di un mandrino autocentrante e risulta in tal modo a sbalzo rispetto alla base della tavola rotante. Valgono perciò le stesse considerazioni sul possibile insorgersi di dati anomali a causa dell'inevitabile, seppur minimo, movimento giroscopico del pezzo rispetto al punto di vincolo nonostante tale macchina

presenti una resistenza strutturale ed una rigidità superiore rispetto alla precedente per via delle sue maggiori dimensioni e di quelle del mandrino (intercambiabile e di diverse forme e dimensioni) rispetto a quello fisso e standard del rotondimetro. L'allineamento è effettuato anche mediante l'utilizzo di un tastatore con la punta sferica in rubino industriale che, per mutua rotazione tra la tavola e una leggera pressione dello stesso sul particolare, genera il profilo e rileva i valori dimensionali dell'elemento misurato. Una volta generato l'asse del particolare e definito dal CAD la posizione, il numero di sezioni e le condizioni di misura del particolare, si attaccano le sonde di temperatura al pezzo, la macchina ne rileva il valore di variazione rispetto ai 20°C imposti e calcola automaticamente, avendo noto il coefficiente di dilatazione del materiale, il valore di compensazione necessario. Dei tre metodi utilizzati questo è l'unico che permette questo accorgimento mentre gli altri si basano sul fatto che il particolare da misurare sia in sintonia con la temperatura dell'ambiente circostante che, per norma, deve essere compreso tra 19 e 21 °C. Procedendo al controllo, sempre in tre sezioni, della pista di ciascun particolare i dati ottenuti sono i seguenti:

Particolare	Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Media	R _{mobile}
1	0,003	0,002	0,004	0,003	0,002
2	0,003	0,005	0,003	0,004	0,002
3	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000
4	0,004	0,003	0,003	0,003	0,001
5	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000
6	0,004	0,004	0,005	0,004	0,001
7	0,003	0,003	0,004	0,003	0,001
8	0,002	0,002	0,003	0,002	0,001
9	0,005	0,003	0,003	0,004	0,002
10	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000
11	0,009	0,008	0,01	0,009	0,002
12	0,003	0,003	0,004	0,003	0,001
13	0,003	0,004	0,003	0,003	0,001

14	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001
15	0,006	0,007	0,007	0,007	0,001
16	0,003	0,003	0,004	0,003	0,001

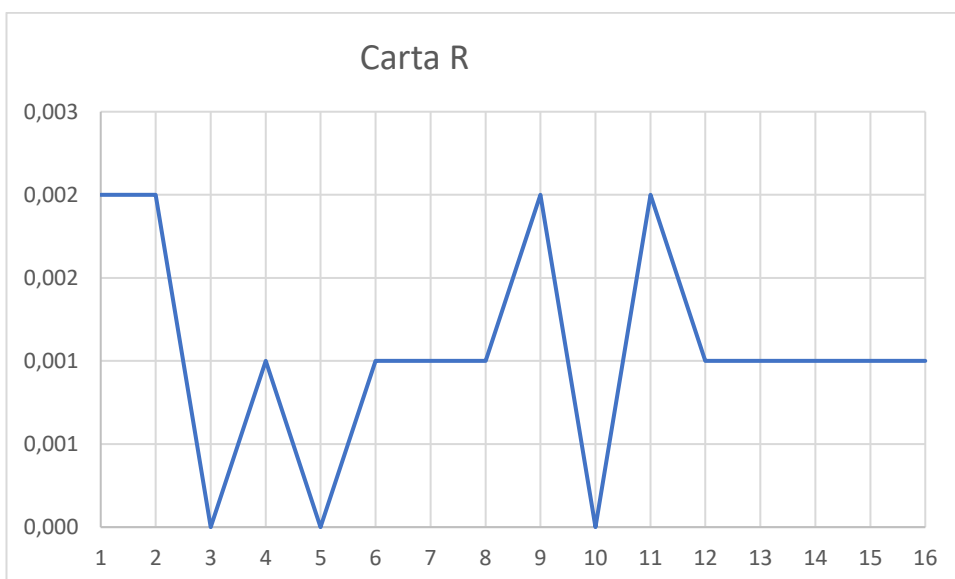
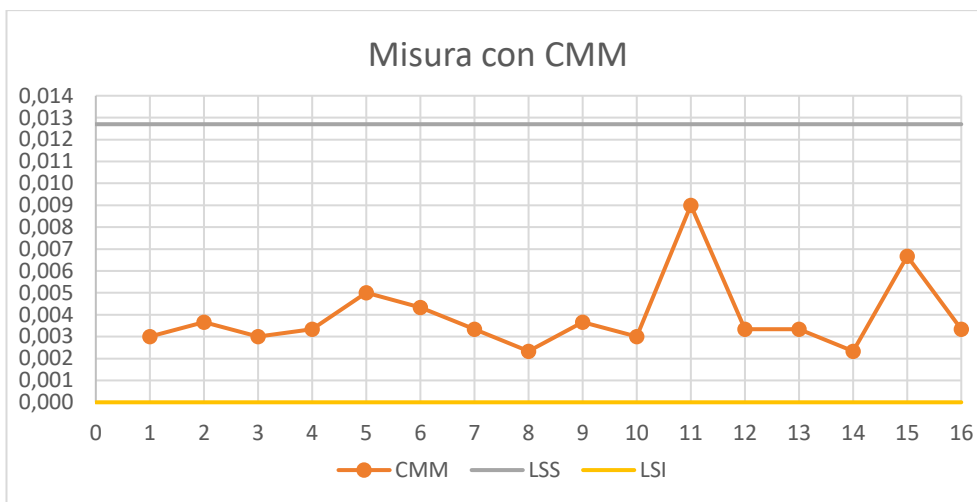
I valori di grande media, di varianza e di scarto tipo delle misure valgono rispettivamente:

$$\mu = 0,004 \text{ mm}$$

$$\sigma^2 = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\sigma = 0,001715 \text{ mm}$$

I dati raccolti sono invece rappresentabili graficamente come segue:

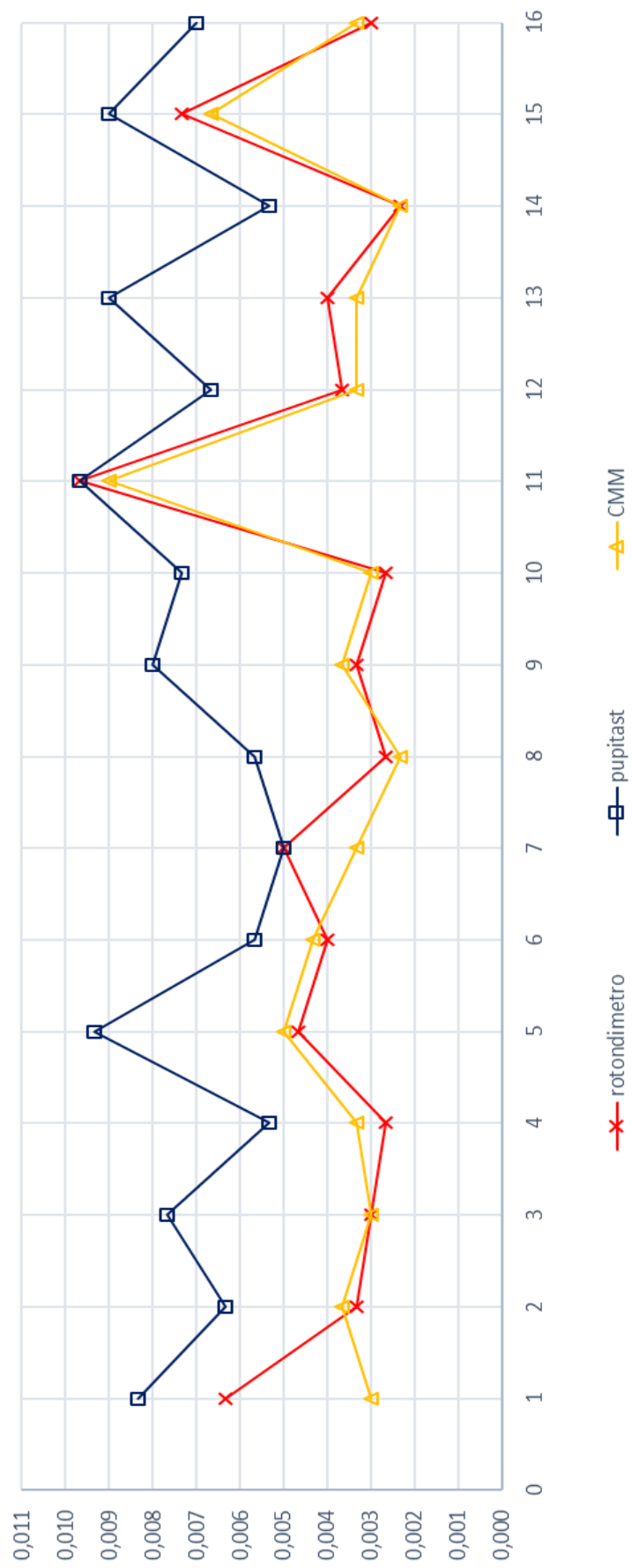


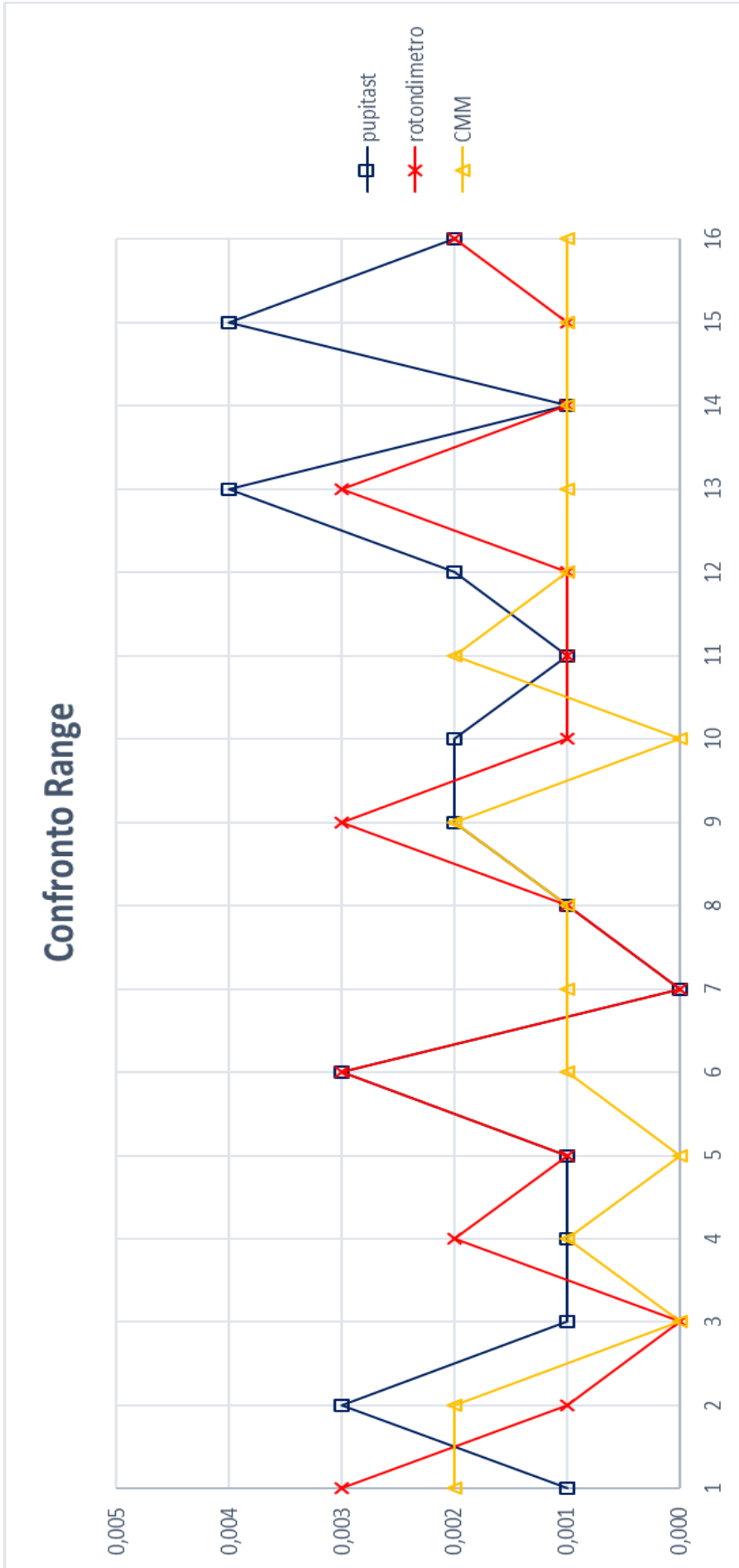
Confronto delle misure

Confrontando, in prima analisi, i valori di grande media, varianza e deviazione standard possiamo osservare che entrambe le macchine restituiscono lo stesso valore medio per l'intera produzione mentre lo strumento manuale restituisce un valore molto superiore. Tale differenza è dovuta alle difficoltà di eseguire le prove in manuale poiché, nonostante la prova sia di semplice esecuzione, riuscire ad evitare problemi di spostamento del particolare ed eventuali disallineamenti, risulta assai complicato. Nonostante ciò, il controllo mediante pupitast fornisce una varianza inferiore agli altri due metodi di controllo automatici perciò possiamo affermare che l'errore nella variazione del valore medio ottenuto sia prevalentemente dovuto alla presenza di un errore sistematico di movimentazione del particolare da parte dell'operatore. Il rotondimetro fornisce invece il più alto valore di deviazione standard dovuto grossomodo anche al fatto che la macchina, non utilizzando particolari filtri di eliminazione dei valori aberranti, risulta molto sensibile alla presenza di impurità sulla superficie esaminata oltre che al problema di ancoraggio e svergolamento del particolare. La CMM risulta nuovamente, anche per questa prova, uno strumento molto affidabile e preciso poiché essa presenta risultati molto simili tra loro che godono di basso valore di deviazione standard ed una media identica a quella del rotondimetro che risulta essere lo strumento più sensibile alla presenza di anomalie.

Confrontando, invece, graficamente i tre metodi sia in fatto di media nel primo grafico che in fatto di range nel secondo grafico possiamo osservare che, a meno di qualche punto isolato, le due macchine di misura presentano valori molto simili in fatto di media ma la CMM presenta un range medio di un solo micron mentre, sia il pupitast che il rotondimetro, nonostante andamenti molto diversi tra loro su ogni particolare misurato, presentano un range medio di 0,002 mm.

Confronto dei valori medi





Misura delle caratteristiche delle dentature

In questo ultimo paragrafo di questo capitolo si vuole mettere invece a confronto due report di macchine diverse, ottenuti per lo stesso particolare, in modo da eseguire un confronto tra i risultati delle due e capire se vi siano particolari elementi di differenza oppure se esse siano interscambiabili per il controllo di qualsiasi caratteristica.

Si procederà per step confrontando i report e analizzando i risultati con l'ottica adatta a cogliere eventuali anomalie in base alle caratteristiche presentate nel capitolo precedente. Il primo vano di partenza per la misura risulta differente per le due macchine e ciò potrebbe introdurre una leggera variazione nei dati raccolti. Si vuole quindi evidenziare che bisogna tenere conto di una certa variabilità nei risultati dei due report non legata alle differenze di misura delle due macchine ma intrinseche nella differenza di forma tra diversi fianchi dente della stessa dentatura. Tale considerazione è applicabile alla forma dei profili radiali e longitudinali, al valore numerico di questo e ai valori dei diametri di testa e di fondo.

Si osservi che il particolare viene montato sulla Zeiss a sbalzo, ossia viene serrato internamente nella parte bassa da tre griffe di un mandrino autocentrante, mentre esso viene vincolato tra punta e contropunta (tra i centri di costruzione) sulla Klingelnberg. Il secondo tipo di serraggio risulta allora meno sensibile ad errori di montaggio del particolare e fornisce, almeno in linea teorica, dei risultati più veritieri e meno affetti da rumore.

Confronto dell'evolvente

I due grafici di seguito sono eseguiti da due macchine diverse sullo stesso particolare ed il primo grafico è il report di una CMM Zeiss mentre il secondo è il report di una CMM Klingelnberg.

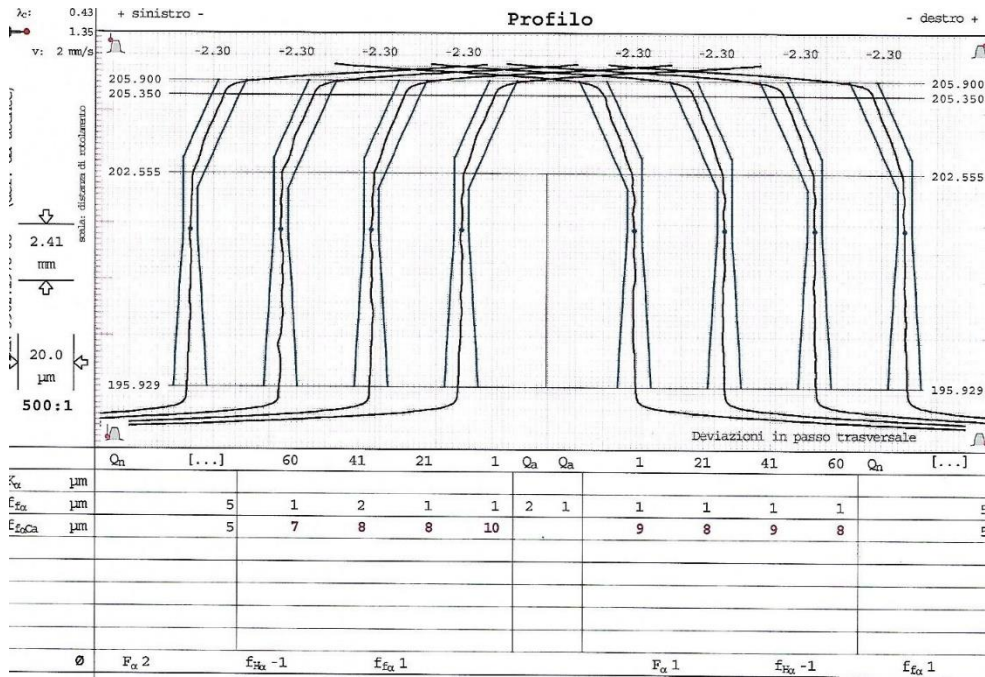


Figura 5.1 Rilievo profilo ad evolvente con CMM Zeiss

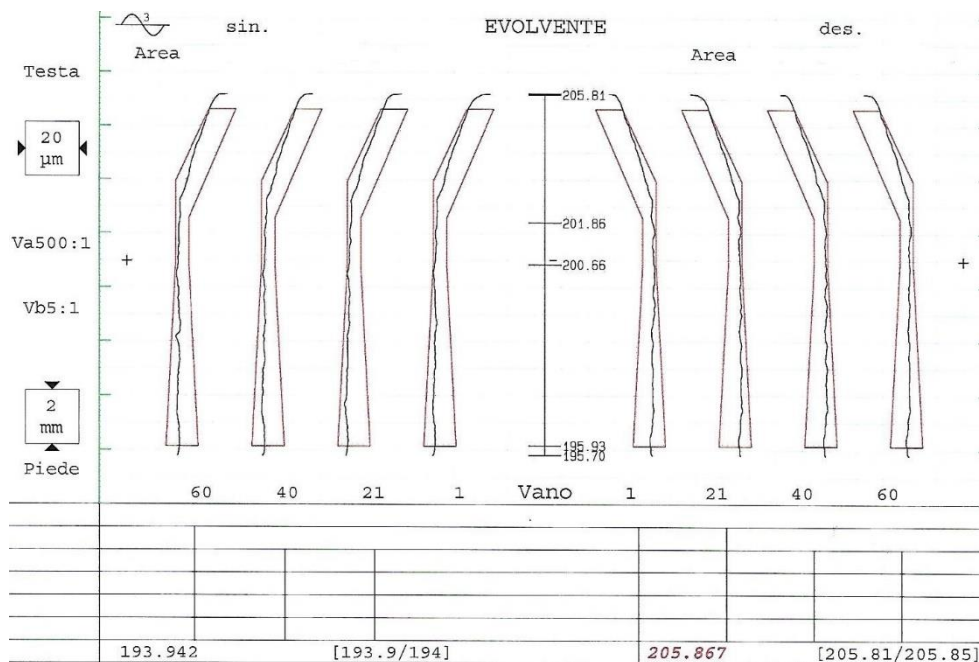


Figura 5.2 Rilievo profilo ad evolvente con CMM Klingelnberg

Il report è simmetrico rispetto alla mezzeria del grafico e riporta nella parte sinistra e nella parte destra rispettivamente la tracciatura della forma dell'evolvente del fianco sinistro e del fianco destro (dello stesso dente) di 4 denti a 90° circa uno dall'altro.

La prima osservazione da fare è che, nonostante i limiti di tolleranza dell'errore di forma del profilo delle due macchine sembrano diversi, essi rispettano entrambi le richieste del disegno ma cambia il modo in cui la macchina gestisce la messa a video (cioè proporzioni ed ingrandimenti) per meglio occupare lo spazio disponibile sul foglio stampando tutte le informazioni necessarie e comprensibili. Il primo grafico ha infatti un ingrandimento verticale di 2.41x (ogni centimetro sul foglio corrisponde a 2.41 cm nella realtà) mentre il secondo grafico ha un ingrandimento di 1:2; l'ingrandimento orizzontale è il medesimo per entrambi.

Le rappresentazioni della tracciatura reale sono leggermente diverse per via del fatto che la "Kling", come viene comunemente chiamata la macchina nell'ambiente, riproduce solo lo scorrimento effettuato da un attimo prima del diametro di inizio evolvente a un attimo oltre al limite minimo del diametro esterno e tenendo conto del valore degli smussi di testa dente mentre la Zeiss

elabora a video tutto il profilo sul quale scorre, dalla base del diametro interno alla testa del dente. Come si è comunque anticipato queste tracciature non rappresentano la vera forma dell'evolvente di cerchio realizzato ma le deviazioni del profilo reale della dentatura corretta rispetto al profilo teorico richiesto dalle specifiche progettuali.

Si può ancora notare che la Zeiss vincola la tracciatura a passare per il punto centrale del campo di tolleranza, all'altezza del diametro primitivo della dentatura, mentre la Kling esegue un "best fit" della stessa contro il lato positivo del campo di tolleranza. Il best fit serve in questo caso non solo a rappresentare le deviazioni del profilo reale da quello nominale ma anche a simulare i punti di massimo materiale del dente, ossia quelli dove è presumibile che avvenga per primo il contatto di ingranamento con i denti della ruota accoppiata. Tale ragionamento richiede che vengano messe a contatto con gli estremi positivi del campo di tolleranza i punti di massimo materiale della tracciatura reale che hanno una maggior differenza positiva rispetto al valore nominale atteso perciò, maggiore è la superficie del fianco dente a contatto con gli estremi della tracciatura e migliore sarà la forma realizzata in fase di rettifica dell'ingranaggio e l'evolvente reale molto più prossimo a quello teorico. La macchina inizia lo sviluppo dell'evolvente a partire dal raggio fondo dente o dal diametro minimo di rettifica (o di inizio evolvente) e procede verso la testa dente. Durante la sua analisi la Zeiss, che è più all'avanguardia in questo campo, è anche in grado di fornire i valori dell'errore di forma, del massimo valore di deviazione dal profilo ideale e dell'oltre tolleranza nel caso riscontrasse un'anomalia della superficie: si tratta in parte dei valori presentati sotto la tracciatura nel primo grafico.

Concludendo l'analisi possiamo tranquillamente affermare che non vi siano differenze nell'elaborazione da parte delle due macchine e che non vi sia quindi ragione di rifiutare che esse siano simili e interscambiabili nella misura di tale caratteristica.

Confronto dell'errore di inclinazione denti

Le due figure seguenti rappresentano la tracciatura del profilo assiale del fianco dente rispetto all'inclinazione dell'asse pezzo rispettivamente rilevato dalla Zeiss e dalla Klingelberg.

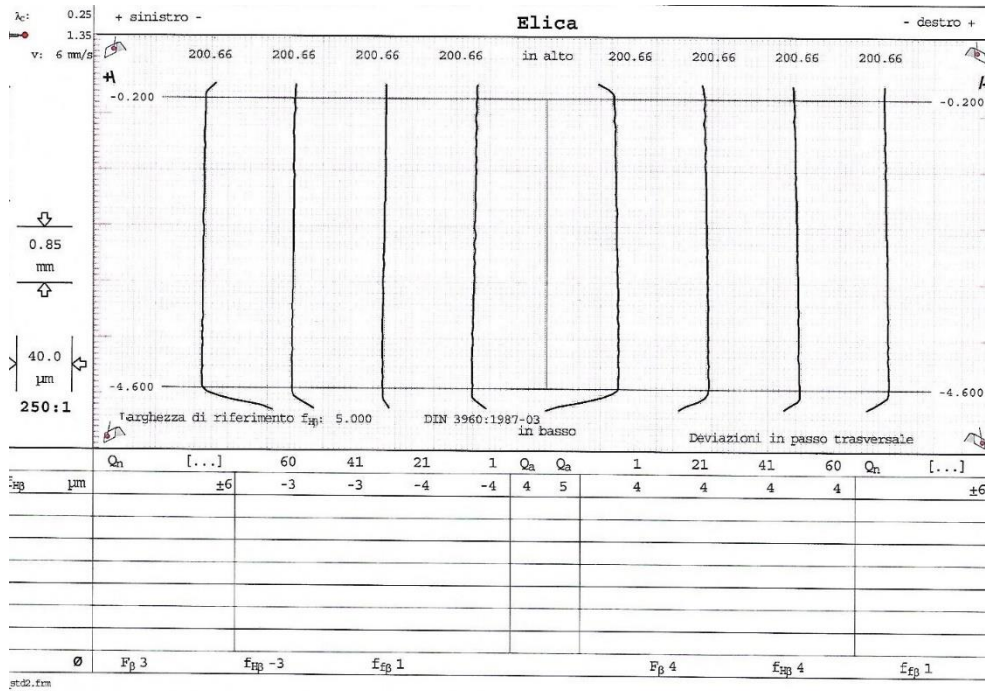


Figura 5.3 Profilo assiale ed errore di inclinazione rilevato con CMM Zeiss

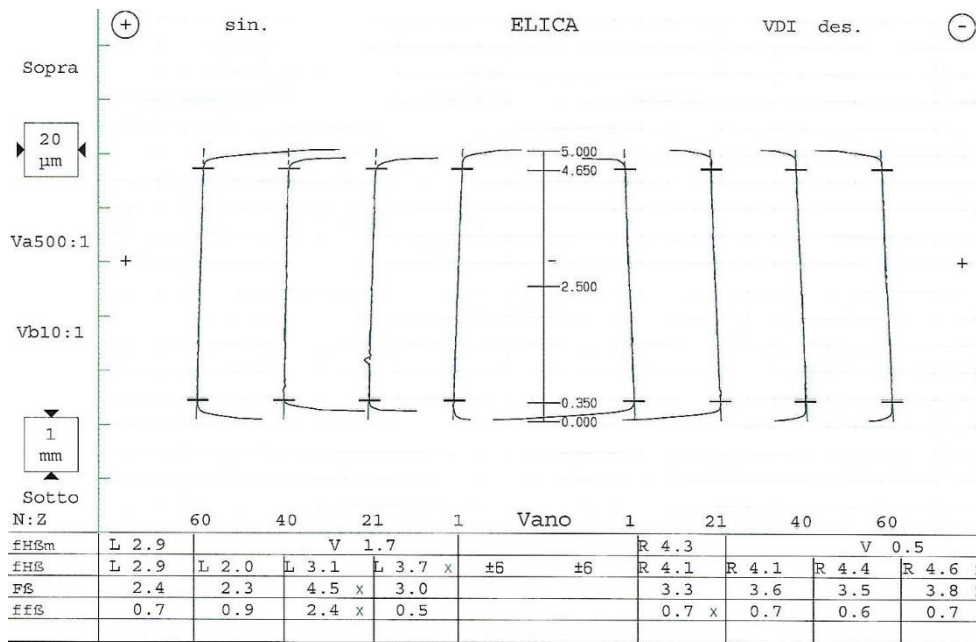


Figura 5.4 Profilo assiale ed errore di inclinazione rilevato con CMM Klingelberg

Anche in questo caso, il report è simmetrico e presenta rispettivamente i valori del fianco sinistro e del fianco destro (dello stesso dente) degli stessi 4 denti sui quali è stato rilevato il profilo ad evolvente nel caso precedente. Si può osservare un diverso fattore di ingrandimento tra i due report sia dal punto di vista orizzontale che verticale. Non cambia però il grafico a livello logico poiché entrambi i grafici presentano unicamente le tracciature che esprimono la forma del fianco dente rilevata alla distanza del diametro primitivo. La Zeiss esprime i valori con i segni algebrici “-” e “+” mentre la *Kling* li esprime rispettivamente come “L” (Left) e “R” (Right) ma nulla cambia nella sostanza perché essi si riferiscono rispettivamente ad una inclinazione antioraria ed una oraria rispetto all’asse pezzo, entrambe espresse in decimali e, per l’esattezza in micron (10^{-6} m). Si può notare che i valori trovati sono pressoché identici per entrambe le macchine e, a meno della forma e del campo di elaborazione della macchina, non si può osservare nessuna variazione apprezzabile tra i risultati ottenuti con i due metodi. Dai report di entrambe le macchine è anche facilmente possibile ottenere il valore massimo di differenza di inclinazione tra qualsiasi dente della stessa dentatura o errore di parallelismo. Il disegno e la norma

specificano che il controllo in esame di inclinazione denti debba essere effettuato su tutti i denti della dentatura (e non su quattro a campione) qualora nel report di macchina essa venga riscontrata oltre tolleranza. Tale valore si trova facendo la massima differenza, in valore assoluto, tra i valori di inclinazione dei 4 denti elaborati. Per entrambe le macchine tale valore riscontrato è contenuto nei limiti di tolleranza prescritti perciò il particolare risulta conforme sia come massimo errore di inclinazione denti sia come massimo errore di differenza di inclinazione denti.

Trattando il valore numerico e tenendo conto che si tratti di diversi denti scansionati e di arrotondamenti dei decimali, abbiamo scostamenti tra i valori inferiori al 10% del campo di tolleranza ammesso (campo di tolleranza simmetrico ± 6 micron, per un totale di 12 micron) e quindi si può ritenere che i dati delle macchine siano perfettamente correlati. Anche per la misura di questa caratteristica resta quindi buona l'ipotesi di una perfetta sostituibilità tra le macchine che portano ad esiti molto simili senza perdita o modifica sostanziale delle informazioni.

Confronto dell'errore di passo della dentatura

I seguenti due grafici presentano rispettivamente il valore di errore di passo o errore di divisione della dentatura misurati rispettivamente attraverso la CMM Zeiss e attraverso la CMM Klingelnberg.

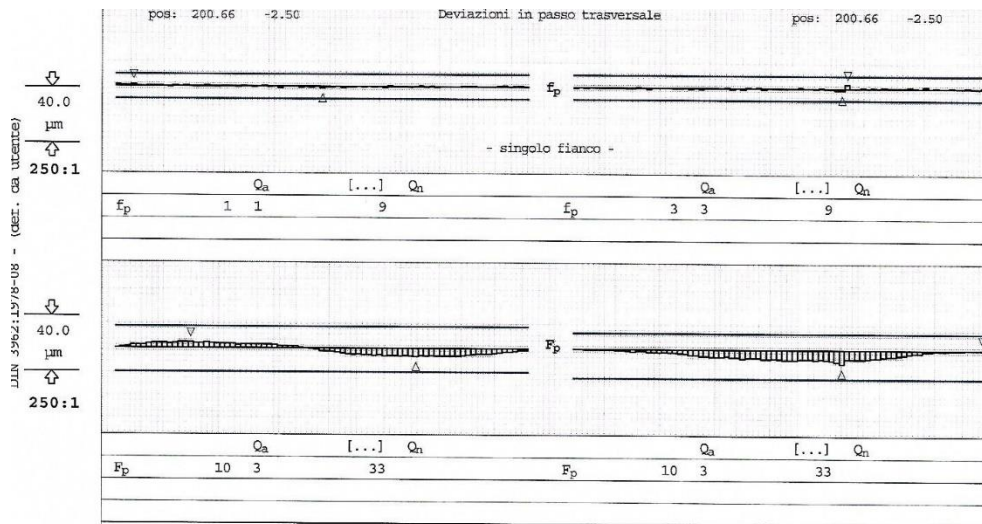


Figura 5.5 Misura dell'errore di passo della dentatura con CMM Zeiss

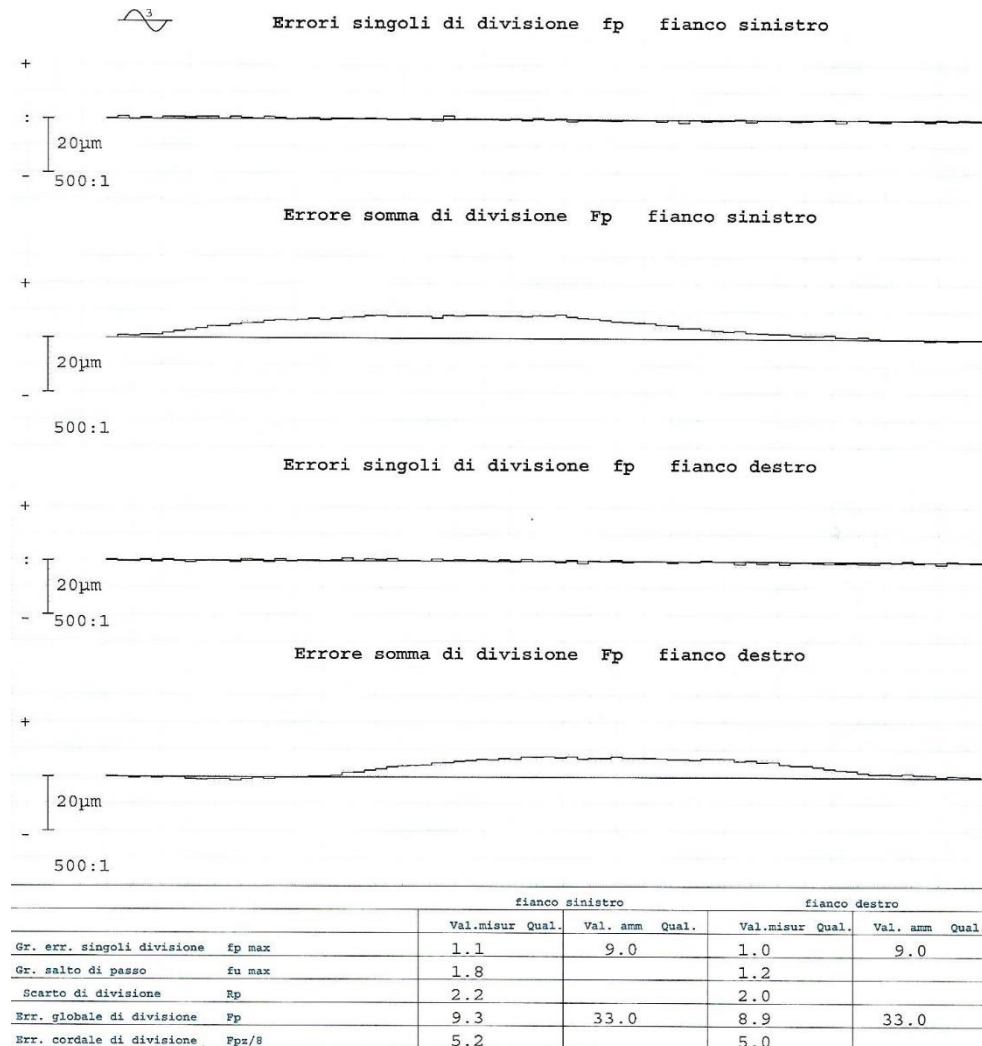


Figura 5.6 Misura dell'errore di passo della dentatura con CMM Klingelberg

Per la misura di questa caratteristica i due report differiscono dal punto di vista dell'impaginazione dei risultati ma nulla cambia in fatto di output dei risultati: la Zeiss accorpa tutte rappresentazioni grafiche e presenta sotto ognuna il risultato numerico della misura effettuata mentre la *Kling* restituisce una rappresentazione sequenziale dei grafici e accorpa in una tabella in fondo i risultati numerici di ognuna. Anche in questo report sono presentati sia i risultati ottenuti per il fianco sinistro che per il fianco destro del dente ma, considerando tutti i denti della dentatura, in questo caso non è importante il punto di partenza della misura. Trattandosi di un ingranaggio, l'errore di divisione accumulato è richiesto ed eseguito di tipo funzionale, cioè che tenga conto anche dell'eccentricità del diametro primitivo della dentatura rispetto all'asse pezzo. Se si volesse infatti trovare il dente che presenta il massimo errore di passo funzionale, esso sarebbe sempre identificabile nonostante la sinusoidi vari al variare del vano di partenza per la misurazione perché è indipendente da questo fattore e relativo alla sola somma dei valori intrinseci di forma e di eccentricità della dentatura (calcolati successivamente come valore di runout). L'errore di passo singolo, come anticipato nei capitoli precedenti, è molto importante per evitare errori di ingranamento della dentatura mentre quello funzionale è molto importante per ottenere una buona distribuzione delle pressioni ed evitare sollecitazioni eccessive di flessione-torsione del particolare vincolato. Per una questione di rappresentazione grafica e di impaginazione, anche in questo caso gli ingrandimenti dei risultati grafici sono diversi e quello della *Kling* risulta più efficace per osservare già visivamente la presenza di eventuali anomalie nell'andamento della misura. Questa misura soffre, più delle altre, della presenza di impurità sul fianco dente che si traducono in anomalie nei valori di divisione tra denti adiacenti (fp) perciò è fondamentale che il particolare sia perfettamente pulito per non incorrere in eventuali errori nella segnalazione di anomalie. Osservando l'andamento del grafico, un collaudatore esperto è in grado di scindere risultati dovuti ad errori estranei al particolare da quelli propri della dentatura.

Analizzando i valori numerici dei due report osserviamo che i valori sono molto bassi quindi il particolare risulta in tolleranza. Inoltre, se osserviamo le differenze nei risultati ci accorgiamo che, a meno di qualche arrotondamento,

i valori discostano meno del 10% da un report all'altro per ogni specifica misurazione perciò possiamo affermare che i risultati delle due macchine siano perfettamente correlati. Anche per la misura di tale caratteristica le due macchine sono in grado di fornire risultati molto simili perciò esse possono essere alternative una all'altra.

Confronto dello spessore dente

Il calcolo dello spessore dente o, in alternative della quota sui rulli, viene eseguito in contemporanea durante la misurazione del passo della dentatura perché i valori qui ottenuti sono solo complementari ai precedenti dati. I seguenti report, ottenuti rispettivamente dalla Zeiss e dalla Kling, sono la rappresentazione di tale controllo.

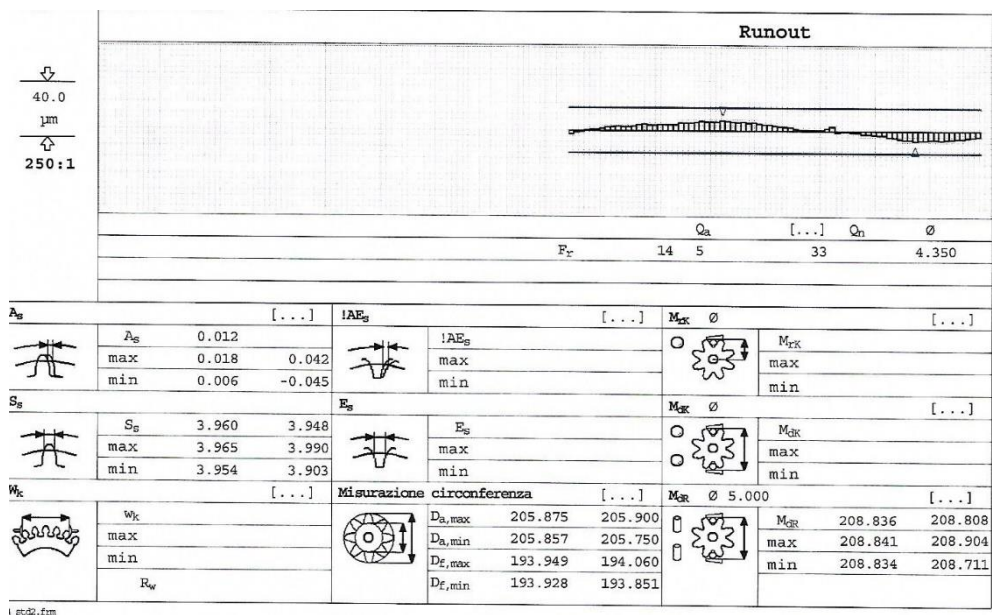


Figura 5.7 Misura dello spessore dente mediante CMM Zeiss

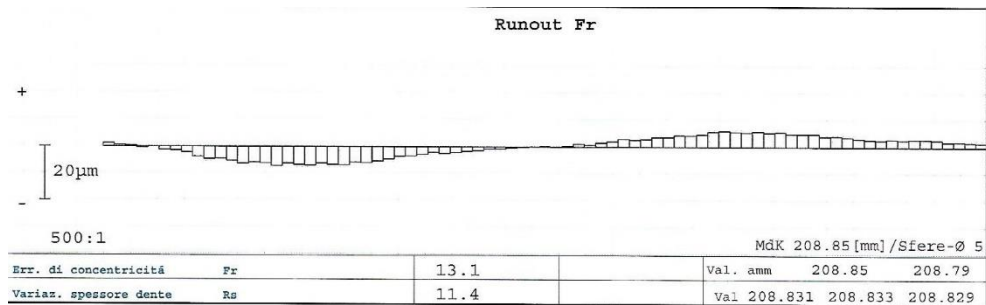


Figura 5.8 Misura dello spessore dente mediante CMM Klingelberg

Come nel caso precedente, anche qui i report differiscono nel modo di rappresentare i risultati sia dal punto di vista grafico sia dal punto di vista numerico. La Zeiss risulta più completa esponendo molte informazioni simultaneamente mentre la *Kling*, essendo spessore dente e quota rulli due misure che riportano, anche se in modo differente, alla stessa caratteristica, ritiene tali informazioni mutuamente esclusive e presenta, su scelta del programmatore, il solo valore della quota sui rulli (MdK) che può essere controllata, in alternativa, anche manualmente con micrometro e rullini. Il diametro dei rulli deve essere identico in entrambe le macchine per avere una comparazione diretta dei risultati ottenuti e, solitamente, esso è indicato a disegno. Si osserva che il valore del run-out rilevato dalle due macchine è identico mentre il valore della quota sui rulli differisce di 5 micron tra le due macchine: questo può essere dovuto al fatto che entrambe misurano il particolare al livello del diametro positivo ma, per una questione di azzeramento dell'altezza di riferimento sul particolare, esse possono anche misurare il pezzo ad altezze leggermente diverse della fascia del dente. Tale valore ha poco impatto nella sostanza ma, quando vi sono dei valori sufficientemente grandi di inclinazione denti, una piccola variazione del punto di misura si traduce in una piccola, seppur trascurabile, variazione anche nella misura dello spessore dente. In ogni caso, le variazioni medie di spessore dei denti lette dalle due macchine (identificate in modo diverso ma equivalenti) sono da intendersi identiche: $R_s = 0.0114$ per la *Kling* e $A_s = 0.012$ per la Zeiss. La Zeiss riporta in più questa informazione al livello del diametro primitivo e la traduce nel valore di spessore medio del dente (S_s) che segue, per definizione, lo stesso andamento del valore della quota sui rulli. Per queste due caratteristiche le macchine forniscono sia il valore

minimo, sia il massimo e sia il valore medio in modo che, qualora ci siano grosse variazioni tra i valori di minimo e di massimo e nonostante la media sia contenuta all'interno del campo di tolleranza, il collaudatore possa decidere se effettuare ulteriori ispezioni o meno.

Prendendo in esame i risultati numerici dei due report, come già detto, si osserva che per ogni caratteristica la variazione tra i valori è inferiore al 10% del campo di tolleranza prescritto perciò si può ritenere che, anche per la misurazione di tale caratteristica vi sia una correlazione perfetta tra le due macchine e che esse possano essere usate alternativamente per la misura dello stesso particolare senza pregiudicare la bontà e la qualità della misura.

Misura dell'errore di forma dei fianchi dente

In questa ultima parte di questo capitolo osserveremo come venga presentato un report di collaudo di una dentatura spiro-conica. Non vi sono questa volta altri report o misure con le quali confrontare il risultato ottenuto poiché, a meno del controllo manuale al tester di “giochi e contatti” della dentatura, tale tipo di misura si ritiene sia chiara, sufficientemente precisa ed esaustiva di tutte le informazioni che si necessita rilevare. Il seguente report è completo infetti di tutte le informazioni necessarie alla valutazione dell'ingranaggio e si ritiene non sia più necessario effettuare altre prove, complementari o alternative, poiché tale esito è ritenuto assoluto.

Si tratta di una griglia di punti definita dal costruttore che rappresenta le deviazioni della forma del fianco del dente rispetto al profilo nominale. Paragonandola ai risultati ottenuti per gli ingranaggi cilindrici, essa è una matrice che ha per righe il profilo assiale (relativo all'errore di inclinazione) del dente e per colonne il profilo radiale (profilo evolvente). La dimensione

della griglia è standard: vengono misurate 5 righe e 9 colonne per un totale di 45 punti per ogni fianco dente. Essa si estende dalla punta del conico (Toe) al tallone (Heel) e dal bassofondo (Root) al diametro di testa del dente (Tip). Per ogni particolare viene prescritta una griglia che esprime il massimo ed il minimo valore del campo di tolleranza e ogni punto del report andrà accuratamente confrontato con la suddetta griglia. Ingranaggi diversi possono avere tipi di griglie topografiche ammesse diverse e, a volte, uno stesso ingranaggio (quando si tratta di un pignone che abbia un fianco attivo e un fianco passivo) potrà avere limiti di tolleranza diversi da un fianco all'altro. Il punto centrale della griglia (posizione 2;5) è solitamente il punto di massimo dei contatti, cioè dove si dovrebbe distribuire teoricamente la maggior pressione di rotolamento trasmessa e per tale motivo la macchina è vincolata a porlo a zero traslando opportunamente tutti gli altri punti della griglia in positivo o in negativo. All'altezza di questo punto viene anche imposta anche la misurazione del valore di passo della dentatura ed il valore di deviazione medio dello spessore dente da quello nominale prescritto (Tooth thickness) rappresentato in basso a sinistra del report. I valori numerici relativi agli errori di passo sono invece elencati in basso a destra sia per un fianco che per l'altro mentre centralmente, sotto il rilievo topografico, è possibile osservare la rappresentazione grafica dell'andamento seguito da ogni fianco.

Qualora se ne abbia la necessità la macchina è anche in grado di fornire una serie di parametri utili in fase di lavorazione della dentatura quali il raggio di curvatura della mola e l'angolo di pressione da fornire alla macchina: in questo modo, qualora vi siano delle anomalie sul particolare, l'operatore è in grado di conoscere i parametri ("dati correttivi") da inserire in macchina per eliminare l'errore e riportare il profilo reale molto vicino a quello teorico utilizzato. Tali accorgimenti vengono spesso utilizzati in fase di benessere alla produzione in modo da ottenere al controllo finale tutti i particolari conformi e ridurre le ipotesi di scarti o rilavorazioni.

Conclusioni

Lo scopo principale di questo lavoro è stato, oltre a quello di presentare a grandi linee le caratteristiche di ogni controllo effettuato, quello di capire se sia possibile effettuare uno specifico controllo con strumenti o macchinari alternativi senza alterare la qualità della misura e del risultato ottenuto. Si genera infatti un grosso problema quando si ottiene un'alta variabilità nei risultati ottenuti da metodi diversi poiché diventa molto difficile affermare quale sia quello che meglio garantisce l'efficacia della misura e un valore che meglio esprime quello reale del particolare. Per questo motivo mi sono soffermato sull'analizzare alcuni aspetti dei particolari misurati con alcuni dei metodi e nell'ambiente cui ho quotidianamente a che fare.

Si è osservato che, per quanto riguarda le caratteristiche dimensionali, nella maggior parte dei casi le macchine di misura restituiscono valori direttamente confrontabili tra loro ma non direttamente confrontabili con gli strumenti di misura da banco tradizionali. La maggior precisione delle macchine di misura e la miglior accuratezza e ripetibilità di un ciclo di misura automatico superano infatti i problemi che si possono generare durante il processo di controllo manuale del particolare da parte dell'operatore. Le macchine riducono le variabili di errore che entrano nel processo di misura e che, inevitabilmente, generano delle anomalie e delle incongruenze con i risultati ottenuti con metodi tradizionali. La velocità del controllo manuale e la comodità di poterlo eseguire direttamente a bordo macchina, senza dover però necessariamente disporre di una macchina di misura, fanno sì che gli strumenti tradizionali godano ancora di grande fiducia ed impiego da parte di molte officine, anche nel settore aeronautico e automotive. Gli strumenti da banco sono più resistenti infatti agli ambienti più avversi d'officina e garantiscono di una maggior resistenza all'usura rispetto ai sistemi computerizzati più avanzati che necessitano di un ambiente sterile e climatizzato per garantire buona funzionalità. Oltre a queste considerazioni

abbiamo anche visto come vi sia una moltitudine di alternative differenti alla misurazione di una determinata caratteristica e come sia facile, anche attraverso alcuni accorgimenti dettati soprattutto dall'esperienza, usare in modo alternativo strumenti e macchinari differenti per effettuare tale misurazione.

Si è visto ancora come, per la misura delle caratteristiche geometriche e dimensionali delle ruote dentate, si possano alternativamente usare anche macchine di misura differenti che restituiscono valori molto simili tra loro mantenendo un elevato livello di significatività della misura. Il controllo con metodi tradizionali o alternativi alle CMM risulta ormai sorpassato e tali macchine hanno ottenuto un posto di indiscussa leadership nel campo della misurazione e del controllo Qualità di ruote dentate. Per alcuni particolari (per esempio alcuni ingranaggi spiro-conici in accoppiamento al controllo di “giochi e contatti” oppure per gli ingranaggi bi-elicoïdali) queste macchine sono diventate addirittura l'unico metodo accettato per la loro misurazione e tale da ritenere indiscutibile il risultato da esso proposto.

Possiamo affermare, da ultimo, che la continua evoluzione tecnologica nel campo degli strumenti e dei macchinari di misura, in coppia con l'evoluzione delle macchine e dei processi di produzione, sta continuamente aumentando il livello della qualità della produzione, sta sensibilizzando il mercato e le imprese ad orientarsi verso un concetto di qualità totale per ottenere la massima soddisfazione del cliente e sta aiutando sempre di più le imprese a prevenire le anomalie andando ad ispezionare in modo più dettagliato le caratteristiche dei particolari prodotti per riuscire a comprendere meglio le cause che le hanno generate ed andare a intervenire così alla radice del problema.

Bibliografia e sitografia

- [1] Controllo statistico della qualità, Montgomery C. Douglas, McGraw-Hill Education.
- [2] Misurare per decidere. Misure e statistica di base, Giulio Barbato, Esculapio Bologna.
- [3] Tecniche per la gestione della qualità, G. Barbato, F. Franceschini, M. Galetto, R. Levi, Pitagora editrice Bologna.
- [4] ANSI B92.1, American National Standards Institute (norma)
- [5] Legislazione Aeronautica, Michelangelo Flaccavento, Barbara Giannetti, Hoepli editore.
- [6] Manuale di meccanica, L. Caligaris, S. Fava, C. Tomasello, Hoepli editore.
- [7] Progetto e costruzione di macchine, Joseph E. Shigley, McGraw-Hill Education
- [8] www.enac.gov.it
- [9] www.easa.europa.eu
- [10] www.zeiss.com e www.zeiss.it/metrologia
- [11] www.agma.org
- [12] www.klingelberg.com