

Finitura degli ingranaggi con levigatura interna

Tra i vari metodi per finire gli ingranaggi, la levigatura con la mola che ha la forma di un ingranaggio interni, cioè l'honing interno, è quello che ora molti costruttori di macchine utensili offrono questa soluzione.

Il questo articolo si espone in forma sintetica uno studio eseguito dalla Seiwa (Giappone), che ha individuato i motivi dello scostamento dai profili teorici generati sul pezzo dopo poche rinvivatore dell'utensile abrasivo e di proporre il rimedio a questo fenomeno.

L'operazione di levigatura con un utensile abrasivo che ha la forma di un ingranaggio interno è detta *honing interno* per distinguerla dall'analoga operazione fatta con un utensile abrasivo che ha la forma di un ingranaggio cilindrico normale che è detta *honing esterno*.

L'ingranaggio da finire, già temprato, viene fatto ingranare con l'utensile con un posizionamento ad assi non paralleli.

La differenza tra l'angolo dell'elica dell'utensile e l'angolo dell'elica dell'ingranaggio è detta angolo di incrocio, così come avviene in una normale operazione di rasatura.

Con questo sistema si genera uno strisciamento tra le superfici dei denti dell'utensile e dell'ingranaggio rendendo possibile così l'asportazione del materiale.

Fino a pochi anni fa, in tutte le macchine, l'ingranaggio girava folle sul suo asse ed era trascinato in rotazione dall'ingranaggio interno costituente l'utensile abrasivo.

Ciò non permetteva una correzione completa degli errori di divisione ed anche l'asportazione del soprametallo risultava piuttosto limitata; in pratica si eseguiva, ed ancor oggi molti costruttori di ingranaggi la eseguono, solo una levigatura della superficie precedentemente finita con un'operazione di rasatura convenzionale.

Oggi le cose sono cambiate, perché con l'introduzione di Controlli Numerici di alta capacità e velocità, che lavorano con la tecnologia digitale, è possibile interpolare i movimenti di rotazione dell'utensile e del pezzo in modo che è possibile gestire, in un certo senso, l'asportazione del materiale.

Le asportazioni di materiale sono, in questi casi, maggiori, gli errori vengono corretti in un modo più completo, i tempi di lavoro risultano minori, specie se si usano mole in CBN.

Si parla in questi casi di Honing di potenza, per indicare e maggiori quantità di soprametallo asportate nell'unità di tempo.

L'impiego di mole al CBN, o comunque di mole che permettono forti asportazioni, ha come conseguenza un peggioramento della qualità della superficie.

Per ovviare a ciò, si usa, in uno stesso ciclo, una coppia di mole, di cui una è adibita alla sgrossatura, con grana grossolana, e la seconda con la funzione di finitura, con grana più fine.

Questa evoluzione ha però portato inevitabilmente ad una maggiorazione dei costi sia della macchina sia dell'operazione nel suo complesso.

La rinvivatura della mola viene eseguita da un rullo diamantato che ha le stesse dimensioni dell'ingranaggio da lavorare.

Naturalmente la precisione di questo master diamantato deve essere la più alta possibile in quanto ogni suo errore, di profilo, di elica o di divisione, viene ribaltato sulla mola e quindi sul pezzo.

La figura N°1 indica l'utensile abrasivo con la sua caratteristica forma di ingranaggio interno e l'ingranaggio da finire in posizione di lavoro.

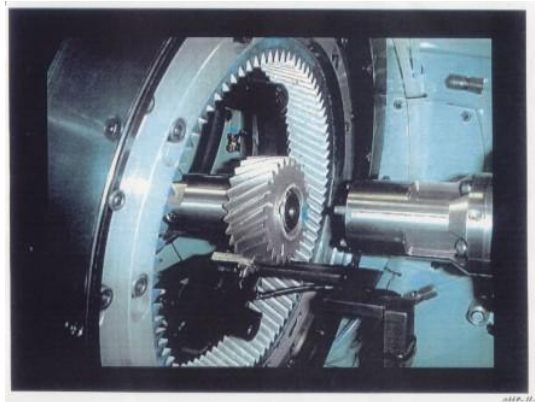


Figura N° 1

La figura N°2 mostra in dettaglio dell'ingranamento tra utensile e pezzo.



Figura N°2

Quando la qualità della superficie del dente lavorato diventa brutta, cioè quando cominciano notarsi troppe tracce di lavorazione, quando la precisione degli ingranaggi prodotti non è più costante, vuol dire che è giunta l'ora di diamantare l'utensile, cioè di ripristinare le sue iniziali caratteristiche taglienti.

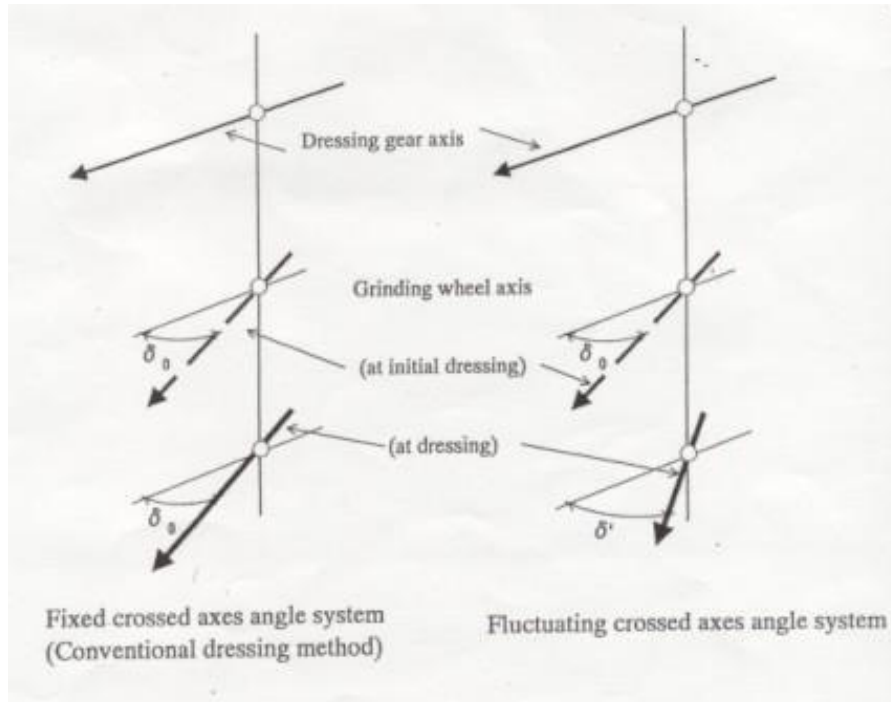
Ci sono sostanzialmente due metodi di diamantatura: il primo si può dire che è il metodo di diamantatura convenzionale, con il quale si mantiene sulla mola lo stesso angolo di elica iniziale. Esso è detto *sistema con angolo di incrocio fisso*.

L'altro metodo prevede la modifica dell'angolo dell'elica della mola ad ogni diamantatura e quindi può essere detto *sistema con angolo di incrocio variabile*.

Se si mantiene costante l'angolo di elica dell'utensile e quindi l'angolo di incrocio durante la lavorazione, si può diamantare la mola per circa 2 – 3 mm (riduzione dell'interasse) in dipendenza del tipo di ingranaggi lavorato.

Dopo questo limite gli errori che si generano sul pezzo sono troppo elevati e l'utensile-mola dovrebbe essere sostituito con un notevole aggravio del costo dell'operazione.

Nella figura N°3 è indicata schematicamente la differenza di posizionamento degli assi tra il rullo diamantato e l'utensile abrasivo che deve subire la diamantatura, nella fase di utensile nuovo e nelle successive diamantature.



Dressing gear axis = Asse del rullo diamantato
Grinding wheel axis = Asse dell'utensile
At initial dressing = Con utensile nuovo
At dressing = Nelle successive diamantature
Fixed crossed axes angle system = Sistema con angolo di incrocio fisso (Conventional dressing method)
Fluctuating crossed axes angle system = Sistema con angolo di incrocio variabile

Figura N°3

I diagrammi riportati nella figura N°4 fanno vedere, in un esempio in cui si diamanta con angolo di elica fisso, come si modifica il profilo sul pezzo a mano a mano che, a causa delle successive diamantature, l'interasse tra utensile e pezzo aumenta.

Nella Figura N°4a i profili su tre sezioni del dente (al centro, 6 mm a destra e 6 mm a sinistra), sono sufficientemente simili e comunque rientrano nelle tolleranze richieste. In questo caso il pezzo è eseguito con utensile nuovo.

Nelle figure N°4b e N°4c si vede che a mano a mano che, per effetto delle successive diamantature, l'interasse tra pezzo e utensile cresce, i profili nelle tre sezioni del dente sono sempre più differenti tra loro, tanto che alla fine è impossibile tollerare i pezzi eseguiti e l'utensile deve essere scartato anche se la sua utilizzazione è scarsa. Nell'esempio che si è preso in esame le dimensioni del pezzo e dell'utensile sono quelle riportate nella tabella e si vede subito che l'angolo di incrocio adottato è di 10°.

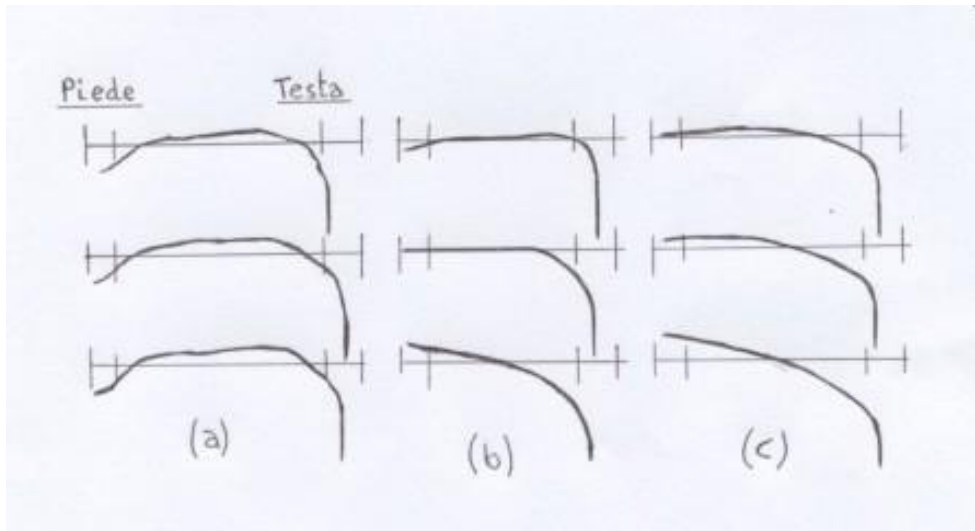


Figura N° 4 - Variazione tipica del profilo mantenendo costante l'angolo di incrocio
 a)- Con utensile nuovo
 b)- Con utensile diamantato (interasse +1,1 mm)
 c)- Con utensile diamantato (interasse +2,3 mm)

Caratteristiche dell'ingranaggio e dell'utensile

| | | |
|--------------------------|----------------------------|-----|
| <i>Ingranaggio</i> | <i>N° di denti</i> | 60 |
| | <i>Modulo normale</i> | 3 |
| | <i>Angolo di elica</i> | 30° |
| | <i>Angolo di pressione</i> | 20° |
| <i>Utensile abrasivo</i> | <i>Numero di denti</i> | 100 |
| | <i>Angolo di elica</i> | 20° |

In questo esempio l'andamento delle linee di contatto tra pezzo ed utensile sono indicate nella figura N°5.

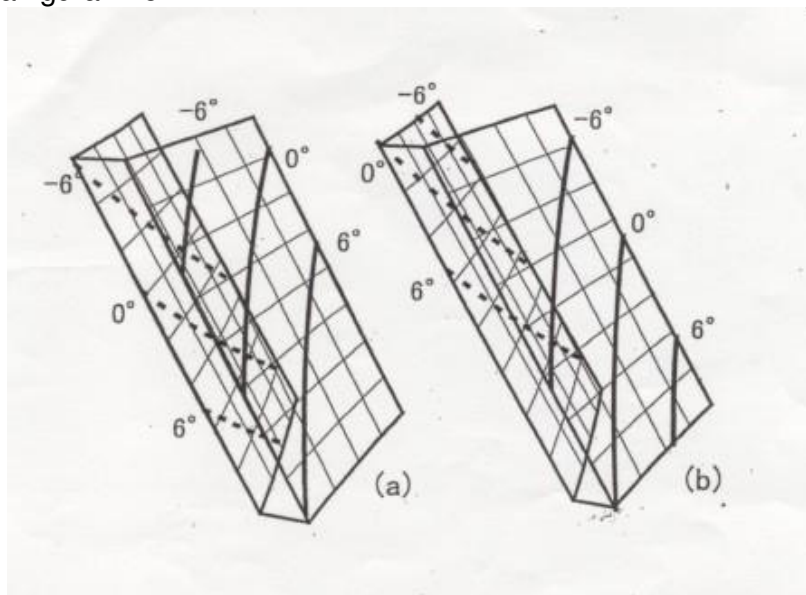


Figura N°5 – Linee di contatto tra utensile ed ingranaggio
 a)- con utensile nuovo
 b)- con utensile diamantato ed interasse +2,3 mm

In particolare nella figura N°5° si vedono le linee di contatto su un fianco (a tratto continuo) e sull'altro (tratteggiata), nella situazione iniziale, cioè con utensile nuovo.

La figura N°5b invece fa vedere come si spostano le linee di contatto sui due fianchi quando l'interasse cambia di 2 mm e l'angolo di incrocio resta costante.

Anche qui con il tratto continuo si indicano le linee di contatto sul fianco destro del dente mentre con le tratteggiate si indicano le linee di contatto sul fianco sinistro del dente.

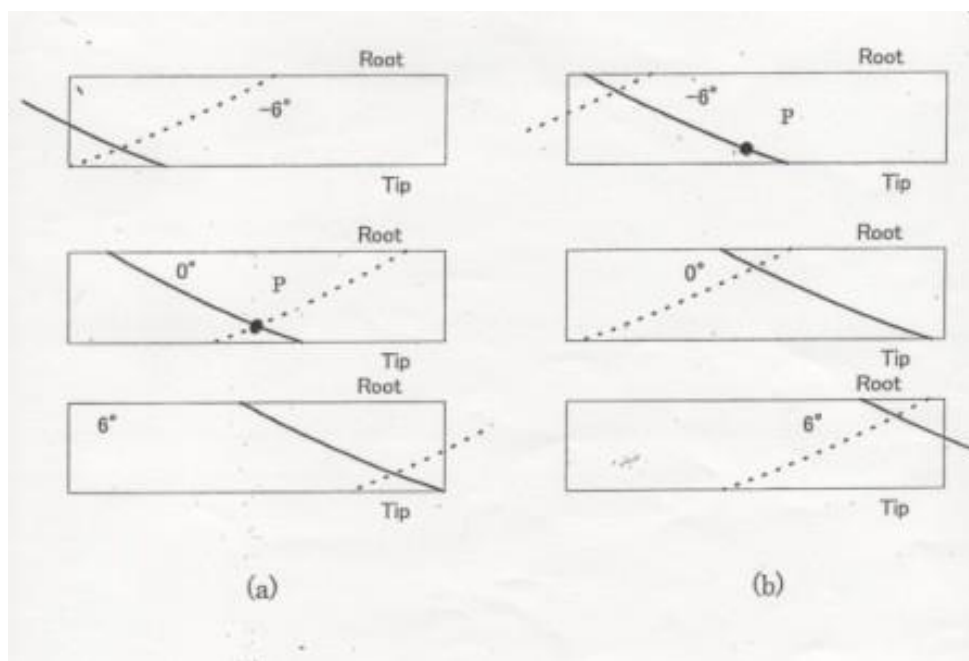
Si può osservare che le linee di contatto sul fianco destro si sono spostate verso il basso, mentre quelle relative al fianco sinistro si sono spostate verso l'alto.

Questo fenomeno si accentua evidentemente ad ogni successiva diamantatura che fa aumentare progressivamente l'interasse tra utensile e pezzo.

Le condizioni di ingranamento tra pezzo ed utensile variano ad ogni diamantatura, perché varia il diametro primitivo di funzionamento. Se asporto del materiale sul fianco del dente dell'utensile, la porzione di evolvente che sarà interessata al contatto sarà spostata verso un diametro maggiore, quindi il diametro di rotolamento, cioè il diametro primitivo di rotolamento sarà maggiore sull'utensile, dove l'angolo di elica sarà minore.

Nella figura N°6a si può osservare che in corrispondenza di un punto di contatto sul fianco destro corrisponde sull'altro fianco un altro punto di contatto. In questo modo la forza che agisce sul punto P è compensata dalla forza in direzione opposta che agisce sull'altro fianco. Ciò succede nella condizione di utensile nuovo.

Nella figura N°6b invece si può osservare che ci sono dei punti di contatto sul fianco destro che non hanno una reazione sull'altro fianco.



Root = al piede del dente

Tip = alla testa del dente

Figura N°6

Normalmente le mole usate sono quelle a legante resinoide le quali hanno un Modulo di Young da 10 a 20 volte inferiore a quello dell'acciaio e quindi non resistono molto bene alle sollecitazioni a flessione.

Si può capire bene quindi che nel caso in cui le forze non sono ben equilibrate si abbia una flessione del dente della mola con un conseguente errore sul dente del pezzo. Questo fenomeno di flessione evidentemente si verifica verso la testa del dente dell'utensile, mentre alla sua base la flessione è praticamente inesistente e quindi questa zona del dente asporterà di più.

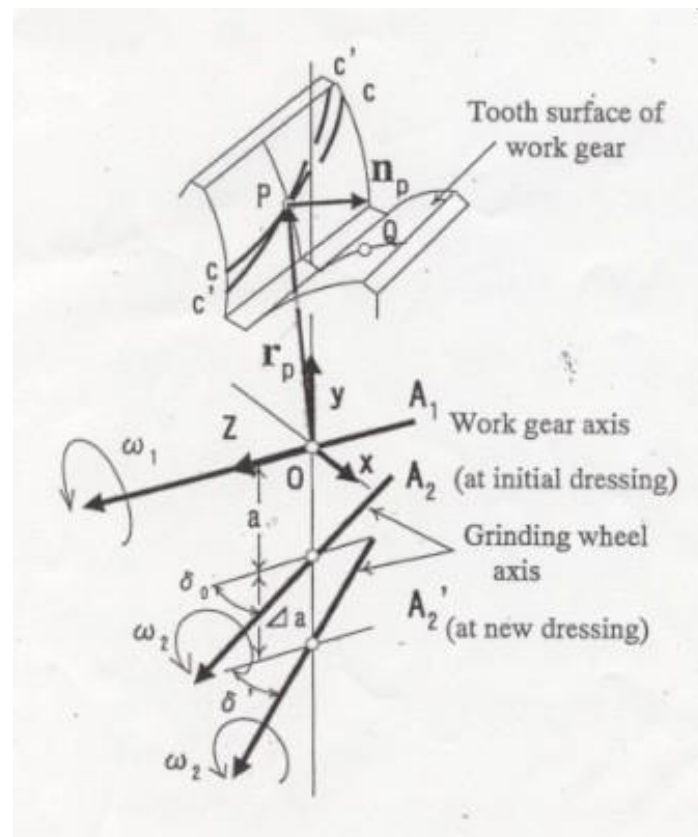
Se si ritorna alla figura N°4, si può appunto osservare che verso la testa del dente dell'ingranaggio l'asportazione di materiale è stata maggiore.

Partendo da queste considerazioni si è pensato di modificare l'angolo di elica dell'utensile durante la diamantatura in modo esso sia quello del nuovo diametro primitivo di rotolamento.

In questo diametro di rotolamento, le eliche dell'ingranaggio e quello del pezzo dovranno coincidere. In questo modo si riporteranno le posizioni delle linee di contatto nelle condizioni iniziali.

Se si modifica l'angolo dell'elica dell'utensile, bisognerà modificare anche l'angolo di incrocio durante il set-up della levigatrice.

Per la determinazione dell'angolo di elica di diamantatura e quindi dell'angolo di incrocio si possono calcolare le eliche nei rispettivi diametri di rotolamento, oppure si può adottare l'algoritmo usato dalla Seiwa in collaborazione con l'Istituto di Ingegneria Meccanica del Matsue National College of Technology (Giappone).



Tooth surface of work gear = Superficie del dente dell'ingranaggio
Work gear axis = Asse dell'ingranaggio
(at initial dressing) = (con utensile nuovo)
Grinding wheel axis = Asse dell'utensile-mola
(at New dressing) = Nelle successive diamantature

Figura N°7

Con riferimento alla figura N°7 la linea di contatto sul dente dell'ingranaggio nelle condizioni iniziali è indicata con c-c.

L'intersezione di questa linea con un piano ortogonale alla superficie nella mezzeria del dente individua il punto P.

Il vettore che individua il punto P, con origine degli assi nel centro del pezzo, è \mathbf{R}_p , mentre la normale alla superficie, passante per il punto P è il vettore \mathbf{N}_p .

La distanza e l'angolo tra gli assi del rullo di diamantatura e l'utensile abrasivo sono indicati rispettivamente con a_0 e δ_0 . Si tratta di determinare la variazione dell'interasse Δ_0 ed il nuovo angolo di incrocio δ' .

I vettori di cui sopra possono essere scritti con:

$$\mathbf{r}_p = r_{px} \mathbf{i} + r_{py} \mathbf{j}$$

$$\mathbf{n}_p = n_{px} \mathbf{i} + n_{py} \mathbf{j} + n_{pz} \mathbf{k}$$

Poiché le velocità angolari dell'ingranaggio e dell'utensile sono rispettivamente ω_1 e ω_2 la velocità relativa delle due superfici in contatto nel punto P sono

$$\mathbf{w} = (\omega_1 - \omega_2) \mathbf{x} \mathbf{r}_p - \omega_2 \mathbf{x} (a + \Delta a) \mathbf{j} \quad (\mathbf{X} \text{ indica il prodotto vettoriale})$$

La condizione di contatto è definita dalla seguente equazione:

$$\mathbf{n}_p \cdot \mathbf{w} = 0$$

cioè la condizione di ortogonalità tra i due vettori.

In altre parole la componente della velocità relativa tra ingranaggio ed utensile, ortogonale alla superficie deve essere nulla.

In base a quanto sopra il nuovo angolo di incrocio δ' è calcolato in modo da soddisfare la seguente equazione:

$$A \cdot n_{px} + B \cdot n_{py} + C \cdot n_{pz} = 0$$

cioè:

$$A = -r_y (I - \cos \delta') + (a + \Delta a) \cos \delta'$$

$$B = r_x (I - \cos \delta')$$

$$C = r_y \sin \delta' - (a + \Delta a) \sin \delta'$$

$$\text{con } I = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

La Seiwa ha condotto una serie di esperimenti con la sua levigatrice mod.SG25S adottando appunto il sistema di diamantatura con angolo di incrocio fluttuante.

Il risultato di queste prove è riportato nella figura N°8 dove si può osservare che nel caso si impieghi il metodo di diamantatura convenzionale, cioè con angolo di incrocio fisso, si ha una deriva del profilo con errori che arrivano a circa 8 micron quando l'interasse di lavoro aumenta di circa 1 mm. L'utensile in questo caso avrebbe una utilizzazione molto ridotta.

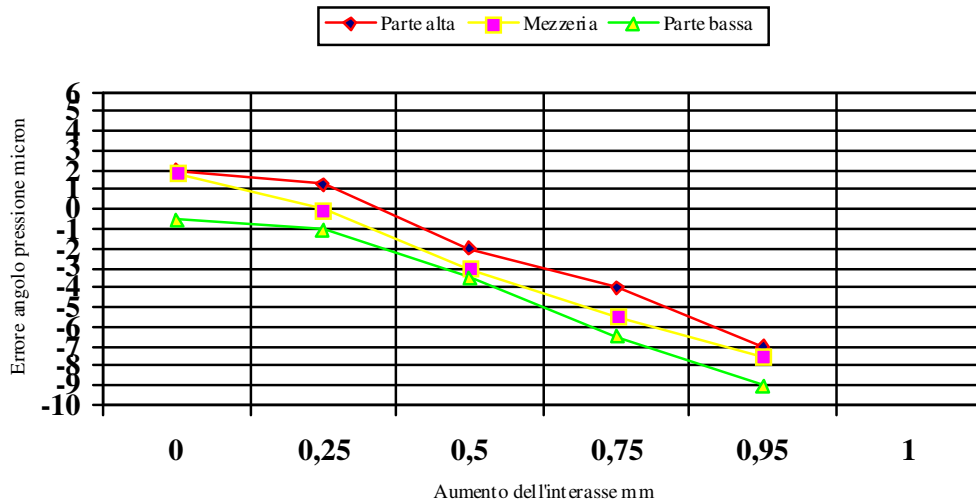


Figura N°8- Errori dell'angolo di pressione con angolo di incrocio fisso

l'interasse di lavoro aumenta di circa 1 mm. L'utensile in questo caso avrebbe una utilizzazione molto ridotta.

Se si osserva invece il risultato delle prove con il metodo di diamantatura ad elica variabile (e quindi ad angolo di incrocio variabile), si può vedere che la variazione del profilo del dente dell'ingranaggio si mantiene in limiti molto piccoli, circa 2 micron, anche con variazione dell'interasse di 10 mm. (fig. N°9)

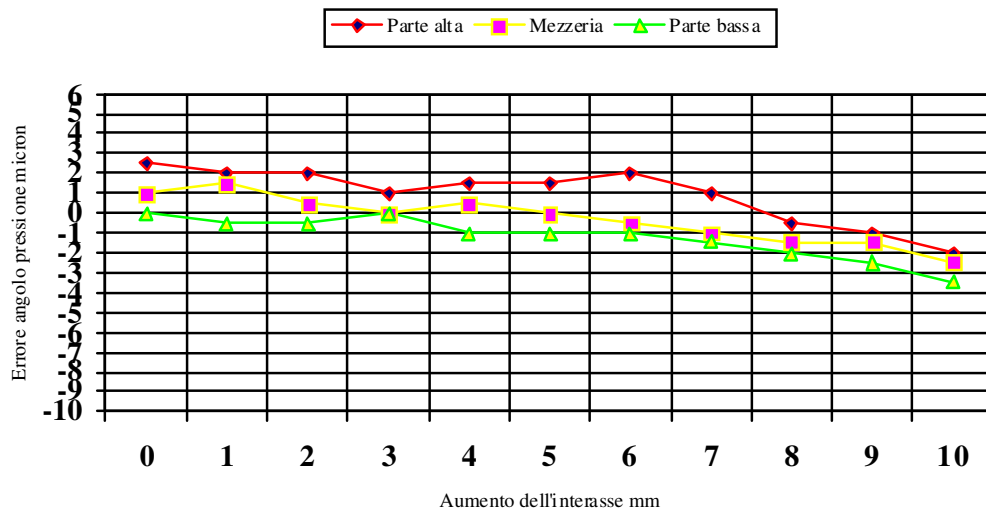


Figura N°9- Errori dell'angolo di pressione con angolo di incrocio variabile