

Il collaudo geometrico di una macchina utensile

OR 3: Precision Engineering

Responsabile Area 3: prof. ing. Giovanni Moroni
Ricercatori: ing. Raffaele Lefemine

Indice

1.	Introduzione	4
2.	Servizio collaudo in azienda.....	4
2.1.	Collaudo in accettazione	5
2.2.	Collaudo interoperazionale.....	7
2.3.	Collaudo al montaggio.....	7
2.4.	Collaudo finale.....	9
2.4.1.	Il collaudo finale interno	9
2.4.2.	Il collaudo preliminare contrattuale con il cliente presso lo stabilimento del fornitore	9
2.4.3.	Collaudo contrattuale di accettazione finale con il cliente presso lo stabilimento del cliente	10
3.	Normativa di collaudo delle macchine utensili.....	11
3.1.	Norme di procedura - ISO 230	12
3.2.	Norme specifiche per tipologia di macchina.....	16
4.	Strumentazione.....	16
4.1.1.	Righe di controllo.....	16
4.1.2.	Cilindri di controllo	18
4.1.3.	Cilindri da applicare tra le punte.....	19
4.1.4.	Squadre.....	20
4.1.5.	Livelle di precisione	21
4.1.5.1.	Livelle a liquido	21
4.1.5.2.	Livelle elettroniche	22
4.1.6.	Filo teso e microscopio	22
4.1.7.	Piani di riscontro.....	24
4.1.8.	Interferometro laser	25
4.1.8.1.	Principio di interferenza - L'interferometro di Michelson	25
4.1.8.2.	Composizione di una apparecchiatura laser.....	25
4.1.8.3.	Principali cause di errore	26

5.	Verifiche geometriche.....	28
5.1.1.	Rettilinearità.....	28
5.1.1.1.	Metodi basati sulla misurazione di lunghezza	28
5.1.1.2.	Metodi basati sulla misurazione di angoli	32
5.1.2.	Planarità	36
5.1.3.	Parallelismo, equidistanza e coincidenza	37
5.1.3.1.	Parallelismo di linee e di piani	37
5.1.3.2.	Parallelismo di movimento.....	38
5.1.3.3.	Equidistanza	38
5.1.3.4.	Coassialità, coincidenza o allineamento.....	38
5.1.4.	Perpendicolarità	38
5.1.4.1.	Perpendicolarità di rette e piani	39
5.1.4.2.	Perpendicolarità di movimento	39
5.1.5.	Rotazione	39
5.1.5.1.	Rotondità in rotazione.....	40
5.1.5.2.	Oscillazione assiale	40
6.	Proposta di un protocollo innovativo di collaudo per macchine utensili speciali	41
6.1.	Il problema delle macchine utensili speciali	41
6.2.	Assi lineari e rotativi.....	42
6.3.	La struttura	45
6.4.	Gli accessori	45
6.5.	Conclusioni	45
7.	Bibliografia	45

1. Introduzione

Il collaudo in ogni attività industriale è un problema complesso, specie se lo si considera nella interezza delle sue funzioni. Collaudare significa innanzitutto capire esattamente i contenuti delle specifiche tecniche di riferimento, significa conoscere gli strumenti e i metodi che permettono, quando applicati ad un prodotto, di valutare la conformità di questo alle specifiche tecniche di riferimento, significa valutare correttamente le incertezze associate ai risultati ottenuti in modo da poter esprimere un giudizio del particolare o del complesso funzionale sottoposto al collaudo.

Queste funzioni, che sono tipiche dei processi di collaudo, pongono il collaudatore in una posizione che molto spesso è connessa con altre funzioni aziendali, e precisamente l'ufficio tecnico, la produzione, l'ufficio acquisti, l'ufficio vendite, per trovare equilibri fra esigenze di mercato, soluzioni proposte e possibilità realizzative. Ed è proprio questa attività che, in una visione moderna, dovrebbe costituire una delle funzioni principali del collaudo.

Lo scopo del presente documento è quello di dare una visione generale del collaudo di una macchina utensile ed in particolar modo del collaudo geometrico. Si descrive inizialmente come dovrebbe essere strutturato un efficiente servizio collaudo in una azienda produttrice di macchine utensili, si spiega poi come è strutturata la normativa relativa al collaudo delle macchine utensili, facendo principalmente riferimento a quella ISO. Si passano quindi in esame i principali strumenti di misura utilizzati per effettuare il collaudo geometrico di una macchina utensile; vengono poi esaminate le diverse verifiche geometriche ed infine, a conclusione del lavoro, viene considerato il problema del collaudo delle macchine utensili speciali e viene proposto un protocollo innovativo di collaudo per tali tipologie di macchine.

2. Servizio collaudo in azienda

Nell'ambito della produzione e commercializzazione di macchine utensili il collaudo riveste una importanza fondamentale. Le aziende produttrici di macchine utensili, per garantire che il prodotto realizzato sia corrispondente e conforme ai requisiti descritti nella specifica tecnica d'ordine, lavorano con due tipologie di metodo completamente diverse:

1. una tipologia di aziende, specialmente quelle medio – piccole, considera il servizio collaudo molto costoso e quindi preferisce addestrare il personale operativo ad essere nel contempo responsabile sia dell'azione di produzione che dell'azione di controllo di tale produzione;
2. altre aziende, specie quelle di grandi dimensioni, richiedono invece una certezza ulteriore che attuano attraverso la costituzione di un servizio collaudo, esterno all'attività di produzione, che opera all'interno dell'azienda e che dà garanzia, sotto la sua responsabilità operativa, di controllare e verificare che quello che l'azienda si è proposta di fare viene realizzato in modo conforme alle esigenze definite.

Il sistema qualità prevede che ci sia una azione di verifica del prodotto realizzato, quindi la seconda tipologia documenta e garantisce il rispetto di quanto previsto dalla normativa. Molto spesso, però, nel mondo della macchina utensile, la prima tipologia è molto utilizzata in quanto le aziende che producono macchine utensili, in particolar modo in Italia, sono in genere aziende di piccola-media dimensione. Bisogna inoltre tenere presente che l'attività di controllo e di collaudo viene considerata, a livello industriale, come un'attività indiretta e quindi non produttiva. Questo però non è del tutto vero in quanto, se non viene effettuato un opportuno controllo durante l'intero ciclo di produzione della macchina utensile, si può ottenere un prodotto che non soddisfa le prescrizioni e, quindi, per riportarlo in condizioni di conformità ai requisiti richiesti, l'azienda deve far fronte a costi diretti. E' evidente, allora, che le aziende, per una buona gestione aziendale, tendono a ridurre le spese di collaudo mentre è altrettanto evidente che rispettare quanto previsto dalla normativa del sistema qualità esige una azione di collaudo importante. Quindi, nonostante sia imprescindibile la necessità del collaudo nel mondo della macchina utensile, oggi molte aziende impiegano, come personale addetto al collaudo, una percentuale della forza lavoro globale

pari all'1-2%, raramente del 3%, cosa che non permette a queste aziende di dare una garanzia effettiva sulla qualità del loro prodotto. Le aziende italiane più grandi, nel mondo della macchina utensile, lavorano con un personale di circa 120-150 persone e questo significa avere 2-3 persone che si dedicano ad operazioni di controllo.

Si riporta di seguito un modello di come dovrebbe essere strutturato un servizio collaudo in un'azienda che produce macchine utensili. Si possono individuare quattro aree funzionali:

- collaudo in accettazione;
- collaudo interoperazionale;
- collaudo nel montaggio;
- collaudo finale.

A completamento di tale struttura sarebbe opportuna anche la presenza di una sala di metrologia e di un laboratorio dove poter controllare le caratteristiche chimico-fisiche, meccaniche e di integrità dei materiali.

2.1. Collaudo in accettazione

Comprende le attività che devono garantire all'azienda la conformità dei prodotti forniti dal mercato esterno alle specifiche tecniche di ordine. Il collaudo accettazione è un collaudo che controlla forniture esterne, cioè guarda all'esterno dell'azienda e va a vedere soltanto la rispondenza del prodotto finito alle prescrizioni indicate nell'ordine, senza preoccuparsi del processo di lavorazione.

E' importante sottolineare che tutte le azioni di collaudo devono partire da un documento di riferimento; se questo non è chiaro l'azione di collaudo non può essere eseguita, cioè non ha senso. Nel caso del collaudo in accettazione il documento di riferimento è dato all'ordine di acquisizione del materiale.

I materiali normalmente acquisiti sul mercato esterno da un'azienda che produce macchine utensili appartengono alle seguenti tipologie:

- semilavorati;
- particolari meccanici a disegno;
- particolari da commercio non a disegno (a catalogo);
- impiantistica (elettrica, idraulica, elettronica, meccanica).

I documenti di riferimento per quanto attiene il collaudo in accettazione solitamente sono:

- ordine di fornitura;
- specifica tecnica di fornitura;
- disegno;
- norme tecniche.

Mentre l'ordine di fornitura, la specifica tecnica di fornitura ed il disegno devono essere raccolti come documenti specifici per un determinato particolare, le norme tecniche sono un patrimonio comune del servizio collaudo in accettazione e servono quindi per una svariata tipologia di ordini.

All'arrivo del materiale acquistato sul mercato esterno il servizio collaudo in accettazione, dopo aver svolto le operazioni previste, deve dichiarare se il materiale è conforme o meno rispetto all'ordine. Nello svolgere

tale funzione dovrebbe essere assunto un comportamento abbastanza rigido nel senso che anche la minima banalità che fa dichiarare una non conformità deve essere segnalata come tale. Ad esempio se viene ordinato un particolare di carpenteria meccanica e sulla specifica tecnica di fornitura è riportato che questo deve essere contrassegnato con una indicazione in vernice che qualifica il disegno di riferimento e l'ordine cui il particolare fa riferimento e tale indicazione non viene riportata, quella, per il collaudo in accettazione, deve essere una non conformità anche se tutto il resto va bene. E' evidente che sarebbe una non conformità banale, ma l'azione del collaudo in accettazione deve essere tale da mettere il fornitore nelle condizioni di fare tutto il possibile affinché il particolare risulti conforme. Si fa questo discorso in quanto, per questioni di urgenza, di comodità, di valutazioni improprie delle difficoltà conseguenti una dichiarazione di non conformità, si potrebbe essere tentati di evitare di mettere in moto un iter burocratico macchinoso e quindi di evitare di fare la dichiarazione di non conformità. Questo potrebbe essere un atteggiamento corretto da un certo punto di vista, però scorretto come principio in quanto si potrebbe esagerare ed andare al di là delle convenienze aziendali. Allora, per evitare questi abusi, che poi diventano naturali nelle attività aziendali, in sede di accettazione il collaudo ha la funzione fondamentale di dichiarare la non conformità quando questa viene rilevata.

In Fig. 1 è rappresentato lo schema del collaudo in accettazione:

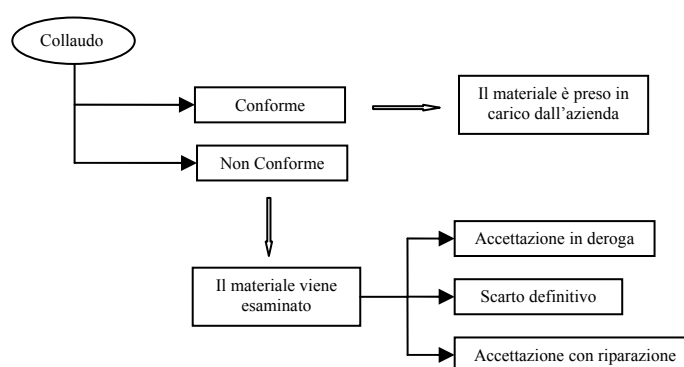


Fig. 1 Schema collaudo in accettazione

Se il collaudo dichiara il materiale conforme, l'azienda è autorizzata a prendere in carico il materiale e a considerarlo disponibile per le operazioni successive. In caso di non conformità, il materiale viene esaminato da una commissione che dovrebbe essere costituita da tutte le funzioni aziendali interessate dalle decisioni prese. I criteri di valutazione delle non conformità dovrebbero essere quasi sempre esclusivamente tecnici, anche se alcune volte possono essere influenzati da esigenze di programmazione delle lavorazioni successive oppure condizionati dal tipo di fornitore interessato e dai suoi rapporti con l'azienda. La non conformità può comportare uno dei seguenti giudizi:

- accettazione in deroga;
- scarto definitivo ;
- accettazione con riparazione.

Accettazione in deroga significa che si è rilevata una non conformità ma si accetta comunque il materiale che quindi viene preso in carico dall'azienda; l'accettazione con riparazione significa accettare il materiale a condizione che il fornitore effettui le operazioni di riparazione necessarie; con lo scarto definitivo il materiale viene restituito al fornitore.

2.2. Collaudo interoperazionale

Il collaudo di un'azienda non finisce con il collaudo in accettazione in quanto una parte del materiale acquistato può subire delle lavorazioni interne. In tal caso il materiale viene prelevato a magazzino, montato sulle varie macchine e lavorato. La fase di controllo durante la lavorazione del pezzo va sotto il nome di collaudo interoperazionale e può essere vista come verifica di prodotto, ma molto più spesso come controllo di processo (vedi tecniche SPC). Il documento di riferimento in tale azione di collaudo è costituito dal disegno specifico del particolare.

Il collaudo interoperazionale è, a differenza di quello in accettazione, inserito nel mondo della produzione aziendale, segue specificatamente la lavorazione e quindi deve, da un certo punto di vista, considerare le difficoltà della produzione. Gli interventi di collaudo interoperazionale devono previsti nelle fasi ritenute più delicate dal punto di vista qualitativo, cioè in quelle in cui il rischio di generare delle non conformità è alto. L'ultima operazione di collaudo interoperazionale è il controllo finale del pezzo.

Ogni azione di controllo prevista dal ciclo di lavorazione deve dar luogo ad una giudizio di conformità o non conformità esattamente come succede nel collaudo in accettazione. Quando il collaudo interoperazionale individua una conformità fa proseguire il particolare per le lavorazioni successive; se invece individua una non conformità si ha il fermo del particolare. La non conformità deve essere subito esaminata dall'organo competente di modo che venga presa una delle seguenti decisioni: accettazione in deroga, scarto definitivo e accettazione con riparazione.

Nell'ambito di tale fase di collaudo è stata svolta da parte del sottoscritto una proficua collaborazione con la Sezione di Tecnologie Meccaniche e Produzione del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano nello sviluppo di procedure per la riferibilità metrologica di strumenti dimensionali classici e nella determinazione dell'incertezza di misure geometriche effettuate su alcuni particolari meccanici misurati con una macchina di misura a coordinate (CMM). Non si ritiene opportuno allegare la documentazione prodotta nell'ambito di tale collaborazione.

2.3. Collaudo al montaggio

Il Collaudo al montaggio comprende le azioni di controllo che vengono attuate nel corso delle operazioni di montaggio dei gruppi e/o del montaggio generale della macchina. Al montaggio convergono tutti i pezzi che sono stati realizzati e quelli che provengono dalle acquisizioni esterne; il reparto montaggio è in genere diviso in due sottoreparti: uno è il reparto montaggio gruppi, l'altro è il montaggio finale della macchina. Nel reparto montaggio gruppi si effettua il montaggio dei singoli gruppi; ciascun gruppo costituente la macchina viene assemblato separatamente. Una volta terminato l'assemblaggio, i singoli gruppi vengono portati nel sottoreparto di montaggio finale, dove sono collegati tra di loro ed eseguito il montaggio finale della macchina.

Il collaudo al montaggio è una azione di controllo particolarmente delicata in quanto viene molto spesso delegata alle capacità individuali del collaudatore. E' un collaudo che ha dei riferimenti molto difficili da individuare correttamente; si danno delle indicazioni di carattere generale, ma al di là di queste è importante l'esperienza individuale di colui che è chiamato ad effettuare la verifica.

Le operazioni di montaggio sono individuate dal ciclo di montaggio analogamente al ciclo di lavorazione che individua le sequenze di lavorazione. Nel ciclo di montaggio si indica al montatore la sequenza delle operazioni da seguire. Il collaudatore al montaggio è un montatore che ha acquisito un'esperienza notevole che gli permette di essere una guida nell'operazione di montaggio.

Le operazioni di collaudo al montaggio devono essere previste da un ciclo di montaggio nelle posizioni del ciclo ritenute particolarmente delicate dal punto di vista qualitativo. Tali operazioni devono essere definite da adeguate istruzioni operative e protocolli di collaudo che ciascuna azienda produce in base alla propria esperienza. L'istruzione operativa descrive puntualmente le modalità con cui devono essere eseguite le operazioni di collaudo. Il protocollo di collaudo è un documento sul quale sono indicati i risultati attesi e riportati quelli ottenuti. Questi documenti sono essenziali per l'esecuzione delle operazioni di collaudo al montaggio e rappresentano i documenti di riferimento.

2.4. Collaudo finale

Sostanzialmente il collaudo finale delle macchine utensili si articola in una serie di azioni che si possono descrivere come segue:

- collaudo finale interno;
- collaudo preliminare contrattuale con il cliente presso lo stabilimento del fornitore;
- collaudo contrattuale di accettazione finale con il cliente presso lo stabilimento del cliente.

Queste sono fasi le fasi tradizionali che caratterizzano il collaudo finale di una macchina utensile e che hanno tutte una specifica importanza che qui di seguito cercheremo di individuare.

2.4.1. Il collaudo finale interno

E' azione di estrema importanza ed ha sostanzialmente due scopi: il primo è la verifica della conformità della costruzione alle prescrizioni del piano di prodotto, il secondo è la ricerca, laddove richiesta dall'ufficio tecnico, di livelli di prestazione più avanzati di quelli previsti dal piano di prodotto o di informazioni tecniche più approfondite, su aspetti costruttivi, funzionali o di prestazione, non inserite nel piano di prodotto ma utili ai fini della ricerca del miglioramento continuo della produzione aziendale. E' chiaro che questa azione di collaudo è di importanza fondamentale per la conoscenza qualitativa del prodotto che si è realizzato ed è azione che rappresenta, sostanzialmente, un esame di valutazione dello sforzo che tutte le componenti della struttura aziendale hanno compiuto per realizzare l'obiettivo che l'azienda si era proposta. In questa azione di collaudo la macchina deve essere analizzata in tutti i suoi aspetti con grande scrupolo, con grande onestà intellettuale, con esasperata accuratezza metrologica e raffinatezza di metodo, naturalmente nei limiti di quanto richiesto dal piano di prodotto e delle eventuali richieste aggiuntive dell'ufficio tecnico.

Il documento conclusivo di tale azione di collaudo non può essere un documento schematico ma una relazione tecnica che, considerando tutte le indicazioni/prescrizioni contenute nel piano di prodotto, evidenzia la capacità o meno della costruzione di soddisfarle in modo sicuro. Unitamente a ciò la relazione tecnica deve anche rispondere ai quesiti posti dall'ufficio tecnico. Bisogna però dire che, in ambiente industriale, questa azione è molto spesso solo una aspirazione in quanto i tempi industriali non permettono quasi mai di poter effettuare, in modo completo e soddisfacente, tale azione; rimane comunque chiaro che tale azione è di importanza fondamentale per conoscere in modo approfondito la macchina realizzata, per valutarne le capacità potenziali e per capirne limiti e difficoltà ed avere, conseguentemente, le informazioni necessarie per migliorare la qualità delle future produzioni.

2.4.2. Il collaudo preliminare contrattuale con il cliente presso lo stabilimento del fornitore

E' l'azione di collaudo finale che mette per la prima volta il cliente a contatto con l'oggetto del contratto di fornitura che, se ben fatto, dovrebbe avere specificamente indicato in modo dettagliato le condizioni di collaudo cui la macchina dovrà essere sottoposta in sede di collaudo preliminare e di collaudo di accettazione finale.

Il contratto di una macchina utensile è discorso complicato proprio perché la macchina utensile è un bene chiamato a produrre altri beni che molto spesso hanno esigenze qualitative estremamente elevate e sottoposte a rigorose verifiche dalle quali immediatamente si evidenziano le manchevolezze della macchina di produzione. Il contratto di una macchina utensile dovrebbe partire da un piano di prodotto ben fatto nel quale tutte le caratteristiche cui la macchina utensile dovrà soddisfare sono dettagliatamente individuate e definite ed il contratto dovrebbe coinvolgere solamente quelle caratteristiche generali, funzionali, di prestazione, di sicurezza, di collaudo che sono chiaramente ed esplicitamente individuate nel piano di prodotto.

Se il contratto è così fatto il *collaudo preliminare contrattuale* diviene una parte del *collaudo finale interno* ed in genere questo collaudo preliminare si articola facendo riferimento ad una serie di Norme riconosciute

internazionalmente. Definite le norme cui un contratto dovrebbe sempre fare riferimento il *collaudo preliminare contrattuale con il cliente presso gli stabilimenti del fornitore* è presto definito. Si tratta cioè di sottoporre la macchina utensile ad una serie di verifiche che sono esattamente e dettagliatamente definite dalle norme specifiche per tipologia di macchina adottando per ciascuna verifica le procedure metrologiche ed i relativi metodi operativi definiti dalle norme di procedura.

Bisogna mettere in evidenza che non può essere consentita, in sede di collaudo contrattuale, alcuna variazione a quanto contrattualmente definito, ciò significa che nel corso dei collaudi contrattuali gli schemi di collaudo definiti dalle norme specifiche ed i metodi di misura previsti dalle norme di procedura non possono essere modificati né nella sostanza né nella forma. E' importante sottolineare questo aspetto perché potrebbe esser facile vedere insorgere contenziosi generati da diverse interpretazioni dei metodi di misura.

Terminate le operazioni di collaudo preliminare che sono, in genere, eseguite su macchina completamente funzionante ma non necessariamente allestita nel suo aspetto definitivo, è prassi consolidata che i responsabili del cliente ed il responsabile del fornitore sottoscrivano un documento nel quale vengono attestate le risultanze dei collaudi eseguiti, vengono evidenziate le eventuali non conformità, vengono definiti gli interventi da effettuare prima dello smontaggio e spedizione della macchina negli stabilimenti del cliente, viene autorizzato lo smontaggio, le eventuali correzioni da eseguire e le operazioni di spedizione della macchina. In questo modo e con questo documento può considerarsi conclusa la fase di collaudo preliminare della macchina e da questo documento derivano quelle azioni amministrative che a tale documento sono collegate.

2.4.3. Collaudo contrattuale di accettazione finale con il cliente presso lo stabilimento del cliente

E' quest'ultima l'azione di collaudo che, una volta completata, dà origine alle seguenti situazioni:

- la macchina viene definitivamente accettata dal cliente;
- la macchina viene presa in carico dal cliente;
- inizia a decorrere il periodo contrattuale di garanzia;
- il fornitore può considerare conclusa la sua fornitura.

L'operazione di collaudo contrattuale di accettazione finale con il cliente presso lo stabilimento del cliente si svolge quando la macchina è stata spedita e rimontata presso lo stabilimento in cui il cliente intende venga utilizzata. Prima di rimontare la macchina presso lo stabilimento del cliente e laddove ne esista la necessità dovrà, da parte del fornitore, essere collaudata la fondazione che, insieme agli elementi di ancoraggio della macchina alla fondazione stessa, è da considerare parte fondamentale della macchina medesima. Le caratteristiche del plinto di fondazione, sia quelle tipicamente di profilo sia quelle strutturali, devono essere definite in sede di stipulazione di contratto e queste devono dar luogo ad un protocollo di collaudo concordato fra le parti sia in termini di deformazioni sotto carico che in termini di metodo di controllo da adottare. Collaudata la fondazione il fornitore sottoscrive il protocollo di collaudo dichiarandone la conformità alle prescrizioni e autorizza il montaggio della macchina sulla fondazione positivamente collaudata.

Le operazioni di collaudo finale presso il cliente non si discostano da quelle eseguite presso lo stabilimento del fornitore salvo il fatto che in questa sede il collaudo finale, per essere considerato conforme, deve dare evidenza del fatto che tutte le prescrizioni contrattuali sono state raggiunte. Il collaudo finale della macchina presso il cliente altro non è quindi che la ripetizione completa delle operazioni di collaudo preliminare questa volta condotte sulla macchina definitivamente montata e quindi sulla macchina presentata al cliente nella sua veste definitiva.

3. Normativa di collaudo delle macchine utensili

La storia della normativa della macchina utensile, per quanto attiene le problematiche del collaudo, è tutta particolare e vale la pena costruirne una breve cronaca. Verso la fine del 1927 apparve in Germania una pubblicazione che destò subito molto interesse fra gli addetti ai lavori. Si trattava di una pubblicazione del Dr. Ing. George Schlesinger della Scuola Tecnica Superiore di Berlino che cercava di porre su basi rigorose il problema del collaudo della precisione delle macchine utensili. Era il primo tentativo che cercava di definire quali dovevano essere le caratteristiche minime che una macchina utensile doveva soddisfare per poterla considerare adeguata alle esigenze di lavorazione della produzione industriale di quel tempo.

Tale pubblicazione, negli anni successivi, fu elaborata, affinata, discussa in varie sedi, sperimentata da costruttori e utilizzatori di macchine utensili fino a giungere alla formulazione finale che ancora oggi è da considerare di profonda attualità. I concetti che ispirano questa procedura che è, in assoluto e senza dubbio, da considerarsi la genitrice di tutte le Norme che ne sono derivate, rispondevano alla seguente fondamentale esigenza: definire una serie di controlli semplici e chiari, di facile e non costosa esecuzione, non suscettibili di equivoco che permettano di classificare la macchina controllata come appartenente ad una classe di precisione definita. Si trattava in sostanza, del primo tentativo serio di qualificare in termini di precisione le caratteristiche di una macchina utensile.

Tale tentativo si affermò nonostante le lunghe discussioni ed accese polemiche cui le procedure Schlesinger hanno dato luogo. L'affermazione di tale metodo di controllo della precisione delle macchine utensili è così radicato nell'industria mondiale che molto spesso, ancora oggi, quando si vuole parlare di collaudo di una macchina utensile ci si riferisce a tali procedure anche se si può dire che oggi sono superate nei metodi, negli strumenti, negli ambiti se non nei principi generali che rimangono per buona parte nella moderna normalizzazione quelli formulati da Schlesinger.

Partendo da qui, gli Enti di normalizzazione industriale nazionali ed internazionali hanno sviluppato, con particolare riferimento alla macchina utensile una vastissima e completa documentazione tecnica la struttura della quale, almeno per quanto attiene l'ISO, verrà esaminata in seguito.

E' forse proprio per questa storia che la macchina utensile si è abituata a vedere il problema del collaudo come un problema dedicato ad aspetti globali della costruzione cioè ad aspetti che riguardano sia il gruppo costituente la macchina, visto nella sua unità funzionale, ma soprattutto la macchina nella sua interezza operativa. Collaudare quindi vuol dire valutare e documentare se gli obiettivi che la progettazione si era proposta sono stati raggiunti. Ovvio che questi obiettivi sono molto spesso termini contrattuali e come tali termini di estrema importanza.

Nello spirito della Normativa ISO, la qualità di una macchina utensile in sostanza è la capacità che la macchina ha di soddisfare le esigenze per le quali è stata acquistata; se queste esigenze sono state soddisfatte la macchina è una macchina di qualità, se queste esigenze sono state disattese la qualità della macchina sarà considerata scadente. E' proprio questo il problema della qualità di una macchina utensile "definire le esigenze cui la macchina deve soddisfare" ed è proprio questo l'obiettivo della Normativa ISO relativa al collaudo che offre ottimi supporti tecnici ai produttori ed agli utilizzatori di macchine utensili.

Come si è potuto comprendere, il complesso delle Norme Internazionali dedicate alla macchina utensile è da considerarsi un Sistema Normativo estremamente accurato nella sua struttura e nei suoi documenti. Vediamo adesso come è articolata la Normativa rivolta alle macchine utensili ed in particolare al collaudo. Facendo riferimento alla pubblicazione UNI-UCIMU "Le Norme per le macchine utensili" del 2002 possiamo dire che le Norme, tra quelle pubblicate in ambito volontario e che si riferiscono ad aspetti tecnici non regolamentati da leggi nazionali o direttive europee, possono essere considerate come appartenenti ai seguenti sottogruppi:

- norme di collaudo;
- norme per la costruzione meccanica;

- altre norme di interesse per le macchine utensili.

Le “norme di collaudo” interessano in modo particolare le operazioni di collaudo finale di accettazione di una macchina utensile e dovrebbero costituire il riferimento contrattuale fondamentale per la definizione delle sue caratteristiche di prestazione. Le “norme per la costruzione meccanica” definiscono le tipologie normalizzate di accessori e parti meccaniche da utilizzare nella realizzazione delle macchine utensili. Le “altre norme di interesse per le macchine utensili” sono costituite da norme di nomenclatura, di designazione, di programmazione, di segnalazione, di controllo numerico. Si effettuerà, in questo lavoro, l’esame delle sole “Norme di collaudo”.

Il Sistema Normativo del collaudo macchine utensili si articola sostanzialmente in due grandi linee di indirizzo; la prima di esse è costituita da una serie di Norme che sono da considerarsi *Norme di procedura*. La seconda linea di indirizzo è costituita da una serie di Norme che sono da considerarsi *Norme specifiche di tipo*.

Le Norme di procedura sono raccolte come serie ISO 230. Tali documenti forniscono una serie di indicazioni operative riguardanti la conduzione dei collaudi delle macchine utensili, area molto importante e delicata, specie se si tiene presente quanto, in un ambito metrologico, le procedure adottate per l’esecuzione di una misura siano di fondamentale importanza agli effetti dei risultati e quindi quale importanza possa assumere, in sede contrattuale, la scelta di una procedura al posto di un’altra e soprattutto quanto sia importante, all’interno di una procedura definita, la specificazione del metodo operativo da utilizzare.

Tale serie di norme costituiscono un vero e proprio manuale del collaudatore ed ogni operazione di collaudo dovrebbe attenersi ai principi ed ai metodi da esse espresse. Ogni Norma specifica di tipo, per il collaudo delle varie tipologie di macchine, si riferirà esplicitamente a tali norme per evitare che insorgano dubbi interpretativi sulle modalità operative con le quali una qualsivoglia verifica debba essere condotta. Un’ultima considerazione sulle ISO 230 riguarda il fatto che tale normativa non si fa carico di indicare i limiti degli errori che vengono individuati attraverso le verifiche, ma indica solamente, con estrema accuratezza e definizione, come effettuare le misure.

Le Norme specifiche di tipo sono, di contro, documenti specifici per le classiche tipologie di macchine utensili, di cui un esempio è dato dalla ISO 10791, che, una volta identificate le macchine costituenti l’attuale parco di tipologie offerte dal mercato, indicano specificamente le verifiche cui tali macchine devono essere sottoposte e gli errori limite ammessi per poter essere dichiarate conformi alle prescrizioni della Norma. Naturalmente, queste norme fanno sistematicamente riferimento alle Norme di procedura di cui abbiamo parlato precedentemente.

Esamineremo ora in dettaglio come è strutturata la serie di Norme ISO 230 e, successivamente, verrà descritta la struttura delle Norme specifiche per tipologia di macchina, come ad esempio ISO 10791 relativa alle condizioni di collaudo per i centri di lavorazione; ciò ci permetterà di vedere la completezza e la validità di queste Norme e di capire quanto sia importante agli effetti delle operazioni di collaudo non perdere mai di vista questi documenti che devono costituire basi di riferimento fondamentale.

3.1. Norme di procedura - ISO 230

Questa Norma, che ha come titolo generale “Test code for machine tools”, si articola in 9 parti che qui di seguito specifichiamo:

- Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions;
- Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes;
- Part 3: Determination of thermal effects;
- Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools;

- Part 5: Determination of the noise emission;
- Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests);
- Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation;
- Part 8: Determination of vibration levels [Technical Report];
- Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series 230, basic equations [Technical Report].

Si analizzano ora i contenuti di ciascuna parte di tale Norma.

Parte 1

Precisione geometrica delle macchine funzionanti a vuoto o in condizioni di finitura

Lo scopo della ISO 230-1 è di unificare i metodi di verifica della precisione delle macchine utensili operanti a vuoto o in condizioni di finitura, riferendosi esclusivamente alla verifica della precisione geometrica propriamente detta. Non tratta la verifica di funzionamento della macchina utensile (vibrazioni, irregolarità dinamiche interne ai meccanismi di movimento, etc.), né la misurazione di caratteristiche quali velocità e avanzamenti. Quindi, dopo aver indicato lo scopo ed il campo di applicazione, segue un paragrafo dedicato alle considerazioni generali che si interessa di chiarire alcuni aspetti fondamentali di terminologia, di procedure metrologiche, di tolleranze. Si passa poi all'esame delle operazioni preliminari che devono essere adottate prima di iniziare le operazioni di collaudo vere e proprie, ed è, questo, un paragrafo di particolare importanza, specie per quanto attiene le problematiche della messa in temperatura della macchina. Si prosegue con un paragrafo dedicato alle prove di lavorazione. Le prove di lavorazione consistono nell'esecuzione di pezzi di prova aventi forma, dimensioni e tolleranze prefissati adatti ad evidenziare le capacità operative di precisione e di produzione. Si giunge così al paragrafo più importante della Norma che è quello dedicato ai controlli geometrici nel quale vengono descritti i metodi oggi utilizzati per tutte le verifiche normalmente eseguite sulle macchine utensili, quali rettilineità, planarità, quadrature, parallelismi, rotazioni, etc. con varie tipologie di strumentazioni oggi reperibili sul mercato. Le verifiche geometriche esaminano solamente le dimensioni, le forme, le posizioni ed i movimenti relativi che possono influire sulla precisione di lavorazione della macchina. L'ultimo paragrafo è dedicato ai controlli speciali che si riferiscono a verifiche di divisione, giochi angolari, intersezioni di assi, circolarità e cilindricità. La Norma si conclude con un allegato dedicato alla strumentazione da adottare per il collaudo delle macchine utensili.

Parte 2

Determinazione della precisione e ripetibilità di posizionamento degli assi

Lo scopo di tale Norma è quello di specificare i metodi di collaudo e valutazione della precisione e ripetibilità di posizionamento degli assi delle macchine utensili a comando numerico mediante misura diretta su singoli assi. I metodi descritti sono applicabili nello stesso modo ad assi con movimenti rettilinei e rotatori. I metodi impiegati richiedono misurazioni ripetute ad ogni posizione. Questa norma tratta solamente la precisione di posizionamento e non la geometria del percorso fra una posizione e l'altra (ISO 230-1). Le misure acquisite durante le prove di verifica, vengono elaborate seguendo le prescrizioni della Guida all'espressione dell'incertezza nella misurazione UNI CEI ENV 13005.

Nel paragrafo successivo allo scopo ed al campo di applicazione si precisano le definizioni delle grandezze da valutare, che in questo caso sono argomento molto rilevante e di non facile interpretazione. Si passa poi all'esame delle condizioni di collaudo che riguardano le condizioni ambientali, le condizioni della macchina e, situazione particolarmente importante, le condizioni di messa in temperatura della macchina. Il paragrafo successivo esamina il programma di prova inteso come modalità, scelta delle posizioni di misura, esecuzione delle misurazioni. Si prosegue con un paragrafo dedicato alla valutazione dei dati ottenuti nel

corso dalle operazioni di collaudo. Il paragrafo successivo definisce i punti da concordare fra costruttore ed utilizzatore: è un paragrafo importante e molto spesso disatteso negli accordi contrattuali dando così origine, in sede di collaudo, a contestazioni e contenziosi che potrebbero essere evitati. La Norma si conclude con un paragrafo dedicato alla presentazione dei risultati e cioè alle indicazioni che devono essere riportate sul protocollo di collaudo. Anche questa Norma possiede una Appendice dedicata ad un ciclo di collaudo facoltativo indicato come ciclo a gradini.

Parte 3

Valutazione degli effetti termici

La presente parte specifica procedure di prova per la valutazione degli effetti termici prodotti dalle variazioni ambientali, dalla rotazione dei mandrini e dal movimento degli assi lineari che danno luogo a deformazioni della struttura delle macchine utensili e a cambiamenti del sistema di posizionamento. Il paragrafo 3 definisce i termini che saranno utilizzati dalla Norma ed è sicuramente paragrafo importante che permette di capire la vastità e la delicatezza di questo problema. Le osservazioni preliminari riguardano le unità di misura, il riferimento alla ISO 230-1 specialmente per l'installazione della macchina prima delle prove e per l'accuratezza raccomandata della attrezzatura di prova, gli strumenti e le apparecchiature da utilizzare, le condizioni in cui devono essere poste le macchine prima delle operazioni di collaudo, la sequenza delle prove, la verifica delle condizioni di temperatura ambiente. Il paragrafo 5 indica come valutare gli effetti termici sulla macchina a causa delle sole variazioni ambientali. Il paragrafo 6 esamina le distorsioni causate per gli effetti termici generati dalla rotazione dei mandrini. Il paragrafo 7 esamina le distorsioni causate dal movimento degli assi lineari. La Norma possiede infine 3 appendici che forniscono informazioni sui trasduttori di spostamento, sul numero e sulla posizione dei trasduttori da utilizzare in funzione dello spostamento analizzato, sull'ambiente termico della macchina utensile (linee guida).

Parte 4

Prove di interpolazione circolare per macchine utensili a controllo numerico

Lo scopo di questa parte della Norma è quello di specificare il metodo che deve essere utilizzato per il collaudo e la valutazione degli errori di circolarità (isteresi, scostamento circolare e radiale) che si manifestano in una operazione di interpolazione circolare e gli strumenti di misura utilizzabili. Il paragrafo 3 fornisce le definizioni utilizzate in tale parte di Norma. Definisce poi le condizioni di collaudo in cui deve essere eseguita la prova ed in particolare le condizioni di ambiente, di preparazione macchina, di riscaldamento macchina, i parametri della prova e le condizioni di taratura dello strumento di misura. Il paragrafo 5 definisce la procedura di prova. Il paragrafo 6 indica come devono essere presentati i risultati della prova e riporta alcuni esempi tipici di presentazione dei risultati del collaudo. Il paragrafo successivo è un paragrafo rilevante perché indica quali sono i punti da concordare tra fornitore e utilizzatore. Questa parte della Norma è completata da 3 appendici di cui la prima illustra le differenze tra scostamento circolare e scostamento radiale, la seconda indica le principali influenze degli scostamenti tipici delle macchine sui movimenti circolari, l'ultima fornisce indicazioni sulla scelta del diametro e della velocità di contornatura.

Parte 5

Determinazione della emissione sonora

Lo scopo di questa parte della Norma è quello di specificare i metodi da utilizzare per verificare i livelli di rumorosità emessi da una macchina utensile in un ambiente industriale. I dati di emissione sonora rilevati sulla macchina utensile vengono utilizzati per dichiarare e verificare il livello di emissione sonora come specificato nella ISO 4871 e per confrontare i risultati di diverse unità appartenenti ad una data famiglia di macchine utensili sotto definite condizioni ambientali ed operative. Il paragrafo 3 si riferisce ai termini e alle definizioni che vengono utilizzate ed è un paragrafo importante data la complessità dell'argomento. Il paragrafo 4 analizza le caratteristiche che devono possedere gli strumenti utilizzati, le loro condizioni di taratura e le condizioni ambientali che possono produrre un effetto sfavorevole sul microfono utilizzato per le misurazioni. Il paragrafo successivo prende in esame le condizioni di installazione e di funzionamento

della macchina sottoposta al collaudo. Il paragrafo 6 analizza la procedura di misurazione da adottare. Data la particolarità delle misure di rumorosità il paragrafo 7 si interessa specificamente del problema dell'incertezza della misura effettuata. I paragrafi 8 e 9 definiscono quali sono le informazioni che devono essere raccolte nel corso della prova e quelle che devono essere riportate nel protocollo di collaudo. Il paragrafo 10 stabilisce i criteri da seguire per la dichiarazione e la verifica dei valori di emissione sonora della macchina utensile. Il paragrafo 11 specifica un metodo per la determinazione del livello di pressione sonora in posizioni stabilite. Il paragrafo 12 specifica un metodo per la determinazione del livello di potenza sonora emesso da una macchina utensile. Questa parte della Norma è completata da 5 allegati due dei quali sono integrativi della Norma stessa e tre sono allegati informativi di esemplificazione.

Parte 6

Prove di spostamenti in diagonale

Lo scopo di tale parte è quello di offrire un metodo per poter valutare, in tempi industrialmente accettabili, le caratteristiche di precisione di posizionamento di una macchina nel volume di lavoro. Infatti le prove di spostamento in diagonale descritte dalla norma permettono una stima della prestazione volumetrica della macchina in tempi e con costi ridotti essendo difficile e costoso un test completo. Il paragrafo 3 fornisce le definizioni dei termini utilizzati nella Norma. Le osservazioni preliminari, riportate nel paragrafo 4, riguardano le unità di misura, i riferimenti alle ISO 230-1 e ISO 230-2 per quanto riguarda l'installazione della macchina, il riscaldamento e le accuratezze richieste alle attrezzature, il set-up, la strumentazione, la valutazione e presentazione dei risultati, le prove da eseguire, gli strumenti di misura (fa riferimento a quanto indicato nella ISO 230-1), la posizione degli assi non in prova, i parametri che influenzano l'incertezza di misura. Il paragrafo 5 individua la procedura di prova, le posizioni, le misurazioni, la velocità di avanzamento, la procedura di set-up. Il paragrafo successivo dà indicazioni riguardo la valutazione dei risultati. Il paragrafo 7 definisce quali sono i punti sui quali deve essere raggiunto un accordo esplicito tra Fornitore e Committente e questo è paragrafo di estrema importanza. Il paragrafo 8, infine, descrive il modo in cui i risultati della prova devono essere presentati. Questa parte della Norma è completata da una Appendice che descrive le operazioni di set-up della apparecchiatura Laser Interferometrica.

Parte 7

Accuratezza geometrica di assi rotativi

Lo scopo della presente parte di Norma è quello di normalizzare metodi di specifica e prove di accuratezza geometrica di assi rotativi. Vengono considerati gli errori di moto dell'asse di rotazione e gli spostamenti dell'asse indotti dalla velocità. Per quanto riguarda invece l'accuratezza di posizionamento, l'errore di rotondità in rotazione, le misurazioni del rumore, etc. si fa riferimento alle opportune parti della ISO 230. Il paragrafo 3 fornisce le definizioni dei termini utilizzati nella Norma. Le osservazioni preliminari, riportate nel paragrafo 4, riguardano le unità di misura, i riferimenti alle ISO 230-1, la strumentazione e attrezzatura di misura raccomandata, l'ambiente, gli assi di rotazione da provare, il riscaldamento degli assi di rotazione. Il paragrafo successivo dà indicazioni sui metodi di prova dell'errore di moto. La norma si completa con 7 Appendici.

Parte 8

Determinazione dei livelli di vibrazione

Tale parte è attualmente ancora in fase di preparazione e fornirà utili indicazioni su come misurare lo stato vibrazionale di una macchina utensile.

Parte 9

Stima dell'incertezza di misura delle prove effettuate sulle macchine utensili in accordo con la ISO 230, equazioni di base

Lo scopo della presente Norma è quello di fornire una informazione su come stimare l'incertezza di misura per le prove effettuate in accordo con la ISO 230. In sostanza suggerisce metodi di valutazione e di calcolo dei contributi d'incertezza semplificando la procedura descritta nella GUM e quindi le incertezze tipo sono principalmente incertezze di tipo B. Il paragrafo 3 fornisce le definizioni dei termini utilizzati nella Norma. Il paragrafo 4 fornisce una equazione per il calcolo dell'incertezza estesa. Il paragrafo 5 riporta una stima dell'incertezza dei parametri. La Norma termina con 3 Appendici.

3.2. Norme specifiche per tipologia di macchina

Le Norme specifiche per tipologia di macchina sono una serie di norme, che cercano di individuare tutte le tipologie di macchine presenti sul mercato e, per ciascuna di questa, descrivono in modo completo le diverse tipologie di prove cui la macchina deve essere sottoposta in fase di collaudo. Per ciascuna tipologia di prova viene riportato uno schizzo che aiuta a comprendere come deve essere preparata la macchina e la strumentazione necessaria ad eseguire la prova, vengono riportati gli strumenti di misura necessari, sono indicate quindi le tolleranze ammesse ed infine viene riportato il riferimento alla Norma ISO 230 cui ci si deve riferire per eseguire la prova. Un esempio di tale tipologia di Norma è dato dalla ISO 10791, che riguarda le verifiche di prova per i centri di lavoro. Tale Norma ha come titolo generale "Test conditions for machining centres", si articola in 11 parti e definisce in modo assolutamente soddisfacente tutte le problematiche che possono insorgere in sede di collaudo per tale tipologia di macchina. Un altro esempio è dato dalla ISO 13041 che ha come titolo generale "Test conditions for numerically controlled turning machines and turning centres", si articola in 8 parti e considera tutte le prove che possono essere eseguite nel collaudo dei centri di tornitura.

Si può, quindi, affermare che il Sistema Normativo delle macchine utensili risulta assolutamente valido, ben articolato e completo se, però, ci si riferisce a macchine di tipologia tradizionale. Infatti, sulla base di quanto è stato detto, si possono facilmente comprendere le difficoltà cui si può andare incontro nel momento in cui si deve effettuare il collaudo di una macchina "speciale" la cui tipologia non è stata prevista dalla Normativa. Infatti, in tal caso, non c'è più la norma di riferimento per il collaudo delle macchine utensili e, d'altra parte, non è pensabile che la Normativa possa prevedere tutte le configurazioni di macchina che un progettista può pensare di realizzare in quanto, soprattutto ai giorni d'oggi, si tende a costruire sempre più "macchine su misura" per il cliente aventi le più svariate configurazioni e con tipologie di lavorazione non più specifiche ed uniche.

Si introduce nell'ultimo capitolo il problema del collaudo delle macchine speciali e si propone un possibile protocollo di collaudo che abbia la caratteristica fondamentale di essere flessibile, cioè di essere indipendente dalla particolare configurazione assunta dalla macchina.

4. Strumentazione

Si descrivono adesso alcuni tra gli strumenti di misura più utilizzati per le verifiche geometriche delle macchine utensili.

4.1.1. Righe di controllo

La riga di controllo materializza, con una data precisione, la retta di riferimento rispetto alla quale si determinano gli scostamenti dalla rettilineità e dalla planarità di superfici da esaminare. Esistono due tipi principali di righe di controllo: la riga da aggiustaggio, a profilo a resistenza uniforme (*Fig. 3 a*) e la riga a facce parallele. Quest'ultima può essere a sezione a doppia T con anima piena o forata (*Fig. 3 b*) oppure a sezione rettangolare piena (*Fig. 3 c*). In *Fig. 3* si riportano le tipologie di righe dove vengono indicati i supporti favorevoli (1), la superficie di lavoro (W) e la superficie laterale (S):

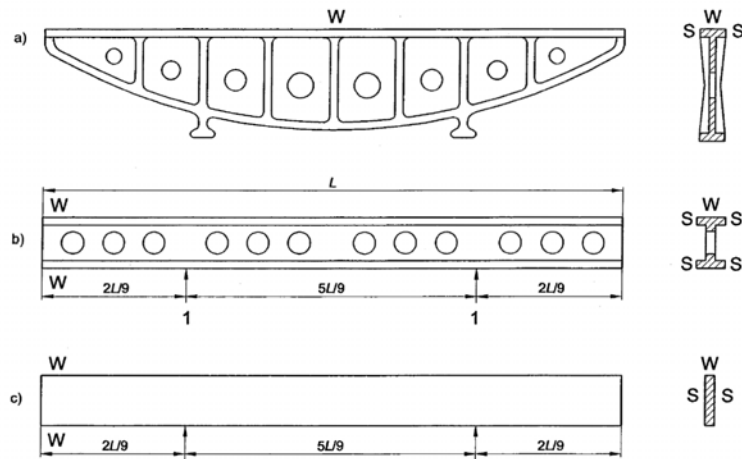


Fig. 3: Righe di controllo

Le righe, per poter essere utilizzate nel controllo delle macchine utensili, devono soddisfare una serie di condizioni che riguardano la massima freccia ammissibile (non maggiore di 0,01 mm su 1000 mm), la planarità e rettilineità delle superfici di lavoro (gli scostamenti di planarità e rettilineità delle superfici di lavoro della riga non devono essere superiori a $(2+0,01 L)/1000$ con L lunghezza utile della riga, espressa in mm), il parallelismo delle superfici di lavoro (la tolleranza di parallelismo delle superfici di lavoro non deve superare 1,5 volte la tolleranza di rettilineità), la rettilineità delle facce laterali ($10(2+0,01 L)/1000$ in mm), il parallelismo delle facce laterali ($15(2+0,01 L)/1000$ in mm), la perpendicolarità delle facce laterali rispetto alle superfici di lavoro (la tolleranza di perpendicolarità delle facce laterali rispetto alle superfici di lavoro non deve superare +0,0025 mm per 10 mm di lunghezza di misura), lo stato superficiale delle superfici di lavoro che servono alle misurazioni (dovrebbe corrispondere ad una rettifica di buona rugosità superficiale o ad una raschiatura fine), la larghezza della riga di controllo (la larghezza delle superfici di lavoro utili non deve essere minore di 35mm). In Fig. 4 si riporta uno schema con le dimensioni (in mm) tipiche delle righe di controllo.

No.	Length		Diagram	Broad type		Normal type	
	Working	Total ¹⁾		Section	Mass ²⁾ kg	Section	Mass ²⁾ kg
1	300	340			2		1
2	500	540			4		3
3	800	840			5		5
4	1 000	1 040			12		12
5	1 600	1 640			33		33

1) The total length is a little greater than the working length, so that inspections may be made without having to use the ends of the straightedge, which are more difficult to machine accurately.
2) Masses are relative to plain cast iron; they would be slightly greater in the case of steel.

Fig. 4: Dimensioni delle Righe di controllo

La riga di controllo, che è di regola utilizzata orizzontalmente, può essere disposta sia di piatto con le superfici di lavoro verticali, sia appoggiata su dei supporti con le superfici di lavoro orizzontali.

Le righe dovrebbero, di preferenza e quando applicabile, essere trattate termicamente e stabilizzate. Uno dei problemi fondamentali che caratterizzano tale strumento è quello della stabilità termica in quanto una elevata differenza di temperatura (ad esempio $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$) tra la zona superiore e quella inferiore, può far perdere alla guida una rettilineità di ordine pari a quella che si vuole verificare e quindi ci si può trovare in una condizione, dal punto di vista metrologico, ammissibile. Normalmente questi strumenti di riferimento, sono realizzati in granito, che risulta stabile nel tempo e poco sensibile alle variazioni dei temperatura.

4.1.2. Cilindri di controllo

I cilindri di controllo materializzano, con una data precisione l'asse che si desidera controllare, sia riguardo l'errore di rotondità in rotazione, sia per quel che concerne la sua posizione in rapporto ad altri elementi della macchina utensile. Sono formati da una parte conica, che si innesta nel mandrino della macchina da sottoporre a prova, e di una parte cilindrica, utilizzata come riferimento per le misurazioni (vedi *Fig. 5 a*) e *b*). Sono di acciaio temprato e stabilizzato con o senza rivestimento di cromo duro.

Devono avere le seguenti caratteristiche:

- a) devono essere muniti, per la loro esecuzione in officina e per il loro controllo metrologico, alle loro estremità, di fori da centro rettificati e lappati;
- b) in posizioni distanziate di 90° (1,2,3,4) devono essere marcati quattro segmenti di riferimento r ; la distanza tra i segni alle due estremità della parte cilindrica rappresenta la lunghezza di misura l : 75 mm, 150 mm, 200 mm, 300 mm o 500 mm;
- c) I coni Morse e i coni metrici a piccola conicità, tendono a restare innestati per semplice aderenza (vedi *Fig. 5 a*): deve perciò essere prevista una parte filettata destinata a ricevere un dado per l'estrazione del mandrino dalla sede conica;
- d) Nel caso di coni a grande conicità (vedi *Fig. 5 b*) si deve prevedere un foro filettato che permetta di utilizzare un tirante filettato per il fissaggio, o di montare un codolo utilizzato in macchine dotate di cambio utensili automatico.

Il cilindro può essere dotato di un prolungamento P con lunghezza compresa tra 14 mm e 32 mm ed un diametro leggermente minore di quello della parte cilindrica.

Nel caso di cilindri vuoti, i tappi di estremità dovrebbero essere fissati in modo definitivo e rigido in modo che essi non possano dare deformazioni postume allo strumento. Devono essere rispettate le tolleranze indicate in *Fig. 6* per le diverse lunghezze di misura. Al fine di ridurre l'attrito con lo stilo del comparatore, la parte cilindrica dello strumento deve presentare uno stato superficiale corrispondente ad una rettifica molto fine. L'innesto del cono del cilindro nel mandrino della macchina da controllare dovrebbe avvenire correttamente, in caso contrario si richiede una verifica del mandrino. Per misurare la rotondità in rotazione, il cilindro dovrebbe essere inserito in successione nel mandrino in quattro posizioni tra di loro sfasate di 90° , e dovrebbe essere preso il valore medio delle quattro misure. La verifica della posizione laterale di un componente o del suo parallelismo si effettua successivamente su due generatrici opposte del cilindro di controllo, facendo ruotare l'insieme mandrino e cilindro di 180° . Dopo l'innesto di un cilindro di controllo nel mandrino conviene attendere qualche istante in modo da permettere la dissipazione del calore emanato dalla mano dell'operatore e la stabilizzazione della temperatura.

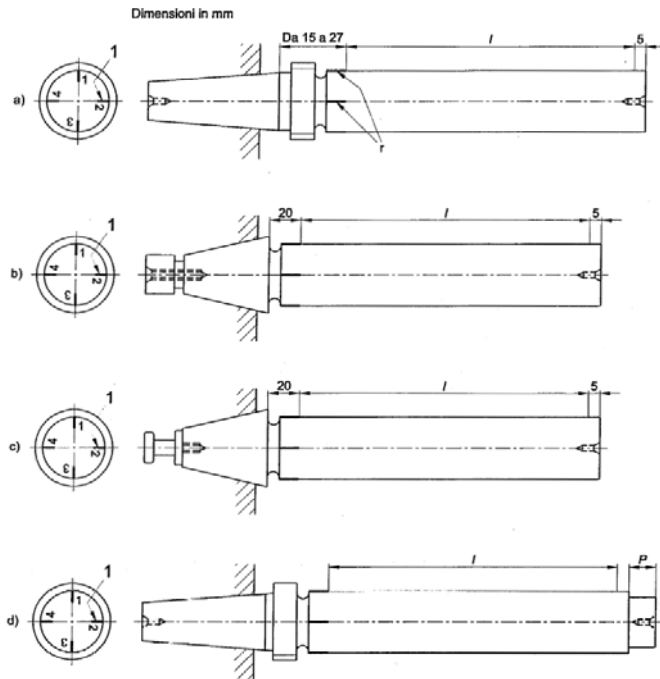


Fig. 5: Cilindri di controllo con coni Morse e metrici

Dimensioni mm

Lunghezza di misura, l	75	150	200	300	500
Rotondità in rotazione su tutta la lunghezza	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003
Massima variazione di diametro della parte cilindrica	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003
Tolleranza sul cono	La pressione del cono dovrebbe corrispondere a quella del tampone verificatore				

Fig. 6 : Requisiti dei cilindri di controllo

4.1.3. Cilindri da applicare tra le punte

Mentre un cilindro di controllo con un attacco conico serve per rappresentare materialmente un asse di rotazione, un cilindro montato tra le punte (vedere la Fig. 7) rappresenta semplicemente una linea retta passante per due punti.

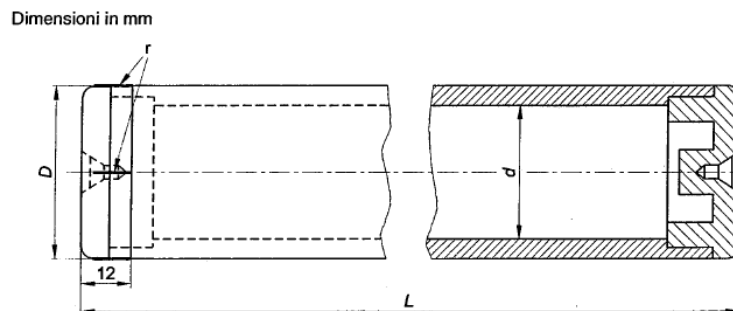


Fig. 7 : Cilindri per montaggio tra centri

L'asse di tale cilindro dovrebbe essere rettilineo e la sua superficie esterna perfettamente cilindrica. Esso porta a ciascuna estremità quattro incisioni situate in due piani assiali perpendicolari e due fori da centro di tipo protetto.

La superficie esterna del tubo è rettificata fino ad ottenere il grado prescritto di cilindricità. Il problema riguardante questi cilindri è l'ottenimento della necessaria precisione nella loro fabbricazione. Infatti, poiché l'allineamento delle macchine utensili deve essere misurato con una accuratezza di 0,01 mm su 300 mm, il cilindro tra le punte dovrebbe presentare una rettilineità almeno migliore di 0,003 mm sulla stessa lunghezza.

Oltre i 300 mm, i cilindri tra le punte dovrebbero essere tubolari, lo spessore deve essere scelto in funzione della riduzione della massa, senza pregiudicare la rigidità. I cilindri di lunghezza superiore a 1600 mm presentano difficoltà di manipolazione e la loro massa tende a renderli poco maneggevoli. E' quindi necessario usare strumenti di misura alternativi quali strumenti ottici, filo teso e microscopio, ecc.

Nella Fig. 8 si riportano, a titolo di esempio, quattro serie di cilindri in grado di soddisfare la maggior parte delle misurazioni richieste per il collaudo di macchine utensili.

Lunghezza totale L mm	Diametro esterno D mm	Diametro interno d mm	Massa senza i terminali kg	Freccia naturale ¹⁾ mm	Precisione		Grado di finitura superficiale
					Massima variazione di diametro mm	Tolleranza di rotondità in rotazione mm	
$150 \leq L \leq 300$	40	0	da 1,5 a 3	da 0,000 02 a 0,000 04	0,003	0,003	Rettifica molto fine
$301 \leq L \leq 500$	63	50	da 2,7 a 4,5	da 0,000 1 a 0,000 7	0,003	0,003	
$501 \leq L \leq 1\ 000$	80	61	da 8,3 a 16,5	da 0,000 5 a 0,008	0,004	0,007	
$1\ 001 \leq L \leq 1\ 600$	125	105	da 28,2 a 45	da 0,003 a 0,019	0,005	0,010	

¹⁾ $E = 206\text{ kN/mm}^2$

Fig. 8 : Tipi di cilindri per montaggio tra centri

Per effettuare il parallelismo, si effettuano delle letture su una generatrice sulla superficie cilindrica del cilindro di controllo e poi sulla generatrice opposta, dopo aver ruotato il cilindro di controllo di 180°. Queste due serie di letture vengono poi ripetute sulla stessa coppia di generatrici dopo aver ribaltato testacoda il cilindro di controllo. La media di queste quattro serie di letture esprime quindi lo scostamento dal parallelismo. Tale metodo di misurazione permette di eliminare la maggior parte delle cause di scostamento derivanti dalle imprecisioni del cilindro tra le punte.

4.1.4. Squadre

I principali tipi di squadre sono:

1. le squadre costituite da un piano e da una superficie ad angolo retto rispetto a questo, con o senza centina di rinforzo (vedi Fig. 9 a));
2. i cilindri squadra che materializzano un asse perpendicolare ad un piano (vedi Fig. 9 b) e c));
3. i telai a squadra con o senza centine di rinforzo (vedi Fig. 9 d)).

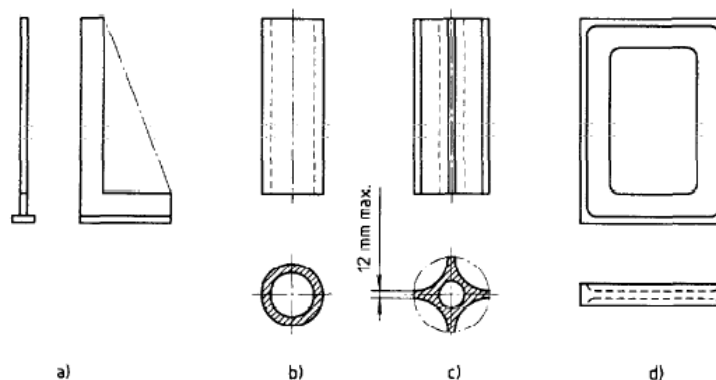


Fig. 9 :Principali tipi di squadre

Le dimensioni delle squadre generalmente non devono superare i 500 mm. Per controllare quadrature su lunghezze maggiori è consigliabile utilizzare metodi ottici che presentano maggiori praticità di impiego. Le squadre sono costruite in acciaio, ghisa o altro materiale specifico; è necessario che il materiale utilizzato subisca, quando applicabile, un trattamento di stabilizzazione. Le squadre devono essere costruite in modo da rispondere ad una serie di requisiti che riguardano la tolleranza di planarità o di rettilineità (la tolleranza di rettilineità per le squadre a tallone o per i cilindri a squadra è data da $(2+0,01 L)/1000$ con L lunghezza utile in mm), la tolleranza di perpendicolarità (data da 0,005 su 300 mm, l'angolo può essere sia maggiore che minore di 90°), il grado di finitura delle superfici di lavoro (corrispondente ad una rettifica fine o ad una raschiatura) e la tolleranza di rigidità delle squadre a tallone del tipo a) in Fig. 9.

Le tolleranze di perpendicolarità che si incontrano normalmente sulle macchine utensili variano tra 0,03 mm/1000 mm e 0,05 mm/1000 mm. Le squadre assolvono lo scopo di realizzare tali misure. Se si vogliono verificare tolleranze più strette si dovrebbe tener conto nelle misure dell'errore della squadra utilizzata, oppure utilizzare altri strumenti.

4.1.5. Livelle di precisione

Esistono due tipi di livelle di precisione che sono le livelle a liquido (vedi Fig. 10) e le livelle elettroniche (vedi Fig. 11). Entrambe le livelle presentano due funzioni principali e precisamente la determinazione di un'inclinazione rispetto ad un riferimento assoluto e la comparazione di piccole variazioni d'angolo o di pendenza. Il grado di precisione del controllo da effettuare determina la sensibilità ed il tipo di livella da utilizzare.

4.1.5.1. Livelle a liquido

La livella può essere dotata di una vite micrometrica o di una scala graduata sul tubo, può possedere inoltre un'eventuale vite di azzeramento. Nel primo caso le variazioni di pendenza sono lette sulla scala del micrometro; nel secondo direttamente sulle linee di graduazione del tubo. La costante di una livella o sensibilità apparente è la variazione di pendenza, espressa in mm al mm (o in arcosecondi), che produce il movimento della bolla d'aria di una divisione.

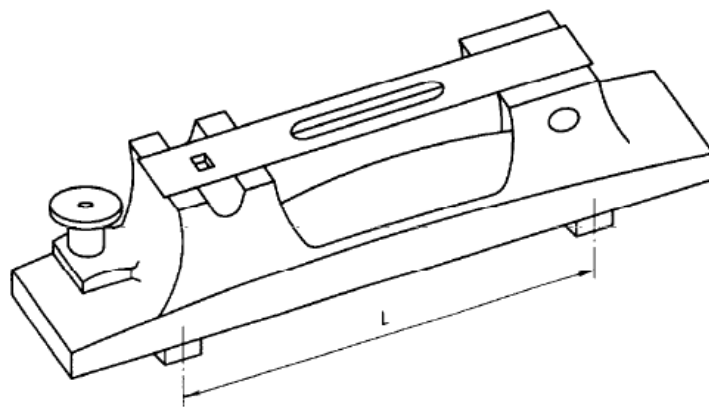


Fig. 10 :Livella a liquido regolabile

Per effettuare il collaudo di macchine utensili si raccomanda di utilizzare livelle con precisioni da 0,005 mm/1000 mm a 0,01 mm/1000 mm e una sensibilità minima di 2 arcosecondi, ossia tale da muovere la bolla di una divisione per una variazione di pendenza non maggiore di 0,01 mm/1000 mm. La planarità della base dovrebbe essere conforme con le seguenti tolleranze: 0,004 mm per $L \leq 250$ mm e 0,006 mm per $250 \text{ mm} \leq L \leq 500$ mm. Nel caso in cui la livella possieda una base di appoggio piana e continua su tutta la sua lunghezza, è indispensabile che questa sia concava e non convessa. Una misurazione eseguita con la livella deve essere eseguita nel minor tempo possibile e le misure dovrebbero essere eseguite nelle due direzioni, in modo da tener conto delle eventuali variazioni di temperatura che potrebbero aver luogo tra

l'inizio e la fine dei rilievi. Tale tipo di livella necessita di tarature periodiche in quanto il tubo di vetro può subire delle deformazioni per invecchiamento.

4.1.5.2. Livelle elettroniche

Le livelle elettroniche assicurano alcuni notevoli vantaggi rispetto alle livelle a liquido. Tra questi possiamo citare la rapidità di risposta, la elevata ripetibilità nell'esecuzione delle misure, sono meno sensibili alle variazioni termiche, hanno la possibilità di utilizzare diversi livelli di sensibilità dello strumento in modo da renderlo utilizzabile per varie esigenze metrologiche, è possibile modificare, entro limiti sufficientemente vasti, la condizione di azzeramento dello strumento, possono essere interfacciate con dispositivi elettronici per la rappresentazione grafica dei risultati. In *Fig. 11* è rappresentato un modello di livella elettronica.



Fig. 11 : Livella elettronica

Poiché l'amplificazione del segnale nelle livelle elettroniche è regolabile, è importante che essa venga tarata periodicamente con l'ausilio di una barra-seno. Alcune livelle elettroniche potrebbero essere influenzate da campi magnetici (ad esempio basi magnetiche di comparatori). Quando si deve misurare un livellamento rispetto all'orizzonte assoluto, si devono eseguire con la livella due misure: una prima misura viene eseguita con lo strumento nella direzione che si desidera controllare, la seconda dopo aver ruotato la livella di 180°. Si considera la media delle due letture.

4.1.6. Filo teso e microscopio

Lo strumento comprende un microscopio con un'ottica provvista di reticolo, ed una ghiera di regolazione micrometrica per indicare la sua esatta posizione rispetto al filo teso.

Il microscopio può essere posizionato sulla macchina con l'ausilio di una livella di precisione. Le due estremità del filo sono allineate per mezzo del reticolo del microscopio. Le osservazioni vengono eseguite nel piano orizzontale movimentando la tavola (vedi *Fig. 12*).

- Legenda
 1 Microscopio
 2 Filo teso

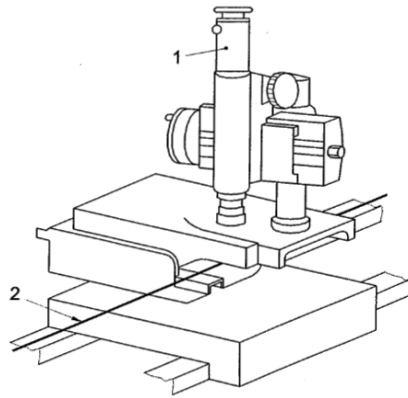


Fig. 12 : Filo teso e microscopio

Si deve porre molta attenzione quando si tende il filo, in quanto dovrebbe esso essere sufficientemente teso e privo di nodi. Il diametro del filo dovrebbe essere il più piccolo possibile, in ogni caso non maggiore di 0,1 mm.

In *Fig. 13* è raffigurato un modello di microscopio di allineamento della Leitz detto a sdoppiamento di immagine perchè è equipaggiato con un oculare che permette di osservare due immagini del filo, di cui una ruotata di 180°.

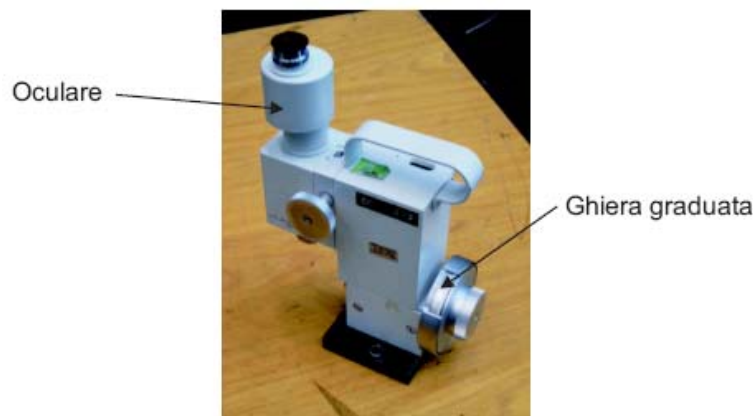


Fig. 13 : Microscopio a sdoppiamento di immagine Leitz

La rotazione della seconda immagine fa sì che nel caso il filo non si trovi in corrispondenza dell'asse ottico del microscopio, le due immagini risultino non allineate. Tramite la ghiera graduata è possibile spostare il microscopio rispetto al filo ed osservare attraverso l'oculare i due lembi di filo che si avvicinano fino ad essere allineati (vedi *Fig. 14*), in questa situazione l'asse ottico del microscopio è perpendicolare al filo e sul nonio graduato della ghiera è possibile leggere lo spostamento effettuato dal microscopio per allinearsi. Questo spostamento è lo scostamento di rettilineità locale rispetto al riferimento di misura rappresentato dal filo.

Il filo deve essere posizionato alle estremità della linea da verificare controllando che in entrambe le posizioni la lettura del microscopio coincida.

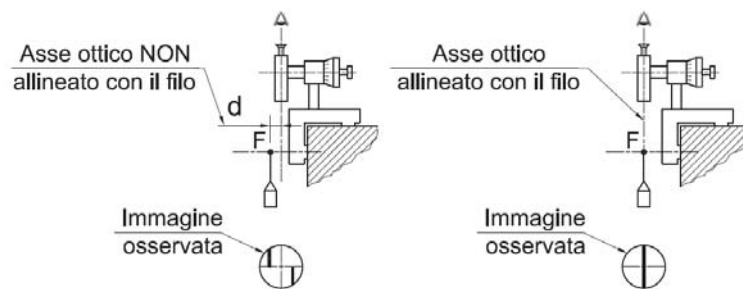


Fig. 14 : Non allineamento ed allineamento tra filo ed asse ottico

4.1.7. Piani di riscontro

Le misure dei piani di riscontro (vedi Fig. 15) possono variare da un minimo di 160 mm x 100 mm fino a 2500 mm x 1600 mm. Possono essere di ghisa o di granito. Quelli di ghisa sono provvisti, a differenza di quelli di granito, di opportune maniglie per la loro movimentazione.



Fig. 15 : Piano di riscontro in granito

I piani di riscontro con misure fino a 1000 mm x 630 mm, sono forniti di tre piedi regolabili; i piani con dimensioni da 400 mm x 250 mm o maggiori sono forniti di piedi di sicurezza contro il ribaltamento. I piani di riscontro con dimensioni maggiori di 1000 mm x 630 mm sono supportati da cinque o più piedi regolabili (vedi Fig. 16):

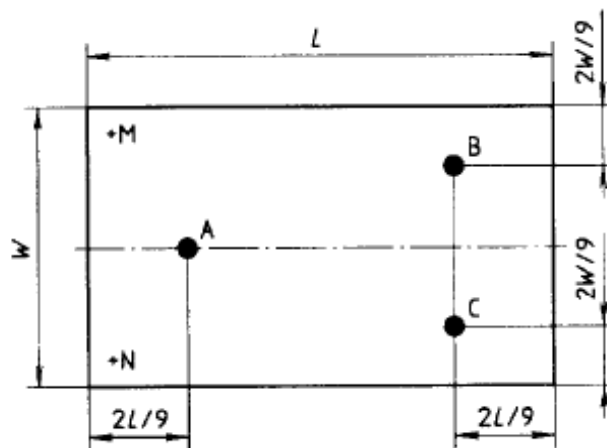


Fig. 16 : Posizione dei supporti per piani di riscontro di grandi dimensioni

Con A, B e C sono indicati i supporti del piano di riscontro per la flessione minima dovuta al peso proprio, con M ed N sono indicati i supporti di sicurezza.

4.1.8. Interferometro laser

Lo sviluppo degli interferometri laser ha fornito all'industria delle macchine utensili uno strumento di elevata accuratezza che permette di essere utilizzato su macchine di qualsiasi tipo e dimensione.

L'interferometro laser sfrutta la proprietà delle onde elettromagnetiche di *interferire* quando si sovrappongono e la proprietà delle sorgenti *laser* di emettere luce con elevato grado di coerenza. Nell'ambito della macchine utensili gli strumenti laser vengono principalmente utilizzati per misurare spostamenti e tramite attrezzature ottiche dedicate è anche possibile misurare la rettilineità, l'ortogonalità di assi e la planarità delle superfici.

4.1.8.1. Principio di interferenza - L'interferometro di Michelson

L'uso del principio di interferenza delle onde elettromagnetiche per la misura di spostamenti può essere schematizzato come in Fig. 17:

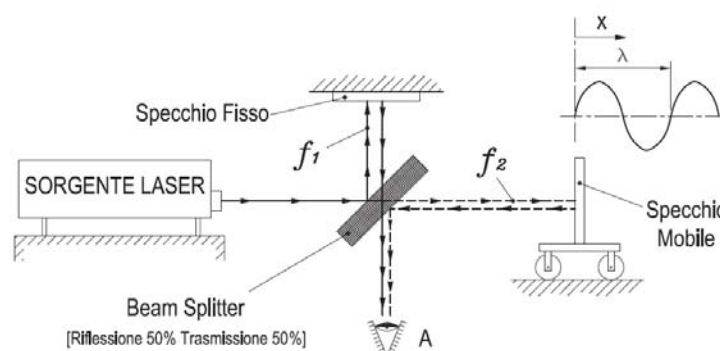


Fig. 17 : Schema dell'interferometro di Michelson

La luce monocromatica proveniente dalla sorgente viene divisa in due fasci (f_1 e f_2) da un divisore di fascio detto beam splitter. Il raggio f_1 viene riflesso da uno specchio fisso, mentre il raggio f_2 viene riflesso da uno specchio mobile, i due fasci ritornano nel beam splitter dove si ricombinano e il raggio risultante è osservabile nel punto A. Se gli spazi percorsi dai due raggi sono identici i due fasci interferendo costruttivamente creano un massimo di intensità del raggio luminoso nel punto A. Spostando lo specchio mobile di una distanza inferiore alla mezza lunghezza d'onda ($x < \lambda / 2$) i due raggi giungono nel punto A sfasati, producendo un'intensità del raggio risultante minore. Quando lo specchio mobile si è spostato di una mezza lunghezza d'onda ($x = \lambda / 2$) nel punto A i due raggi si sovrappongono distruttivamente creando una zona con intensità minima del raggio. Ogni spostamento pari ad una mezza lunghezza d'onda corrisponde ad un ciclo completo di illuminazione luce-ombra, ovvero ad un ciclo di intensità massima-minima. Conoscendo la lunghezza d'onda della luce monocromatica utilizzata e sapendo che in un ciclo luce - ombra - luce lo specchio mobile si è spostato di una lunghezza d'onda, è possibile, contando il numero di cicli, calcolare la distanza percorsa dallo specchio mobile rispetto alla posizione iniziale.

In funzione del tipo di misura (spostamento, rettilineità, planarità, ecc.) vengono utilizzati componenti ottici diversi, che sfruttano il stesso principio base: la differenza di cammino ottico percorso da due raggi è rilevata ed elaborata per ottenere la misura voluta.

4.1.8.2. Composizione di una apparecchiatura laser

L'attrezzatura necessaria alle diverse tipologie di misure è costituita da:

Sorgente laser

E' il cuore del sistema che genera i fasci laser che vengono utilizzati per generare nell'interferometro le frange di interferenza.

Riflettore del fascio laser

E' l'ottica che solitamente viene montata sull'organo di cui si deve misurare lo spostamento e che ha la funzione di riflettere verso l'interferometro la radiazione laser.

Interferometro

E' l'ottica sulla quale si ricombinano, dopo aver effettuato percorsi diversi, i fasci laser che danno origine alle frange di interferenza dal conteggio delle quali discende il valore dello spostamento effettuato dal riflettore.

Elaboratore e Visualizzatore

E' lo strumento che visualizza, dopo aver elaborato le informazioni ricevute, la distanza che è stata misurata. Questo strumento ha la possibilità di eseguire particolari programmi di misura complessi secondo quanto stabilito dalle normative (vedi, ad esempio ISO 230-2), memorizzare i dati, elaborarli ed visualizzarli sia su adeguati diagrammi che in valore numerico.

Compensatore automatico delle condizioni ambientali

E' strumento particolarmente importante in un sistema laser dedicato a misure di grandi dimensioni le quali sono influenzate dalle condizioni di temperatura, pressione ed umidità del mezzo in cui il fascio laser si propaga oltre ovviamente che condizioni di temperatura del particolare che si sottopone a misura.

Quindi, oltre ai sensori per le rilevazioni della temperatura, pressione e umidità dell'aria e una serie di schede di acquisizione ed elaborazione dei segnali provenienti dai sensori vi sono poi una serie di accessori dedicati al tipo di misurazione che si vuole effettuare che sono composti esclusivamente da componenti ottici passivi che utilizzando principi diversi costruiscono diverse geometrie di percorsi per il raggio emesso. In tutte le tipologie di misura lo spostamento di un componente passivo modifica la lunghezza del percorso ottico dando luogo alla misurazione di una particolare caratteristica.

4.1.8.3. Principali cause di errore

Si elencano di seguito alcune cause di errore da considerare prima di effettuare le misure:

condizioni ambientali

L'accuratezza di un interferometro laser è direttamente subordinata alla accuratezza con la quale si acquisiscono le condizioni ambientali. Indicativamente ogni errore di 1°C nella misura della temperatura ambientale, di 2,5 mmHg nella pressione assoluta e di 30% nell'umidità relativa, corrispondono, ciascuno, ad un errore di misura di una parte per milione. Questi errori possono essere corretti sia tramite una compensazione manuale, sia per mezzo di un compensatore automatico. E' comunque indispensabile che le condizioni ambientali rimangano stabili durante tutto il periodo di prova.

Temperatura superficiale della macchina

Nelle macchine utensili che utilizzano una vite madre di acciaio per il posizionamento della slitta, l'effetto della temperatura sulla macchina utensile stessa può significare un potenziale allungamento della vite madre di 0,0108 mm per ogni ° C di variazione di temperatura su una corsa di 1000 mm.

Errore di percorso morto

Si tratta di un errore associato alla variazione delle condizioni ambientali durante la misurazione. E', cioè, l'errore dovuto alla non compensazione della lunghezza di parte del percorso del raggio laser, ed è prodotto da una variazione delle condizioni ambientali nelle vicinanze del raggio (che genera un cambiamento della lunghezza d'onda del laser) e da una variazione della temperatura del supporto dell'ottica interferometrica e del supporto del riflettore (che produce un aumento o una diminuzione della distanza tra il l'interferometro ed il riflettore (vedi Fig. 18):

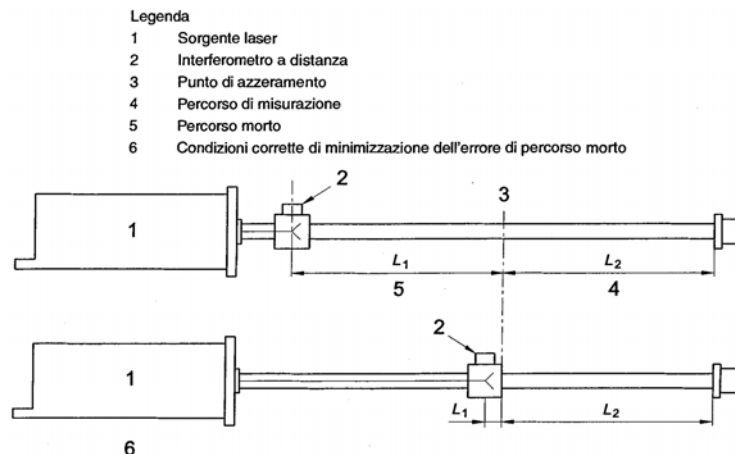


Fig. 18 : Errore di percorso morto

La zona di percorso morto è la distanza tra l'interferometro ottico ed il punto di azzeramento assunto per la misurazione (L_1). Se non vi è movimento tra l'interferometro ottico ed il riflettore e si realizzano delle variazioni di condizioni ambientali intorno al percorso del raggio laser, la lunghezza d'onda subirà una variazione sulla lunghezza totale della traiettoria ($L_1 + L_2$). Se il valore di compensazione della velocità della luce varia per tenere conto delle nuove condizioni ambientali, il sistema laser correggerà la variazione di lunghezza sulla distanza L_2 , ma non saranno invece apportate compensazioni sulla distanza L_1 di percorso morto.

Errore di coseno

Un errato allineamento del percorso del raggio laser con l'asse di movimento della macchina utensile da misurare, si traduce in un errore tra la distanza misurata e l'effettiva distanza percorsa. Tale errore dovuto ad un errato allineamento è indicato come errore di coseno. A causa di tale errore la distanza misurata risulterà più corta della distanza effettiva (vedi Fig. 19):

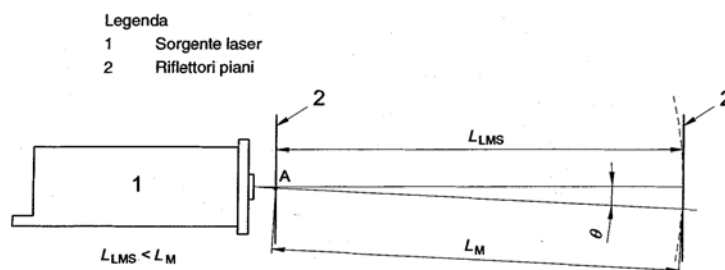


Fig. 19 : Errore di coseno (errato allineamento)

La distanza misurata dal sistema di misurazione laser è L_{LMS} , mentre la distanza effettiva percorsa dalla macchina utensile è L_M . L'unico modo di ridurre al minimo tale errore è quello di realizzare un buon allineamento in fase di messa in opera.

5. Verifiche geometriche

Le verifiche geometriche consistono nella verifica di dimensioni, forme e posizioni di componenti e del loro reciproco scostamento. Esse comprendono tutte le operazioni che riguardano i componenti della macchina (planarità di superfici, coincidenza ed intersezione di assi, parallelismo, perpendicolarità di linee rette e di superfici piane). Le verifiche indicate riguardano soltanto le dimensioni, le forme, le posizioni ed i movimenti relativi che possono influire sulla precisione di lavorazione della macchina utensile.

In tale sezione del lavoro verranno indicati alcuni tra i metodi di verifica della precisione delle macchine utensili secondo quanto viene riportato sulla Norma ISO 230-1.

Le verifiche geometriche prese in considerazione sono:

- rettilineità
- planarità
- parallelismo, equidistanza e coincidenza
- perpendicolarità
- rotazione

Per ciascuna verifica viene indicati i metodi di misurazione e gli strumenti utilizzati.

5.1.1. Rettilineità

Le verifiche geometriche riguardanti la rettilineità sono:

- rettilineità di una linea in un piano o nello spazio
- rettilineità di componenti
- rettilineità di movimento

Esistono due metodi di misurazione della rettilineità: uno è basato sulla *misurazione di lunghezza*, l'altro sulla *misurazione di angoli*. Il riferimento pratico per la rettilineità può essere fisico (riga di controllo, filo teso) oppure per confronto a linee di riferimento date da una livella di precisione, un raggio luminoso, ecc. E' opportuno impiegare, per lunghezze minori di 1600 mm, una livella di precisione o un riferimento fisico (ad esempio riga di controllo), per lunghezze maggiori linee di riferimento (una livella di precisione, un dispositivo ottico o un filo teso).

5.1.1.1. Metodi basati sulla misurazione di lunghezza

Un riferimento pratico di rettilineità viene posto in una posizione relativa opportuna rispetto alla linea da verificare in modo da permettere l'uso di un adeguato strumento di misurazione. Lo strumento fornisce letture di scostamento che la linea in esame presenta rispetto al riferimento di rettilineità. Le letture vengono effettuate, lungo tutta la lunghezza della linea verificata, a intervalli che possono essere distribuiti uniformemente o meno a seconda delle particolarità dell'elemento sotto esame. Le misure ottenute vengono rappresentate come in *Fig. 20* e successivamente viene indicata la linea di riferimento.

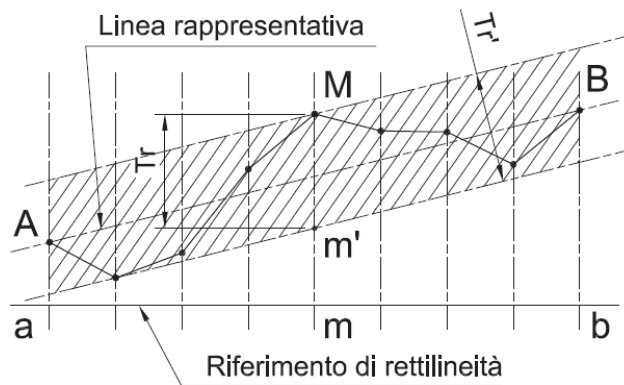


Fig. 20 : Rappresentazione scostamento di rettilineità

Gli scostamenti corretti corrispondono ai valori rappresentati dai segmenti Mm' . Lo scostamento dalla rettilineità (Tr) è definito come la distanza tra due rette parallele alla linea rappresentativa e passanti per i punti di scostamento massimo e minimo. Quando la pendenza della linea rappresentativa è elevata si dovrebbe tenere conto dell'amplificazione verticale, cioè indicare come scostamento dalla rettilineità la misura Tr' (Fig. 20) invece di Tr .

Metodo del filo teso e microscopio

Un filo d'acciaio con diametro calibrato (circa 0.1 mm) è teso in modo da essere approssimativamente parallelo alla linea da verificare.

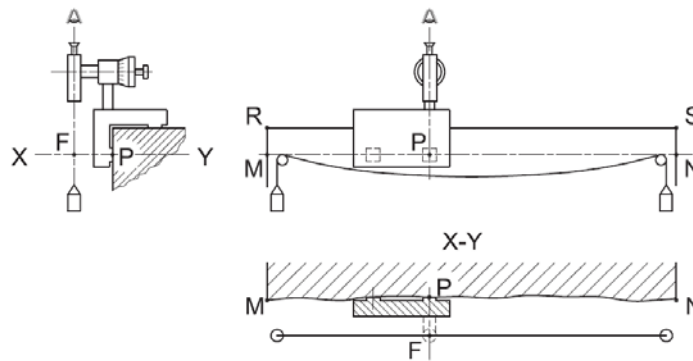


Fig. 21 : Metodo del filo teso e microscopio

Con riferimento alla Fig. 21 si vuole misurare la rettilineità della linea MN in un piano orizzontale. Con l'uso di un microscopio disposto verticalmente e munito di dispositivo di regolazione micrometrica orizzontale, è possibile leggere lo scostamento della linea rispetto al filo teso che rappresenta il riferimento di misura, nel piano orizzontale di misurazione XY .

Il filo teso e la linea da verificare devono essere nello stesso piano (XY) perpendicolare alla superficie considerata (piano $RSNM$). Il supporto del microscopio appoggia, sulla superficie alla quale appartiene la linea da verificare, in due punti di cui un punto P appartiene al piano contenete l'asse ottico del microscopio e perpendicolare alla superficie considerata.

Effettuando le letture di scostamento in più punti fra M ed N si ottengono le misure di scostamento dalla linea rappresentativa.

Questo metodo non è utilizzabile in tutte le misure di rettilineità nelle quali, le letture di scostamento rilevabili con il microscopio siano influenzate dalla deformazione del filo.

Modalità operative industriali

Viene qui descritta una prova tecnica per la verifica di rettilineità nel piano orizzontale di una guida. La prova eseguita nella realtà industriale utilizza la seguente attrezzatura:

- collimatore ottico a sdoppiamento di immagine;
- filo d'acciaio calibrato di diametro 0.1 mm;
- squadra di precisione ad angolo retto porta collimatore;
- carrucole porta filo;
- masse tendi filo;

Le operazioni da effettuare sono nell'ordine:

- pulizia approfondita delle superfici interessate alla misura ed eventuale levigazione di lievi asperità con l'uso di pietra d'india.
- fissaggio delle carrucole in prossimità delle estremità della linea da verificare.
- posizionamento del filo calibrato sulle due carrucole: fissando ad ogni capo del filo un peso che garantisca una sollecitazione nel filo pari ad almeno il 20% del carico di rottura a trazione, vedi Fig. 22.

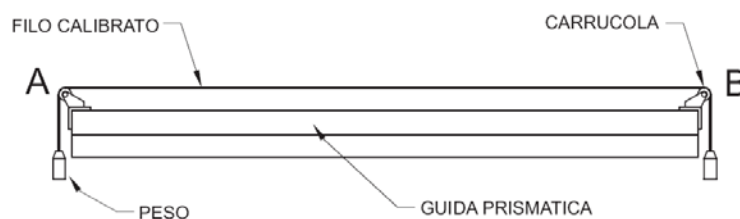


Fig. 22 : Posizionamento del filo calibrato

- posizionamento della squadra di precisione ad angolo retto sulla guida, assicurandosi che la squadra appoggi in maniera corretta su entrambe le superfici X e Y, vedi Fig. 23.

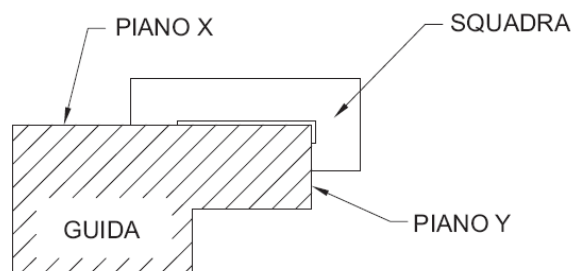


Fig. 23 : Posizionamento della squadra di precisione

- fissaggio del microscopio alla squadra di precisione e posizionamento del complesso microscopio-squadra ad una estremità del filo (ad esempio la posizione A di *Fig. 22*).
- messa a fuoco del filo attraverso il microscopio agendo principalmente sulla posizione della carrucola e per regolazioni più ristrette sulla ghiera graduata fino a che non appare un'immagine del filo che risulta sdoppiata (vedi *Fig. 24*).

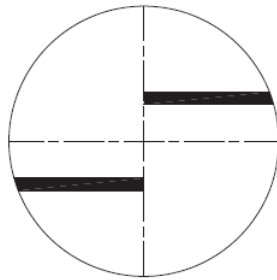


Fig. 24 : Asse ottico e filo non sono allineati

- azzeramento del collimatore nella posizione A: tramite la ghiera graduata si deve ottenere la corrispondenza dei due lembi del tratto di filo (*Fig. 25*), a questo punto si ruota solo l'indice di posizione della ghiera fino ad indicare la posizione di zero sul nonio.

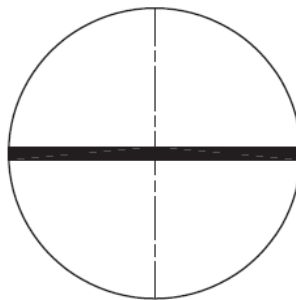


Fig. 25 : Asse ottico e filo sono allineati

- azzeramento del collimatore nella posizione A: tramite la ghiera graduata si deve ottenere la corrispondenza dei due lembi del tratto di filo (*Fig. 25*), a questo punto si ruota solo l'indice di posizione della ghiera fino ad indicare la posizione di zero sul nonio.
- azzeramento della posizione nel punto B: si posiziona il collimatore all'estremo opposto (B) della guida, si controlla che l'immagine appaia come in *Fig. 25*, se il filo non fosse visibile o apparisse sdoppiato, agendo sulla carrucola lo si sposta fino ad ottenere la condizione di allineamento.
- controllo del punto A: si riporta il collimatore nella posizione A e si controlla che il filo appaia ancora come in *Fig. 25*, se così non fosse si ripetono le operazioni descritte nei due punti precedenti fino ad ottenere in entrambe le posizioni A e B l'immagine del filo allineato. Quando in entrambi i punti A e B il filo appare come in *Fig. 25* si è ottenuto il riferimento di rettilineità parallelo, nel piano orizzontale, alla guida sotto controllo.
- verifica di rettilineità: partendo da una estremità si sposta il microscopio lungo la guida in posizioni successive, agendo sulla ghiera graduata si deve ottenere l'allineamento dei due lembi di filo, si riporta il valore relativo allo scostamento dalla rettilineità letto tramite la ghiera graduata.

- Raccolta dati e scostamento rilevato: con i dati raccolti in ogni posizione di misura si disegna il grafico dello scostamento dalla retta di riferimento e si individua il massimo scostamento dalla rettilineità, come rappresentato in Fig. 27.



Fig. 26 : Individuazione del massimo scostamento dalla rettilineità

Metodo dell'interferometria laser

Il raggio emesso dalla testa laser definisce il riferimento rettilineità (Fig. 27). Lo spostamento relativo fra l'interferometro e il riflettore nella direzione x indica uno scostamento della linea da verificare dal riferimento di rettilineità. Questo spostamento modifica la lunghezza del percorso seguito dai due raggi (a,b) vedi Fig. 27.

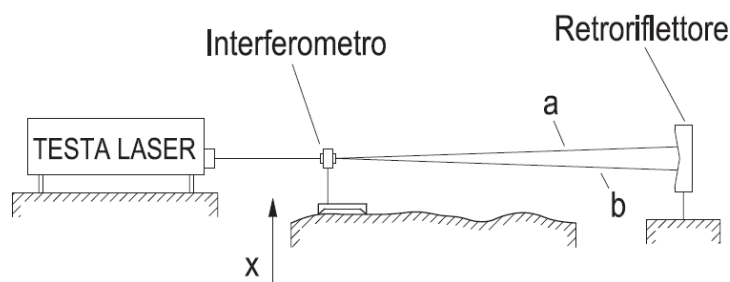


Fig. 27 : Schema di misura della rettilineità con strumentazione interferometrica

La differenza di percorso ottico comporta uno sfasamento fra i due segnali, la differenza di fase viene rilevata e tramutata in differenza di cammino percorso. Tramite relazioni goniometriche la differenza di cammino viene rappresentata come spostamento relativo lungo la direzione X , ovvero lo scostamento di rettilineità della linea da verificare rispetto al riferimento di rettilineità.

5.1.1.2. Metodi basati sulla misurazione di angoli

In questi metodi un elemento mobile è messo in contatto con la linea da verificare, in due punti P e Q tra loro distanti d (Fig. 28).

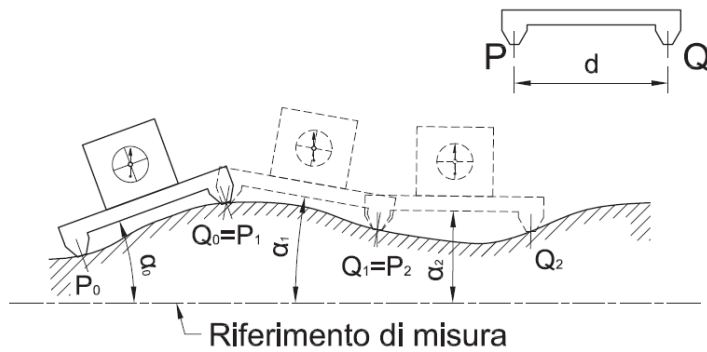


Fig. 28 : Rettilineità attraverso la misurazione di angoli

L'elemento mobile viene spostato in modo tale che in due successive posizioni P_0Q_0 e P_1Q_1 , il punto P_1 coincida con Q_0 . Con uno strumento posizionato in un piano perpendicolare alla superficie alla quale appartiene la linea da verificare, vengono misurati gli angoli α_0, α_1 , etc. dell'elemento mobile in relazione al riferimento di misura.



Fig. 29 : Rappresentazione dello scostamento di rettilineità

Lo scostamento dalla rettilineità viene rappresentato su un grafico del tipo in Fig. 29; sulle ascisse vengono riportati i punti P_i a distanza d , corrispondenti ai punti di appoggio, mentre sulle ordinate vengono rappresentate le elevazioni rispetto al riferimento di misura. L'elevazione *relativa* viene così calcolata:

$$(1) \quad E_{h_{i+1}} = d \cdot \tan \alpha_i$$

La linea rappresentativa e lo scostamento dalla rettilineità sono individuati come descritto precedentemente.

Metodo della livella di precisione

Lo strumento di misurazione è una livella di precisione (a liquido o elettronica) che misura piccole inclinazioni o variazioni di pendenza nel piano verticale. La livella viene posizionata di volta in volta sulla linea da verificare. Il riferimento di misura è l'indicazione di inclinazione rispetto all'orizzontalità dello strumento.

La livella permette di verificare la rettilineità solo nel piano verticale. Se la linea da misurare non è orizzontale, la livella deve essere montata su un blocchetto di supporto con un opportuno angolo di inclinazione, un esempio è riportato in Fig. 30.

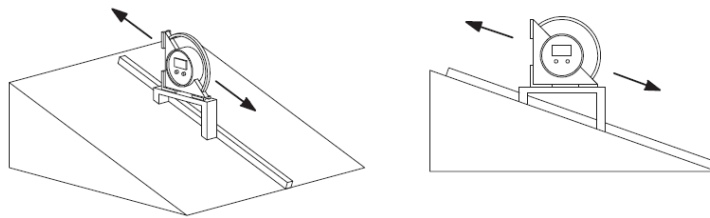


Fig. 30 : Misura della rettilineità verticale su superficie non orizzontale

Modalità operative industriali

Viene descritta la prova tecnica per la verifica di rettilineità di una guida nel piano verticale. La prova eseguita nella realtà industriale utilizza l'attrezzatura riportata di seguito:

- livella elettronica;
- riga di precisione;
- blocchetti rettificati pianparalleli;

Le operazioni da effettuare sono nell'ordine:

- pulizia approfondita delle superfici di contatto: della guida, della riga di precisione e dei blocchetti pianparalleli;
- eventuale levigazione di lievi asperità presenti sulle superfici di contatto con l'uso di pietra d'india;
- taratura della livella elettronica su un piano di riscontro in maniera da fissare lo zero assoluto rispetto all'orizzonte;
- posizionamento ad una estremità della guida della riga di precisione, appoggiandola su due blocchetti pianparalleli;
- posizionamento della livella sulla riga;

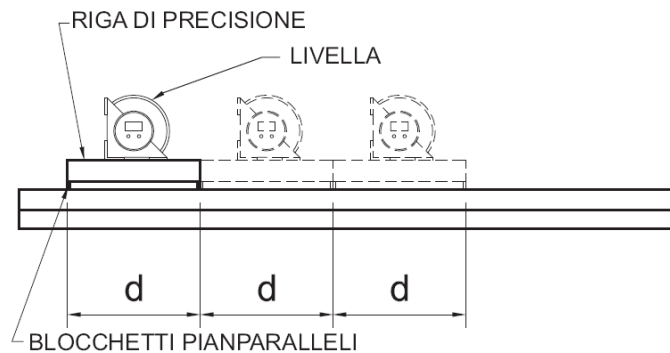


Fig. 31 : Procedura di misura della rettilineità in un piano verticale

- partendo da un estremo della guida si eseguono le letture sul quadrante della livella a passi successivi, pari alla lunghezza d della riga (vedi Fig. 31). La distanza fra i blocchetti deve essere mantenuta costante;

- la livella elettronica indica l'inclinazione del piano su cui appoggia rispetto allo zero fissato dal piano di taratura, per ottenere lo scostamento verticale sul singolo passo (scostamento relativo $e_{rel(i)}$) occorre tener conto della lunghezza d della base di appoggio.

Ad esempio:

1. Lettura sulla livella: $\alpha_i = 0,02 \text{ mm/m}$
2. base d'appoggio: $d = 500 \text{ mm}$

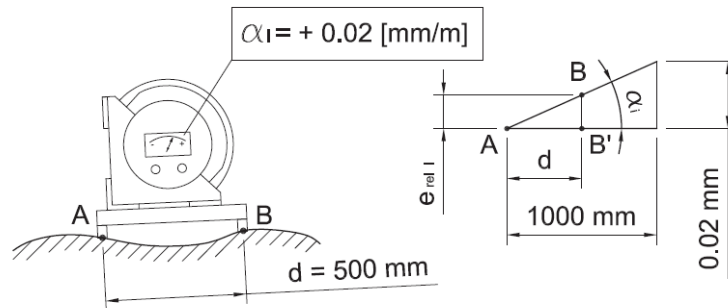


Fig. 32 : Esempio numerico livella

3. Si associa uno scostamento verticale $e_{rel(i)}$ tra il punto A e il punto B:

$$(2) \quad e_{rel(i)} = \alpha_i \cdot d / 1000 = 0,01 \text{ mm}$$

- si riportano su una tabella le letture, associandole alla posizione di lettura e al segno dell'inclinazione;
- si considerano di segno positivo i valori dell'inclinazione indicati dall'asta sulla parte destra del quadrante e negativi quelli sulla parte sinistra;
- si calcola lo scostamento relativo $e_{rel(i)}$ per ogni singolo tratto di guida come riportato nell'esempio precedente;
- sommando gli scostamenti relativi nell'ordine di lettura si ottiene l'andamento dello scostamento assoluto $e_{ass(i)}$ della guida:

$$(3) \quad e_{ass(i+1)} = e_{ass(i)} + e_{rel(i+1)}$$

- si disegna un grafico che riporta in ascisse i valori della posizione di lettura e in ordinate lo scostamento assoluto ad ogni passo, che non è altro che la somma degli scostamenti relativi fino al passo considerato;
- tracciando la linea rappresentativa che collega il punto iniziale con quello finale e le due rette parallele ad essa che passano per i punti di scostamento massimo, positivo e negativo, si individua lo scostamento massimo di rettilineità e_{max} (Fig. 33).

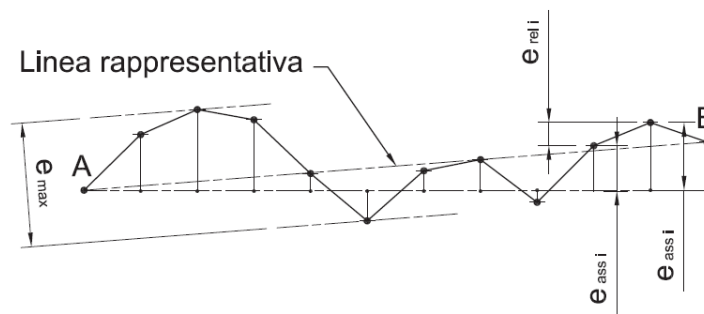


Fig. 33 : Scostamento di rettilineità

Le condizioni di rettilineità di un componente sono le stesse di quelle di riguardanti una linea.

La rettilineità di movimento computa sei tipi di scostamento:

- uno scostamento dal posizionamento nella direzione del moto (viene trattato nella ISO 230-2)
- due scostamenti lineari dalla traiettoria di un punto del componente mobile
- tre scostamenti angolari del componente mobile

In Fig. 34 vengono rappresentati tali movimenti:

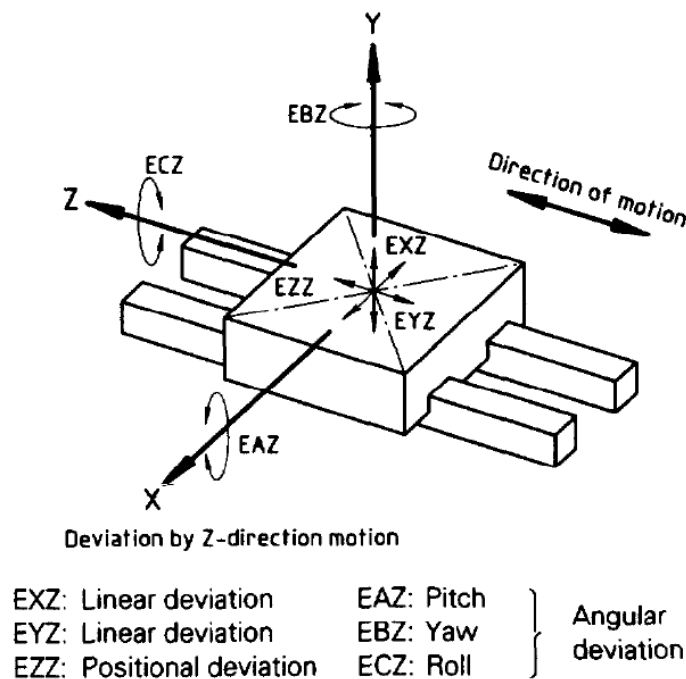


Fig. 34 : Scostamenti di un componente mobile

Uno dei metodi di misurazione di scostamenti lineari più utilizzati è quello della riga di controllo e del comparatore, mentre per quelli angolari si può utilizzare la livella di precisione ed il laser.

5.1.2. Planarità

I metodi di misurazione della planarità di una superficie sono:

- misurazione con piano di riscontro
- misurazione per mezzo di una o più righe di controllo
- misurazione per mezzo di una livella di precisione
- misurazione con metodi ottici (ad esempio laser di misura di rettilineità, squadra ottica a scansione)

5.1.3. Parallelismo, equidistanza e coincidenza

Le misurazioni includono i seguenti elementi:

- parallelismo di linee e di piani
- parallelismo di movimento
- equidistanza
- coassialità, coincidenza o allineamento

5.1.3.1. Parallelismo di linee e di piani

Quando la misurazione del parallelismo coinvolge degli assi, questi devono essere materializzati con superfici cilindriche aventi elevata accuratezza di forma, adeguata finitura superficiale e lunghezza sufficiente. Se la superficie del mandrino non soddisfa tali condizioni viene utilizzata una superficie cilindrica ausiliaria (cilindro di prova).

Nei metodi utilizzati per verificare il parallelismo di due piani si dovrebbero effettuare misurazioni in due direzioni possibilmente perpendicolari. I metodi utilizzati per verificare il parallelismo di due piani sono quello del regolo di guida e comparatore e della livella di precisione.

Nel parallelismo di un asse ad un piano lo strumento di misura viene fissato su un supporto con base piana e spostato lungo il piano del tratto specificato ed il tastatore viene fatto scorrere lungo il cilindro che materializza l'asse (*Fig. 35*)

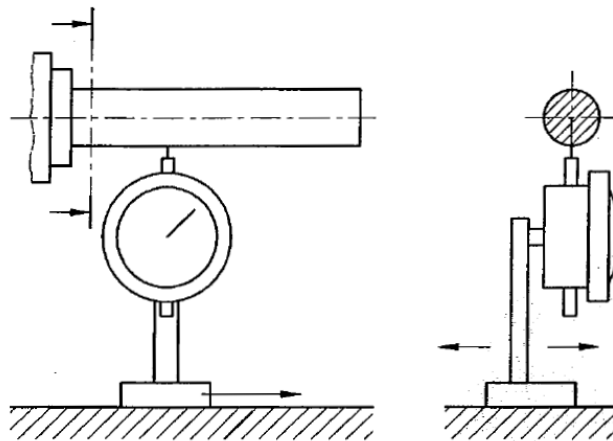


Fig. 35: Parallelismo di un asse ad un piano

Per determinare il valor minimo di lettura in ciascun punto di misura si sposta lo strumento di misura perpendicolarmente all'asse (*Fig. 35*).

5.1.3.2. Parallelismo di movimento

Il parallelismo di movimento riguarda la posizione della traiettoria di un punto funzionale di un componente mobile della macchina rispetto a un piano (supporto o guide), una retta (asse, intersezione tra piani), una traiettoria di un punto di un altro componente mobile della macchina.

Parallelismo tra una traiettoria ed un piano

Si distinguono due casi a seconda che il piano si trova o meno sul componente mobile stesso. Nel primo caso si monta un comparatore su un componente fisso della macchina ed il tastatore appoggia ortogonalmente sulla superficie da verificare. Si sposta quindi il componente del tratto prescritto. Tale metodo di misura viene solitamente utilizzato su fresatrici e rettificatrici. Nel secondo caso lo strumento di misura viene fissato sul componente mobile e spostato insieme con esso del tratto prescritto. Il tastatore viene posto ortogonalmente alla superficie e fatto scorrere lungo questa.

Parallelismo di una traiettoria ad un asse

Lo strumento di misura viene fissato sul componente mobile e spostato con esso del tratto prescritto. Il tastatore viene fatto scorrere sul cilindro di controllo che materializza l'asse (Fig. 36).

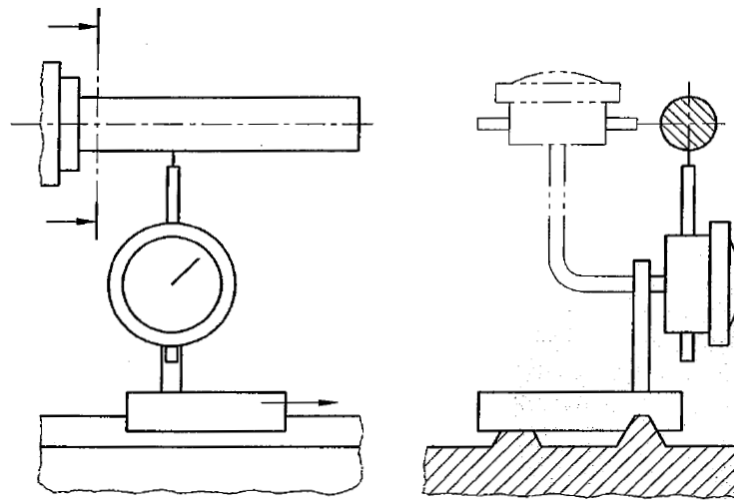


Fig. 36 :Parallelismo di una traiettoria ad un asse

5.1.3.3. Equidistanza

L'equidistanza viene riferita alla distanza alla distanza degli assi rispetto ad un piano di riferimento. Si ha equidistanza quando il piano passante per gli assi è parallelo al piano di riferimento. Il problema è identico a quello del parallelismo tra un piano passante per gli assi ed un piano di riferimento.

5.1.3.4. Coassialità, coincidenza o allineamento

Due linee o due assi sono considerati coassiali o coincidenti o allineati quando, misurando la loro distanza relativa, in diversi punti lungo una data lunghezza, questa non supera un dato valore.

Lo strumento di misura viene fissato su un braccio e fatto ruotare di 360° attorno ad un asse. Il tastatore dello strumento di misura passa in una sezione data, sul cilindro che materializza il secondo asse. L'indicazione dello strumento rappresenta il doppio dello scostamento di coassialità. Poiché la sezione scelta per la misura può intersecare entrambi gli assi, si dovrebbe effettuare la verifica in una seconda sezione.

5.1.4. Perpendicolarità

Le misurazioni riguardano la perpendicolarità di rette e piani e la perpendicolarità di movimento.

5.1.4.1. Perpendicolarità di rette e piani

Si consideri il caso della perpendicolarità di due assi uno dei quali è asse di rotazione. Si fissa un comparatore ad un braccio accoppiato al cilindro di controllo e va a tastare due punti del cilindro di controllo. La variazione dell'indicazione del comparatore viene rapportata alla distanza AB tra i due punti (Fig. 37).

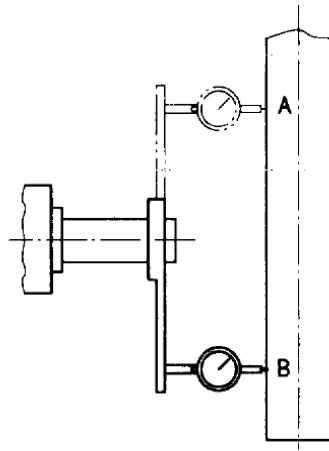


Fig. 37 : Perpendicolarità di un piano con un'asse di rotazione

5.1.4.2. Perpendicolarità di movimento

Con tale termine ci si riferisce alle successive posizioni della traiettoria di un punto di un componente mobile della macchina rispetto a un piano (superficie di supporto o di guida), una retta (asse o intersezione di due piani), alla traiettoria di un punto su un altro componente mobile.

Nella verifica della perpendicolarità della traiettoria di un punto ad un piano, si appoggia sul piano una squadra di controllo (Fig. 38).

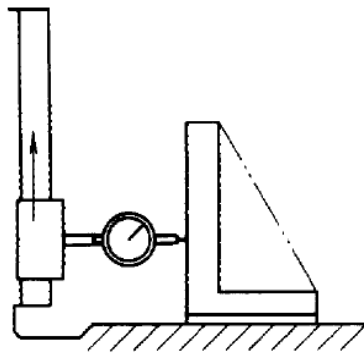


Fig. 38 : Perpendicolarità tra una traiettoria ed un piano

5.1.5. Rotazione

Le misurazioni riguardano i seguenti elementi:

- rotondità in rotazione
- oscillazione assiale

5.1.5.1. Rotondità in rotazione

In generale lo scostamento dalla rotondità in rotazione è la risultante dell'oscillazione radiale dell'asse, dell'ovalizzazione del componente e dei difetti dei cuscinetti. Nella verifiche geometriche delle macchine utensili, l'oscillazione radiale di un asse viene misurata per mezzo dello scostamento dalla rotondità in rotazione di un componente montato sull'asse.

Per eseguire la prova di verifica si porta il tastatore di un comparatore a contatto della superficie di rivoluzione da misurare e le indicazioni del comparatore vengono lette durante una rotazione lenta del mandrino (Fig. 39).

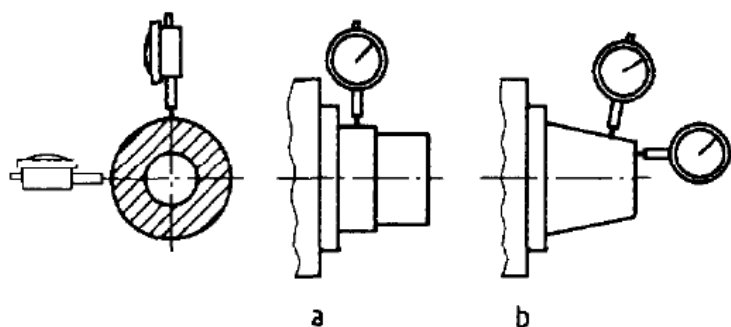


Fig. 39 : Rotondità in rotazione su superficie esterna

Nel caso di superficie conica, il tastatore deve orientarsi perpendicolarmente alla generatrice della superficie conica e deve calcolarsi l'influenza della conicità sui risultati. Poiché un'oscillazione assiale del mandrino fa apparire lo scostamento dalla rotondità maggiore di quello reale, si può usare una superficie conica per la misura dello scostamento dalla rotondità solo se la conicità è piccola.

Se il comparatore non può essere utilizzato direttamente su un foro cilindrico, si fissa un cilindro di controllo nel foro. La parte cilindrica viene utilizzata come indicato più sopra. Poiché l'asse del cilindro di controllo può intersecare l'asse di rotazione, si dovrebbe effettuare la misurazione in due sezioni A e B, poste ad una certa distanza (Fig. 40).

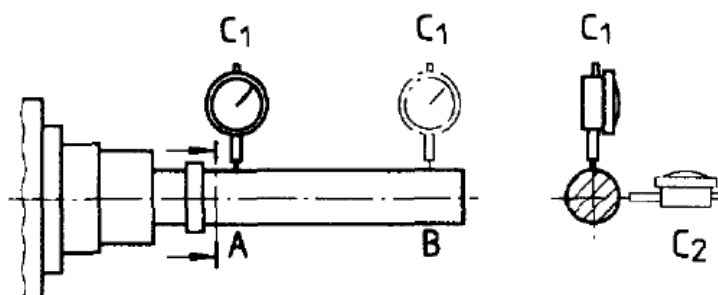


Fig. 40 : Rotondità in rotazione su superficie interna

Al fine di considerare le imprecisioni di innesto del cilindro di controllo nella sede, bisognerebbe ripetere le operazioni viste almeno quattro volte, facendo ruotare ogni volta di 90° il cilindro di controllo rispetto al mandrino e considerando il valore medio degli scostamenti rilevati. Comunque lo scostamento dalla rotondità in rotazione deve essere misurato in piano assiale verticale ed in uno orizzontale (posizioni C_1 e C_2).

5.1.5.2. Oscillazione assiale

E' l'ampiezza di oscillazione lungo l'asse di un organo rotante quando questo viene fatto ruotare eliminando l'influenza del gioco assiale minimo per mezzo di una forza assiale.

Nella verifica dell'oscillazione assiale il tastatore del comparatore dovrebbe essere posizionato al centro della faccia anteriore ed allineato il meglio possibile all'asse di rotazione. Si rilevano le letture mentre il mandrino viene ruotato in modo continuo a bassa velocità.

6. Proposta di un protocollo innovativo di collaudo per macchine utensili speciali

6.1. Il problema delle macchine utensili speciali

Negli ultimi trent'anni si è assistito alla realizzazione sempre più spinta di macchine che chiameremo speciali proprio perché tendono a perdere quella che era la loro connotazione più tipica: la specificità e l'unicità della tipologia di lavorazione possibile. Ad esempio, si sono visti in questi anni torni verticali con strutture dotate di unità di fresatura, di rettifica, di foratura e di maschiatura, e con tavole porta pezzi diventate delle precisissime tavole di posizionamento angolare. Anche nel campo degli accessori, specie nel settore delle macchine di grandi dimensioni, oggi si tende a far diventare l'accessorio medesimo una macchina sempre più complessa e sempre più sofisticata.

Appare, quindi, in modo molto evidente il problema del collaudo di queste tipologie di macchine, le cui strutture si collegano direttamente alle esigenze, sempre più articolate, del mercato e alla fantasia, sempre più stimolata, dei progettisti e, quindi, sono macchine che si sottraggono ad uno schema predefinito di collaudo e che con grande difficoltà e rischi di incomprensione si possono adattare a schemi di collaudo predefiniti.

E' proprio sulla base di queste considerazioni che ci si può chiedere quali siano gli elementi essenziali che oggi, alla luce dello sviluppo delle attuali tecnologie, debbano essere considerati gli elementi costitutivi fondamentali di una qualsivoglia macchina utensile, vale a dire quali siano quegli elementi che presi nella loro struttura fondamentale e debitamente assemblati possano permettere la realizzazione di una qualsiasi configurazione di macchina utensile che sia capace di soddisfare sia il mercato sia le fantasie del progettista.

Che cosa è, nella sua sostanza, una macchina utensile? Si può affermare che una macchina utensile può essere vista come uno spazio fisico in cui si collocano, sostenuti da adeguate strutture ed in posizioni geometricamente definite, assi lineari ed assi rotativi che potranno essere sia assi porta pezzi che assi porta utensili.

Se questo è vero allora una macchina utensile, nella sua accezione più generale, può essere vista come una struttura che porta assi lineari ed assi rotativi posti in posizioni e con giaciture geometricamente definite e capace di eseguire le operazioni di lavorazione cui è destinata.

Una macchina sarà pertanto correttamente definita e descritta quando saranno indicate con adeguato dettaglio e precisione le caratteristiche che definiscono gli elementi precedentemente individuati ed esattamente:

- la struttura
- gli assi lineari
- gli assi rotativi
- gli accessori

Ora lo sforzo che deve essere fatto è quello di andare ad individuare, per ciascuno di questi elementi, quali siano le caratteristiche tecniche necessarie a definirli in modo corretto e completo.

6.2. Assi lineari e rotativi

Ipotizziamo ad esempio, con uno sforzo di pura immaginazione, una macchina speciale che sia costituita da un tradizionale tornio verticale a due montanti dotato di un carro a tornire sulla traversa (asse lineare) ed un carro a tornire sul montante destro (asse lineare), ciascuno di questi carri dotato di barra porta utensili (asse lineare) sull'asse della quale è montato un mandrino di fresatura (asse rotativo). Pensiamo inoltre di posizionare sulla traversa di questa macchina anche un carro a rettificare (dotato di due assi lineari uno orizzontale ed uno verticale), capace di rettificare con mandrino mola adatto a lavorare ad asse orizzontale e ad asse verticale, e, infine, che questa macchina sia dotata di una tavola porta pezzo montata su una slitta mobile su un asse perpendicolare al piano frontale della traversa. Si avrebbe una macchina speciale del tutto particolare e configurata in un modo così lontano dal convenzionale che non è pensabile possa esistere, già normalizzato, un protocollo di collaudo che la qualifichi.

Nelle figure 41 e 42 vengono rappresentati rispettivamente lo schema degli assi lineari e quello degli assi rotativi per l'esempio descritto.

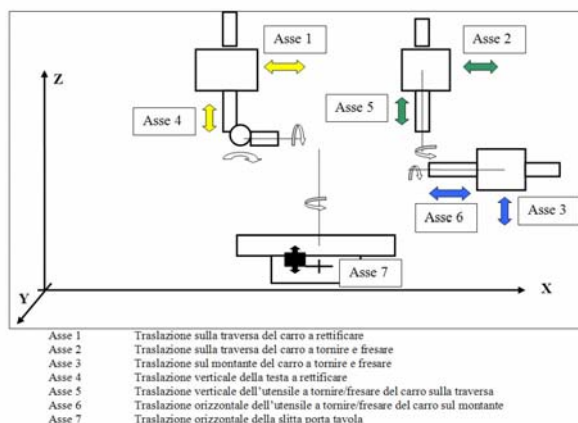


Fig. 41: Schema Assi Lineari

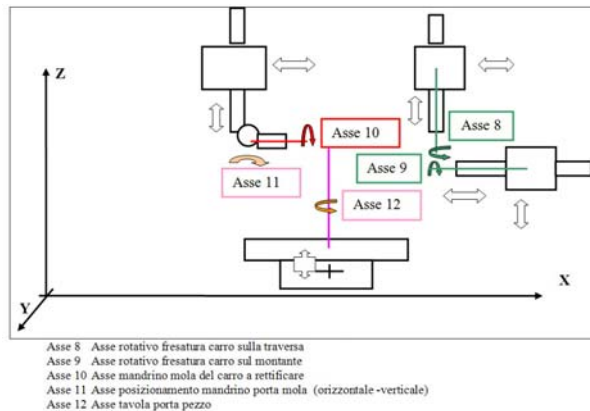


Fig. 42: Schema Assi Rotativi

Per caratterizzare ciascuno degli assi lineari della macchina sarà necessario, prima di tutto, definirne l'orientamento in riferimento ad un sistema cartesiano che definisce lo spazio macchina (X, Y, Z). Rimane poi da definire la rettilineità della traslazione che dovrà essere valutata con due errori in due piani ortogonali contenenti l'asse in esame e con tre errori di rotazione intorno alle direzioni parallele agli assi X, Y, Z errori che vanno normalmente sotto il nome di rollio, beccheggio ed imbardata.

Per quanto attiene gli aspetti puramente geometrici la caratterizzazione degli assi lineari della macchina può, a questo punto, essere considerata completa. Nello spirito del presente lavoro l'asse non deve essere

definito solamente dalle sue caratteristiche geometriche, ma deve essere considerato come un blocco autonomo costituente la macchina. Pertanto l'asse deve essere definito in una serie estesa di caratteristiche che vengono riportate in uno schema caratteristico di ciascun asse lineare costituente la macchina (Tab. 1) e nel quale sono riprese nella prima colonna tutte le verifiche individuate, nella seconda sono individuate le verifiche cui l'asse in oggetto dovrà essere sottoposto, nella terza risultano indicati i valori contrattuali concordati, nella quarta il metodo che verrà adottato per la verifica, nella quinta il risultato della verifica e nella sesta, infine, eventuali annotazioni in margine alla verifica.

Asse Lineare		Asse testa a rettificare				
	Caratteristiche Asse	Verifica	Ammesso	Metodo	Rilevato	Osservazioni
1	Lunghezza utile asse					
2	Gamme velocità					
3	Geometria Asse					
	Orientamento					
	Rettilinearità Traslazione					
	Nel piano 1					
	Nel piano 2					
	Errore beccheggio					
	Errore rollio					
	Errore imbardata					
4	Interpolazioni					
	Nel piano					
	Nello spazio					
5	Rigidità statica					
6	Stabilità termica					
7	Livelli vibrazione					
8	Assorbimenti potenza					
9	Rumorosità					
10	Precisione Posizionamento					
Osservazioni:						
Luogo	Data	Fornitore		Cliente		

Tab. 1 Protocollo di Collaudo di Asse Lineare

Questo schema, che potrà essere modificato e/o completato, applicato a ciascun asse lineare della macchina costituirà il Protocollo di Collaudo completo, relativamente a ciascuno degli assi lineari, della macchina medesima.

Analogamente, per quanto riguarda gli assi rotativi, si cercherà di individuare quelle caratteristiche qualitative che sono fondamentali per la loro corretta e completa valutazione. Una volta individuati tali assi rotativi è possibile definire l'orientamento di questi assi rispetto al sistema di riferimento macchina (X, Y, Z). Il problema è, quindi, quello di definire le caratteristiche geometriche della rotazione di questi assi che dovrà approssimare quanto più possibile una rotazione pura, individuata dagli errori di oscillazione radiale, assiale e ondeggiamento frontale, dopo di che le caratteristiche geometriche dell'asse potranno considerarsi correttamente precisate.

Naturalmente, sarà necessario definire per gli assi rotativi anche altre caratteristiche in modo tale da poter costruire, come già fatto per gli assi lineari, una tabella sintetica come quella riportata in *Tab. 2*.

Asse Rotativo		Asse tavola porta pezzo				
	Caratteristiche Asse	Verifica	Ammesso	Metodo	Rilevato	Osservazioni
1	Gamme velocità					
2	Geometria Asse					
	Orientamento					
	Nel piano 1					
	Nel piano 2					
	Precisione rotazione					
	Oscillazione radiale					
	Oscillazione assiale					
	Ondeggiamento frontale					
3	Interpolazioni					
4	Rigidezza statica					
5	Stabilità termica					
6	Livelli vibrazione					
7	Assorbimenti potenza					
8	Rumorosità					
9	Precisione Posizionamento					
Osservazioni:						
Luogo		Data	Fornitore	Cliente		

Tab. 2 Protocollo di Collaudo di Asse Rotativo

Quindi, il protocollo di collaudo della macchina utensile considerata, per quanto attiene gli assi fondamentali, risulterà costituito da :

1. uno schema che rappresenti gli assi;
2. n. 7 tabelle relative agli assi lineari della macchina;
3. n. 5 tabelle relative agli assi rotativi della macchina.

6.3. La struttura

La struttura della macchina utensile viene qui intesa come quel complesso di elementi meccanici strutturali sui quali o nei quali vengono montati gli assi di cui la macchina è composta. Questi elementi strutturali dovranno essere caratterizzati definendo:

- materiali con i quali sono stati realizzati;
- trattamenti termici subiti dalle strutture;
- caratteristiche chimico fisiche dei materiali utilizzati;
- caratteristiche microstrutturali dei materiali utilizzati;
- caratteristiche limite di difettosità.

Precisate e documentate con chiarezza le caratteristiche più sopra citate, si può affermare che la struttura della macchina è qualitativamente individuata ed adeguatamente definita. E' importante rilevare come questa caratterizzazione è assolutamente indipendente dalle possibili configurazioni che la macchina potrà assumere.

6.4. Gli accessori

Gli accessori costituiscono elementi che caratterizzano sempre più pesantemente le macchine utensili, specie quelle di grandi dimensioni, e che, visti come vere e proprie macchine, possono modificare le prestazioni o meglio le capacità operative della macchina principale. Il parco accessori è così esteso e variabile che non è possibile, in questa sede, farne un esame completo. Risulta sufficiente poter affermare che anche gli accessori possono essere considerati come insiemi di assi e, come tali, possono essere sottoposti a collaudo secondo gli schemi già utilizzati per la macchina principale.

Nel protocollo di collaudo dovrà dunque essere previsto un documento che elencherà le tipologie di accessori di cui la macchina principale è dotata e, per ciascuno di questi, definirà lo schema dei relativi assi (sempre riferiti al volume di lavoro della macchina ed al sistema di riferimento cartesiano adottato) e la serie di tabelle adeguate a caratterizzarli.

6.5. Conclusioni

La proposta emersa su come affrontare il problema del collaudo delle macchine utensili speciali risulta schematizzabile nel tentativo di vedere il collaudo come costituito da attività indipendenti e nasce dal considerare la macchina utensile come sostanzialmente caratterizzata dal suo spazio operativo, dal suo sistema di riferimento, dalla sua struttura, dai suoi assi e dai suoi accessori. Questo approccio rende queste caratteristiche indipendenti dalla configurazione della macchina sottoposta a collaudo e permette, di conseguenza, di applicare il collaudo a qualsiasi configurazione di macchina si stia considerando.

7. Bibliografia

- [1] ISO 230-1:1996 Test Code for Machine Tools - Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-Load or Finishing Conditions-Second Edition.
- [2] ISO 230-2:2006 Test code for machine tools - Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes-Third Edition.

- [3] ISO 230-3:2001 Test Code for Machine Tools - Part 3: Determination of Thermal Effects-First Edition.
- [4] ISO 230-4:2005 Test code for machine tools Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools-Second Edition.
- [5] ISO 230-5:2000 Test Code for Machine Tools - Part 5: Determination of the Noise Emission-First Edition.
- [6] ISO 230-6:2002 Test code for machine tools Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests)-First edition.
- [7] ISO/FDIS 230-7.2 Ed. 1 Test code for machine tools - Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation.
- [8] ISO/CD TR 230-8 Ed. 1 Test code for machine tools - Part 8: Determination of vibration levels.
- [9] ISO TR 230-9:2005 Test code for machine tools Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series ISO 230, basic equations-First Edition.
- [10] Benini Federico, Tesi di laurea “Impiego di strumentazione laser nel collaudo geometrico di macchine utensili di grandi dimensioni in ambienti debolmente controllati”. Università degli studi di Brescia A.A. 2003/04.
- [11] AA.VV. Manuale delle macchine utensili. Tecniche nuove, 2002.
- [12] Gelmi Giacomo, Dispense del corso “Qualità e prestazioni di macchine utensili”, 2006.
- [13] Georg Schlesinger. “Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen“, Berlin, Springer, 1927.
- [14] Montgomery Douglas C. Controllo statistico della qualità. McGraw-Hill, 2000.
- [15] Kakino, Ihara, Shinohara. Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double Ball Bar Method. DR. Johannes Heidenhain GmbH, 1993.