

Il controllo in macchina

Sono sempre più frequenti i casi di macchine rettificatrici su cui sono montati dispositivi di controllo del pezzo eseguito.

Già da molti anni sono di uso comune, sulle rettificatrici tradizionali, specie quelle per lavorazioni in tondo, degli strumenti di controllo *in-process*, che segnalano al CN la dimensione ottenuta sul pezzo ed in pratica guidano la corsa della mola, garantendo sempre il diametro voluto sul pezzo.

Qui però si parlerà di un controllo *post-process*, su macchine destinate a rettificare ingranaggi o pezzi che in un certo senso sono assimilabili ad essi.

Il controllo delle caratteristiche geometriche del pezzo da rettificare, cioè profilo, elica, divisione e spessore del dente, eseguito direttamente in macchina è molto importante e permette di ridurre il tempo ciclo complessivo.

Questo si traduce ovviamente in una notevole riduzione dei costi, che sarà tanto maggiore quanto più costosa è la macchina.

In generale, quando si deve rettificare un ingranaggio o un coltello rasatore, o un rotore per compressore d'aria, si devono in primo luogo impostare i parametri di lavoro, cioè: l'inclinazione della testa portamola in accordo con l'angolo dell'elica, l'interasse tra pezzo e mola, il profilo con le relative correzioni, ecc., cioè si deve fare il set-up della macchina.

Si esegue poi un primo pezzo (o un primo dente) ed a questo punto si dovrebbe smontare il pezzo dalla macchina per portarlo alla sala di misurazione per la verifica di tutte le caratteristiche geometriche della dentatura.

In una officina di produzione, la sala di controllo normalmente dista qualche decina di metri dalla macchina, a volte molto di più. Non sempre poi l'apparecchio di controllo è immediatamente disponibile.

Ne segue una attesa, con macchina ferma che, secondo le varie realtà d'officina, può andare da alcuni minuti a qualche decina di minuti, con una perdita secca di produttività della macchina ed un aumento dei costi.

Per ovviare a questo inconveniente le macchine moderne hanno invece la possibilità di essere dotate di un dispositivo che controlla i parametri fondamentali dell'ingranaggio direttamente in macchina, senza smontare il pezzo, con evidente risparmio di tempo.

Questo, tra l'altro, permette di evitare gli inevitabili errori di posizionamento passando dal bloccaggio sulla macchina al bloccaggio sull'apparecchio di controllo.

Poiché i controlli sono necessari ad ogni set-up della macchina, risulta che questi dispositivi sono particolarmente convenienti quando:

- *si devono lavorare piccole serie, ciò che comporta frequenti set-up;*
- *si devono rettificare pezzi di grandi dimensioni ed ingombranti che richiedono un lungo tempo per lo smontaggio ed il rimontaggio in macchina e sull'apparecchio di controllo di laboratorio;*
- *quando si devono eseguire pezzi che richiedono un'accurata messa a punto come per esempio la rettifica dei master e dei coltelli rasatori.*

E' invece di dubbia convenienza quando la macchina è destinata a lavorare grandi serie, con mole di forma in CBN o con le mole a vite.

La grande diffusione che ha avuto questo sistema di controllo è stata resa possibile grazie all'enorme miglioramento delle precisioni dei movimenti degli assi CN, miglioramenti dovuti sia all'adozione dei motori lineari (per gli assi lineari), sia all'adozione dei motori "direct drive" (per gli assi rotativi) e sia infine

alla grande precisione e velocità di elaborazione dei dati nei moderni CN con tecnologia digitale.

Prima di entrare in dettaglio nella descrizione di questi dispositivi, è necessario accennare all'obiezione più frequente che viene fatta riguardo a questi sistemi e cioè che in definitiva si controlla la precisione dei movimenti degli assi macchina utilizzando gli stessi assi che si vogliono controllare.

Se esiste un errore sistematico in un movimento, questo non verrà messo in evidenza.

Ciò è giusto, ma bisogna considerare che utilizzando la tecnologia digitale, con il controllo dei movimenti a loop chiuso, non è possibile, almeno in teoria, un errore nella movimentazione degli assi e ciò è reso ancora più improbabile con l'utilizzazione dei motori lineari e direct drive che eliminano sia le viti a circolazione di sfere sia i riduttori di velocità, possibili cause di errori nei movimenti dovuti a giochi ed alle usure.

Il controllo si esegue quindi per mettere in evidenza eventuali errori di set-up della macchina o errori derivati da anomalie nella fase di diamantatura dovuti, per esempio, ad errori nell'inserimento dei dati od ad usure eccessive dei rulli diamantati o comunque ad errori vari derivati da eccessivi soprametalli o a forti errori sul pezzo sgrossato che possono generare sforzi e flessioni eccessive.

In definitiva con il controllo in macchina si tratta di escludere eventuali anomalie dovute a tutta una serie di cause che niente hanno a che fare con la precisione dei movimenti degli assi macchina.

E' per questo motivo che l'obiezione di cui sopra perde gran parte del suo valore.

Detto questo bisogna subito mettere in chiaro che esiste una grande differenza tra i sistemi di controllo del profilo in macchina e quello eseguito con gli apparecchi di laboratorio.

Per rendere meglio comprensibile questa differenza è necessario richiamare, per i non addetti ai lavori, alcune nozioni elementari sulle caratteristiche dell'evolvente di cerchio, curva che, come è noto, costituisce il profilo dei denti dell'ingranaggio.

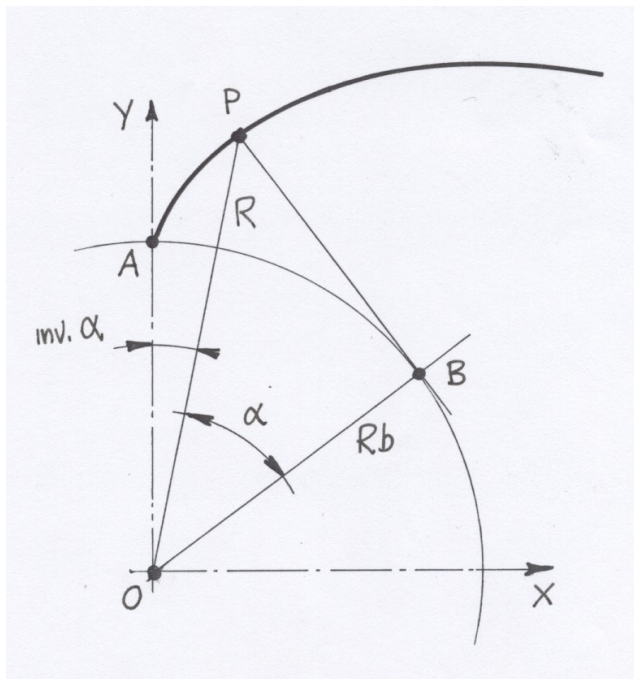


Figura N°1 – Elementi fondamentali dell'evolvente di cerchio

Dalla figura N°1 si ricavano alcune formule fondamentali, tenendo presente che l'evolvente, cioè la curva che passa da A a B è il luogo dei punti descritti dalla estremità del segmento \overline{BP} sempre tangente al cerchio di base di raggio R_b .

Detto α (angolo di pressione), l'angolo $P\hat{O}B$, risulta che:

$$\overline{BP} = R_b \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

e questo segmento è anche uguale alla lunghezza dell'arco di cerchio \widehat{AB} , cioè:

$$R_b \cdot \operatorname{tg} \alpha = (\alpha + \operatorname{inv} \alpha) \cdot R_b \quad \text{da cui} \quad \operatorname{inv} \alpha = \operatorname{tg} \alpha - \alpha$$

La funzione $\operatorname{inv} \alpha$ così definita è di fondamentale importanza nel calcolo degli ingranaggi.

Un'altra relazione importante è:

$$\cos \alpha = \frac{R_b}{R}$$

che definisce l'angolo di pressione in corrispondenza di un raggio qualsiasi R .

Il punto generico dell'evolvente P può essere rappresentato sia in coordinate polari che in coordinate cartesiane essendo nel primo caso il modulo $R = \overline{OP}$, mentre l'argomento è $\operatorname{inv} \alpha$ e nel secondo caso si ha:

$$X_p = R \cdot \operatorname{sen}(\operatorname{inv} \alpha)$$

$$Y_p = R \cdot \operatorname{cos}(\operatorname{inv} \alpha)$$

Il controllo dell'evolvente con un apparecchio di laboratorio, per esempio con un apparecchio Klingelnberg, avviene misurando la distanza $\overline{BP} = R_b \cdot \operatorname{tg} \alpha$ in corrispondenza di ogni valore di α .

Se questa misura corrisponde a quella teorica il profilo va bene, altrimenti viene registrato lo scostamento.

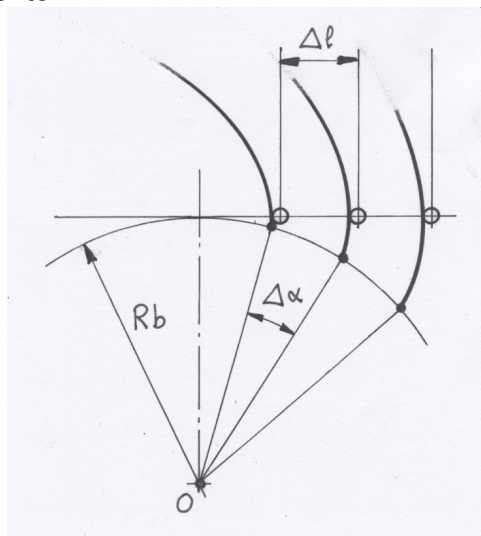


Figura N°2 – Sviluppo dell'evolvente sul cerchio di base

Con riferimento alla figura N°2, ad ogni spostamento $\Delta \alpha$ deve corrispondere una variazione di \overline{BP} pari a $\Delta l = R_b \cdot \Delta \alpha$ ed è appunto questa la legge che lega il movimento rotatorio del pezzo allo spostamento lineare del tastatore.

Bisogna notare che il movimento del tastatore segue una retta che è sempre tangente al cerchio di base.

In pratica si controlla lo sviluppo del profilo sul cerchio di base.

La precisione di misura e la ripetibilità che gli apparecchi di controllo da laboratorio possono garantire sono superiori a quelle che si possono ottenere con i dispositivi di controllo a bordo macchina.

Si diranno più avanti i principali motivi tecnici che giustificano questa differenza, ed è anche comprensibile che sia così; basta considerare che il costo di un apparecchio di controllo di alta qualità, tipo Klingelnberg, è circa 5 – 6 volte superiore al costo di un dispositivo di controllo piazzato in macchina.

Il controllo del profilo di un ingranaggio eseguito in macchina avviene misurando le coordinate polari di un generico punto P.

Con riferimento alla figura N°3 si può osservare che il tastatore si muove radialmente andando a toccare i punti del profilo che si trovano su diametri via via crescenti.

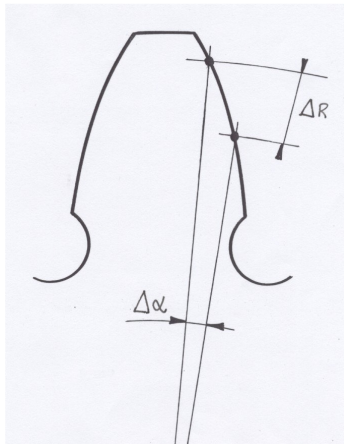


Figura N°3 – Misura dell'evolvente in coordinate polari

Si misurano le variazioni del raggio ΔR in corrispondenza di ogni variazione $\Delta\alpha$, cioè si misurano il modulo e l'argomento delle coordinate polari del profilo. Questa è una notevole limitazione del sistema, che complica il software. Infatti in questo caso il posizionamento della sonda deve essere molto accurato. Tra l'altro bisogna inserire anche lo spessore del dente ed il controllo sarà tanto più accurato quanto più vicino al reale sarà questo dato; ciò è particolarmente importante se si è in presenza di un profilo modificato rispetto al teorico.

Particolarità tecniche

Si è detto che la precisione di misura di un apparecchio di laboratorio è superiore a quella che si può ottenere con un dispositivo a bordo macchina.

Oltre alle differenze di metodo del rilievo esistono altri motivi che non permettono un'altissima affidabilità del controllo in macchina.

In primo luogo il controllo avviene per punti con una sonda che normalmente è del tipo digitale (es. Renishaw).

Se facciamo riferimento ai controlli applicati sulle macchine di produzione Samputensili SpA, il numero di punti tastati può essere scelto da 1 a 100 ed in genere si scelgono da 20 a 40 punti per non rendere inutilmente lungo il controllo. Il numero di punti viene scelto in base al tipo di ingranaggio ed in particolare alla lunghezza del profilo.

La sonda, per le sue caratteristiche costruttive e di funzionamento, richiede che dopo ogni rilievo di un punto, si stacchi dal pezzo quindi questa è una misura di tipo discontinuo.

Un apparecchio di controllo da laboratorio invece usa una sonda analogica che si muove in modo continuo sul profilo da controllare.

L'intervallo del rilievo quindi può essere molto breve ed i punti tastati sono all'incirca 500 senza per questo allungare i tempi di acquisizione dei dati.

Per un'analisi del profilo, 20 o 40 punti sono più che sufficienti perché l'intervallo tra un punto all'altro è dell'ordine di qualche frazione di millimetro ma, per esempio, con questo sistema non possono essere messe in evidenza delle piccole irregolarità della superficie, come rigature, strappature, piccoli avvallamenti dovuti a vibrazioni ecc.

Anche se la ripetibilità della misura è ad un buon livello, circa 2 micrometri, l'errore assoluto risulterà maggiore.

I dispositivi di controllo a bordo macchina sono sensibili inoltre alla variazione di temperatura.

Le dilatazioni termiche spostano la sonda dalla sua posizione teorica producendo un errore di misura.

E' noto che le rettifiche di vario genere, pur sviluppando una notevole quantità di calore, non lavorano in ambienti a temperatura controllata, mentre gli apparecchi di controllo da laboratorio si.

La struttura di un apparecchio tipo Klingelnberg è studiata e realizzata per ridurre tutte le cause di errore: flessioni, distorsioni, ecc., gli assi sono dedicati solamente a queste misure e la meccanica è, ovviamente, più accurata. Inoltre le masse da spostare con gli assi CN sono minori con una maggior affidabilità nella risposta.

I due sistemi di controllo hanno inoltre diversi algoritmi di calcolo e di interpolazione.

A questo proposito bisogna mettere in evidenza che controllando le coordinate polari (con il dispositivo di controllo in macchina), la sfera della sonda tocca il profilo in posizioni sempre diverse, come illustrato in figura N°4.

Ciò significa che è necessario conoscere il diametro della sfera della sonda ed inserire nel software un opportuno programma per compensare la differenza dovuta alla variazione del punto di contatto.

Il problema però non è ancora completamente risolto in quanto si sempre una diversa direzione della forza che agisce sul tastatore. Ciò può provocare piccolissime differenze sulla flessione dello stelo della sonda con ripercussioni, sia pur piccole, sulla precisione della misura.

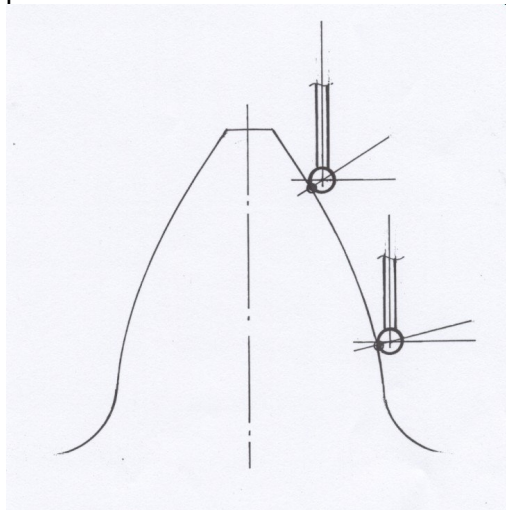


Figura N°4 – Nel controllo in macchina il contatto tra sfera e dente avviene su posizioni diverse

Nell'altro tipo di controllo invece la sfera della sonda tocca il profilo sempre nella stessa posizione in quanto l'asse dello stelo della sonda ha sempre una direzione tangente al profilo nel punto di contatto, come si può vedere nella figura N°2 e quindi non ci sono ne complicazioni di software ne differenze della forza che agisce sulla sonda.

Bisogna sempre tener presente che stiamo parlando di variazioni di micrometri o perfino di frazioni di micrometri.

Tutto ciò però non compromette l'importanza e l'utilità del controllo in macchina. Non bisogna dimenticare che lo scopo principale di questo dispositivo è quello di verificare che il profilo, l'elica e la divisione siano quelle volute e che si possa perciò procedere nella lavorazione, e che le tolleranze ammesse sui pezzi sono, nella stragrande maggioranza dei casi, molto maggiori della precisione garantita da questi dispositivi. Resta comunque inteso che il controllo in macchina non può sostituire il controllo nella sala di misura.

Il pezzo dovrà quindi sempre, per maggior sicurezza, essere ricontrollato, ma intanto si può continuare a lavorare, guadagnando in produttività, con ragionevole certezza che i pezzi non saranno di scarto.

Descrizione di alcune applicazioni

Rettifica per ingranaggi Samputensili mod. S375G e mod. S400GT

In queste due macchine è montato, come optional, il sistema di controllo che sostanzialmente è costituito da una sonda Renishaw, generalmente rimovibile, dal relativo software di controllo ed eventualmente da una stampante.

Tutti i movimenti relativi tra la sonda ed il pezzo sono dati dagli assi macchina e più precisamente dall'asse rotativo C (rotazione del pezzo), dall'asse Z di traslazione assiale del pezzo e dall'asse X di avvicinamento radiale.

La sonda prima di iniziare il ciclo di controllo, va a tastare una piastrina di azzeramento.

Il controllo del pezzo finito, dopo il set-up della macchina o alla riprese di un nuovo turno di lavoro, è importante, come si è detto, per verificare la qualità del pezzo ottenuto e quindi per dare il via alla produzione.

Naturalmente Tutti i rilievi possono essere immediatamente resi disponibili su monitor del CN, con la possibilità di stamparli sotto forma di diagrammi analogamente ad un apparecchio di laboratorio.

Con questo dispositivo però è anche possibile controllare il pezzo prima della rettifica per verificare il soprametallo e le eventuali distorsioni dovute al trattamento termico in modo da poter ottimizzare sia il posizionamento della mola nel vano del dente, sia variare automaticamente, se è il caso, le condizioni di lavoro (avanzamento e numero di passate).

Esiste anche la possibilità di montare il dispositivo di controllo per controllare gli ingranaggi interni. Nelle figure N°5 e N°6 sono illustrate rispettivamente le applicazioni per il controllo di ingranaggi esterni e ingranaggi interni.

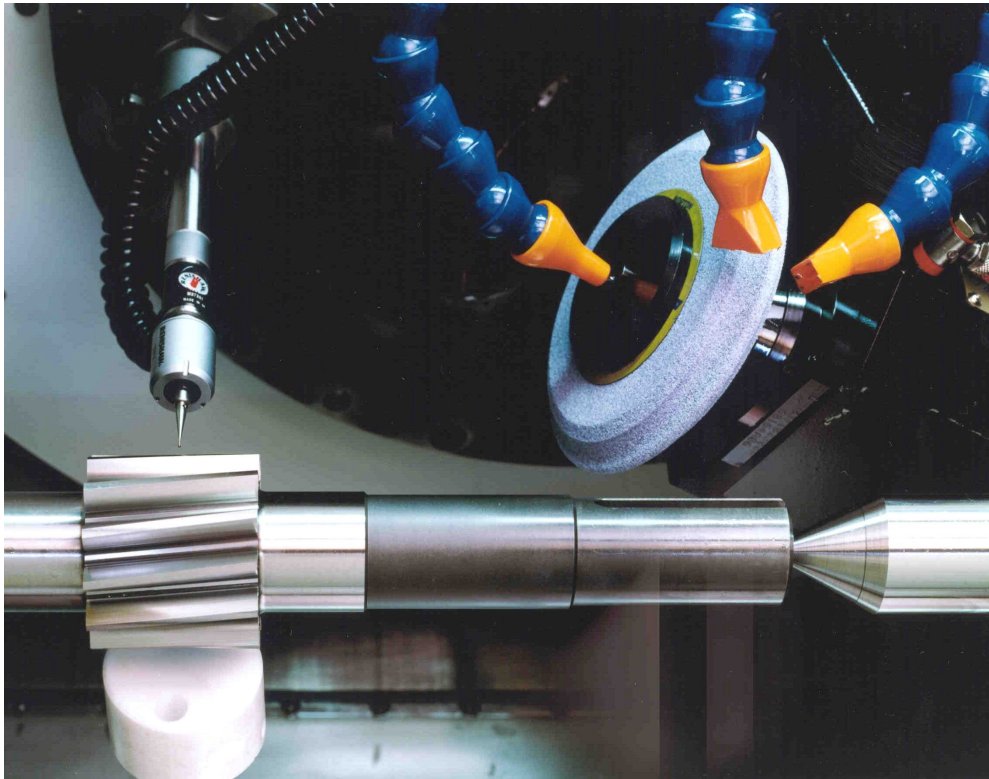


Figura N° 5 – *Dispositivo di controllo montato su rettifica per ingranaggi mod. S375G*

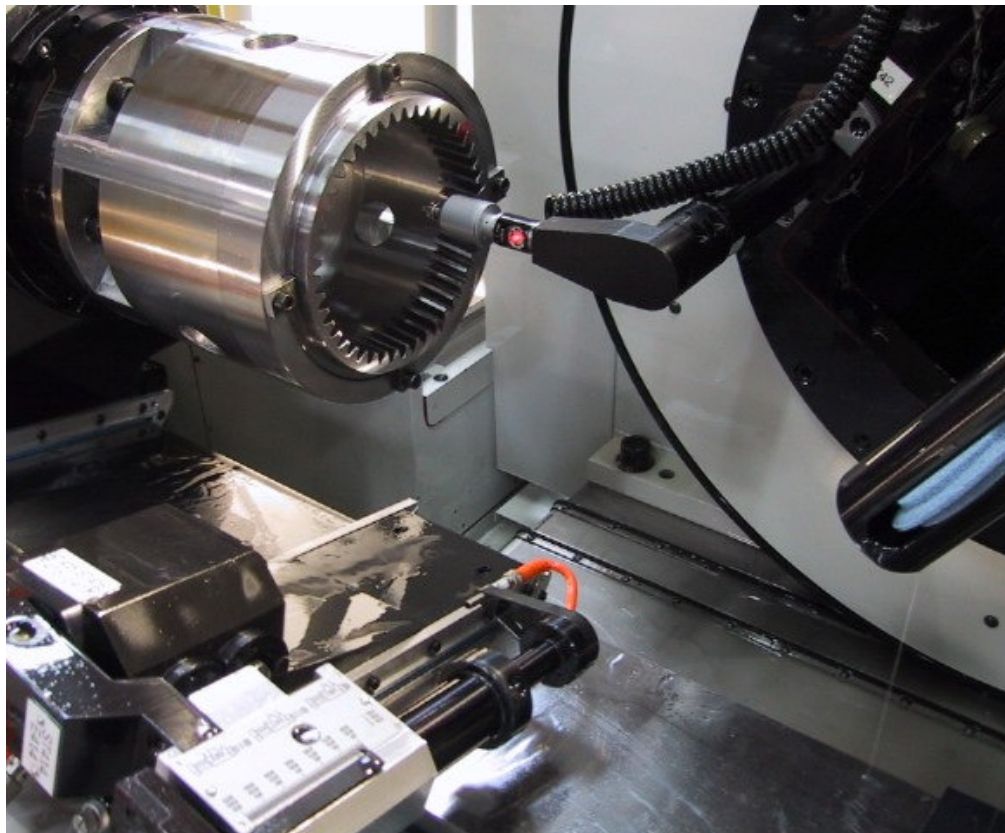


Figura N°6 – *Macchina mod.S375G attrezzata con il controllo per ingranaggi interni*

Affilatrice per rasatori Samputensili mod. S400GS

L'applicazione del sistema di controllo su questo tipo di macchina è risultato molto vantaggioso dal punto di vista del risparmio dei tempi totali di affilatura.

In questo caso normalmente si affila un coltello diverso per ogni montaggio, cioè ci sono frequentissimi set-up.

In genere poi tutti i coltelli hanno profili ed eliche modificati rispetto il teorico.

Il gruppo di controllo su questa macchina è molto più complesso se paragonato a quello montato sulle precedenti macchine ed è fisso, cioè parte integrante della macchina, pur essendo un optional.

Anche il software è molto più sofisticato perché deve tener conto, come vedremo, delle peculiari caratteristiche del pezzo da controllare.

Nella macchina S400GS il gruppo di controllo è montato sulla parte superiore della macchina in prossimità della slitta di traslazione lineare del pezzo.

La sonda Renishaw viene portata in contatto del dente attraverso la traslazione di questa slitta ed il controllo del profilo è eseguito interpolando il movimento lineare con il movimento rotatorio del coltello.

In questo tipo di macchina però non è possibile ispezionare il dente lungo l'elica usando gli assi macchina.

Alcuni costruttori hanno rinunciato al controllo dell'elica, ma la Samputensili ha dotato il gruppo di controllo di un asse CN autonomo che permette la misura dell'elica, che è uno dei parametri fondamentali del coltello perché, nella quasi totalità dei casi, non è teorica ma presenta correzioni di vario tipo.

Il braccio portasonda è mobile e, durante il ciclo di affilatura, porta la sonda in un apposito alloggiamento, protetta dalla polvere e da eventuali urti accidentali.

Prima del ciclo di controllo si ha la verifica automatica dell'azzeramento della sonda su un apposito riferimento fisso.



Figura N° 7 – Sonda montata su affilatrice mod. S400GS

La misura, come si è detto, avviene per punti ed il controllo dell'elica presenta il problema che bisogna evitare i vani della dentinatura, portando la sfera della sonda sempre al centro di un dentino.

Questo non è un problema semplice perché bisogna fare in modo che il movimento della sonda, che è automatico, tenga conto del tipo e delle dimensioni della dentinatura.

La dentinatura può essere del tipo a plongée, cioè sfalsata da dente a dente e può avere il passo di varie misure con il pieno di dimensione diversa dal vuoto.

In sostanza bisogna inserire nel CN tutti i dati della dentinatura: tipo, valore dello sfalsamento, passo, dimensione del pieno e del vuoto.

Si capisce ora quanto sia importante l'asse aggiuntivo che permette alla sonda di scorrere lungo l'elica; in questo modo, tra l'altro, è anche possibile, se si vuole, eseguire il controllo del profilo su più sezioni per verificare l'esattezza del "twist", cioè della speciale correzione talvolta presente nei coltelli di tipo plongée.

Su questo tipo di coltelli è inoltre possibile controllare la divisione, avendo la possibilità di portare la sonda sempre al centro del dentino pieno, anche con la dentinatura sfalsata, caratteristica di questo tipo di rasatori.

I diagrammi ottenuti sono di elevata precisione e possono essere paragonati a quelli ottenuti con un apparecchio di laboratorio.

Nella figura N°8 è illustrato un esempio di controllo di profilo ed elica con il paragone di prima e dopo l'affilatura ed il confronto con il rilievo eseguito in sala misurazione.

Si vede che c'è un sostanziale accordo tra le due misure.

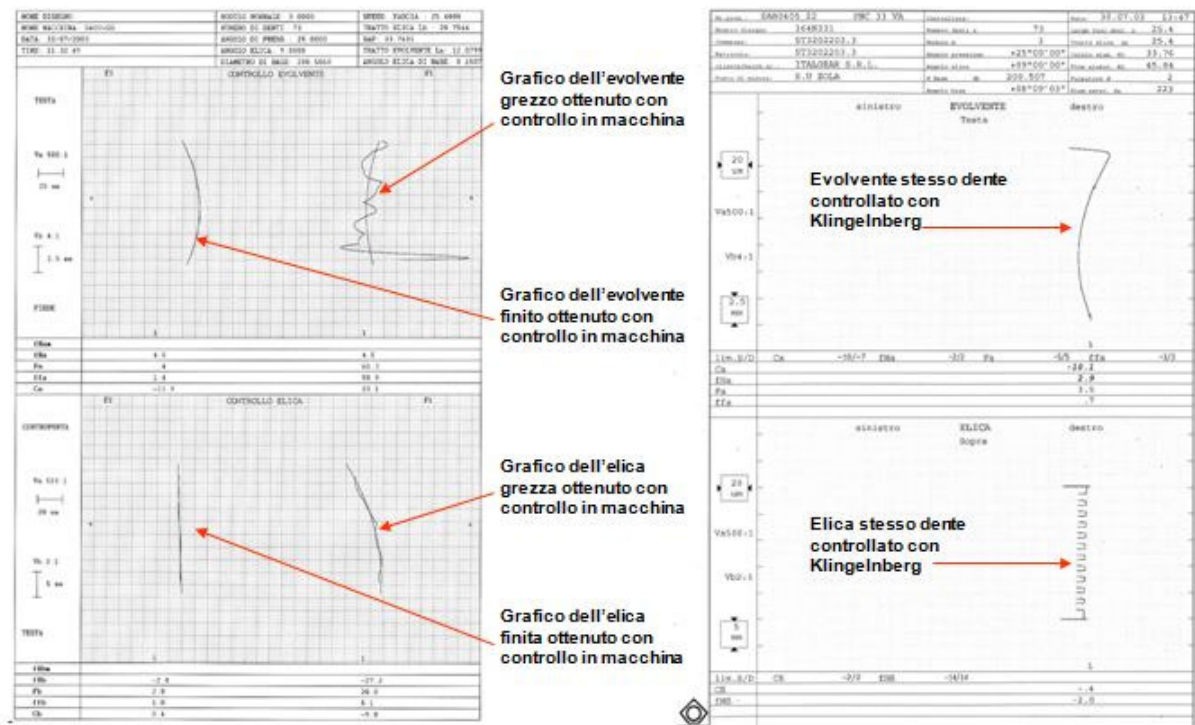


Figura N°8 – Confronto dei grafici ottenuti con i due sistemi

Rettifica di rotori sulla macchina Samputensili mod. S375G

Si è detto che questo sistema di controllo è adatto a controllare anche pezzi diversi dagli ingranaggi.

Un'applicazione interessante è, per esempio, costituito dal controllo di profilo, elica e divisione dei rotori per compressori d'aria.

Dal punto di vista dell'hardware il dispositivo è praticamente uguale a quello montato sulle rettifiche per ingranaggi, salvo l'impiego di sonde con gambo più lungo, se necessario, per controllare pezzi con altezza dente notevole. La differenza sostanziale sta nel software che in questo caso deve prevedere la memorizzazione del profilo per punti, in coordinate cartesiane, ed il confronto di questi dati con il rilievo, punto per punto, eseguito dalla sonda.



Figura N°9 – *Controllo del profilo di un rotore su macchina mod.S375G*

Quando per la rettifica si usano mole in ceramica, è possibile anche una correzione automatica del profilo in caso che questo risultasse fuori tolleranza. I dati raccolti dalla sonda e confrontati con il profilo teorico vengono utilizzati in questo modo per la gestione del diamantatore che provvede alle necessarie modifiche delle traiettorie dei dischi diamantati.