

## Ingranometro monofianco

### Accoppiamento con gioco

L'accoppiamento tra ruota e controruota, nella quasi totalità dei casi, avviene *con gioco*. Ciò vuol dire che l'interasse tra i due ingranaggi è leggermente maggiore di quello teorico e quindi il contatto avviene solo su un fianco del dente.

I due fianchi dei denti di un ingranaggio si identificano in pratica come fianco *in tiro* e fianco *in ritorno*, secondo che il contatto su quel dente avvenga durante la trasmissione normale del moto o nella fase di decelerazione della trasmissione.

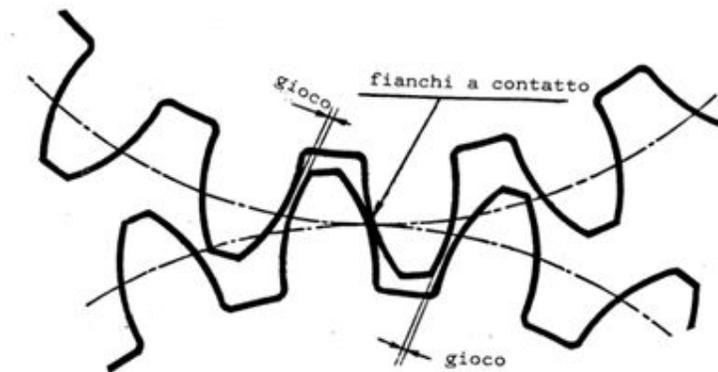


Fig. N°1

Il motivo per cui gli ingranaggi lavorano in queste condizioni deriva dalla necessità di compensare certi errori di costruzione dell'ingranaggio, primo fra tutti l'errore di eccentricità.

Se supponiamo di lavorare con interasse fisso teorico, cioè con i due fianchi a contatto, anche una piccola eccentricità di una delle due ruote creerebbe una interferenza tale da bloccare la trasmissione.

Anche una leggera maggiorazione dello spessore dei denti procurerebbe lo stesso inconveniente.

Il valore del gioco sui fianchi varia molto da caso a caso e dipende dal tipo di trasmissione, dalla potenza trasmessa, dal modulo, ecc.

Per i cambi automobilistici l'entità del gioco non si discosta molto da 0,1 mm.

È importante quindi avere uno strumento che indichi se l'accoppiamento in queste condizioni avviene in maniera corretta, uno strumento cioè, che simulando le condizioni di funzionamento, evidenzia gli errori di ingranamento.

Bisogna precisare che in realtà durante il funzionamento della trasmissione i denti dell'ingranaggio sono soggetti a forze che modificano la condizione di un puro rotolamento come avviene nel caso del controllo con l'ingranometro monofianco.

La simulazione del controllo quindi è solo approssimativa e serve solo per evidenziare alcuni errori geometrici; non va intesa come prova di funzionamento, anche perché molte altre condizioni non sono rispettate, come ad esempio la velocità di rotazione dell'accoppiamento.

Il rumore generato da una coppia di ingranaggi che ingranano girando ad una certa velocità, dipende da una serie di fattori non tutti ancora ben identificati.

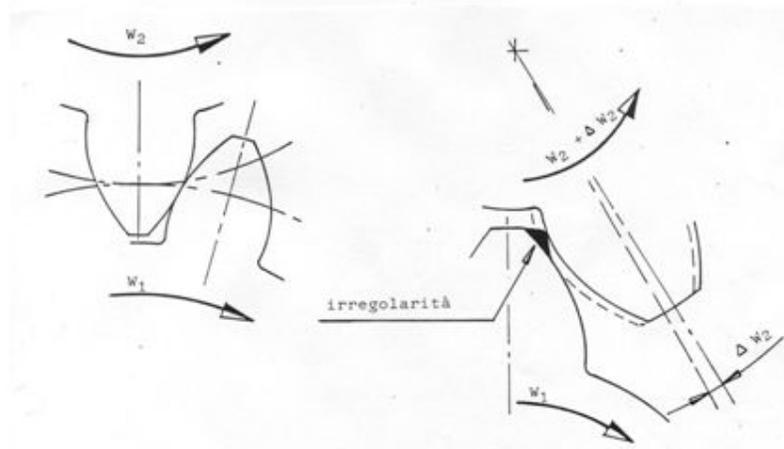
In sostanza si tratta di vibrazioni provocate da anomalie nell'accoppiamento, cioè di variazioni istantanee della velocità angolare.

La frequenza e l'ampiezza di queste vibrazioni determinano rispettivamente l'*acutezza* del rumore e la sua intensità.

L'analisi con il metodo di Fourier delle vibrazioni generate da una coppia di ingranaggi in moto mette in evidenza che ogni singola onda di vibrazione è la sovrapposizione di onde di varie frequenze, il che significa che molte differenti irregolarità entrano in gioco provocando il rumore.

Se durante la trasmissione del moto, ad una certa velocità angolare  $W_1$  dell'ingranaggio conduttore corrisponde sempre, in ogni singolo istante, una velocità angolare  $W_2$  dell'ingranaggio condotto, la trasmissione è silenziosa.

Ma se sul fianco di un dente è presente una irregolarità tale da far variare per un istante la velocità  $W_2$ , tale irregolarità diventa una fonte di vibrazioni e quindi di rumore. Nella figura N°2 è indicato quello che succede nell'istante  $\Delta t$ .



**Fig. N°2**

E' evidente che esistono diversi tipi di *irregolarità*, cioè diversi errori che il più delle volte sommano i loro effetti rendendo praticamente impossibile una discriminazione dei singoli errori.

Le imperfezioni più comuni presenti in una dentatura sono:

- Errori di profilo
- Errori di elica
- Errori di passo
- Eccentricità
- Sfarfallamento (errore angolare tra asse di rotazione ed asse della dentatura)
- Colpi (ammaccature)

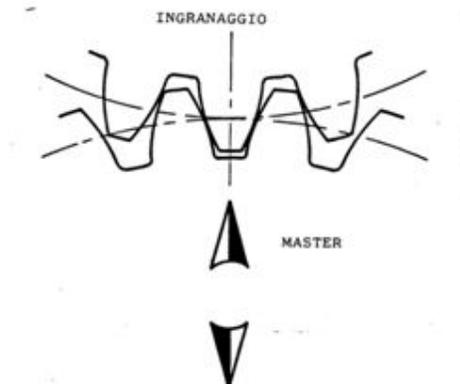
Tutte queste imperfezioni provocano effetti indesiderati sulla regolarità del moto, cioè vibrazioni e quindi rumore.

E' perciò importante avere un mezzo, che anche in assenza di un'analisi metrologica della dentatura, metta in evidenza gli errori di ingranamento riflettendo, per quanto è possibile, le condizioni di ingranamento.

#### Funzionamento dell'ingranometro monofianco

Per capire esattamente i vantaggi di questo tipo di apparecchio rispetto l'ingranometro tradizionale che lavora a gioco zero, è necessario ricordare come lavora quest'ultimo tipo di ingranometro.

Come si può osservare nella fig.N°3, l'accoppiamento tra ingranaggio e master avviene con gioco zero, cioè sia il fianco destro che sinistro di un dente sono in contatto.



**Fig. N°3**

In queste condizioni, ogni imperfezione di ingranamento obbliga il master a spostarsi in direzione radiale e sono appunto questi spostamenti che saranno rilevati da appositi trasduttori.

Il limite di questo tipo di ingranometro, che tuttavia resta validissimo per moltissimi impieghi, è costituito dall'inerzia del sistema master-carrello portamaster che non permette di raggiungere sensibilità elevate.

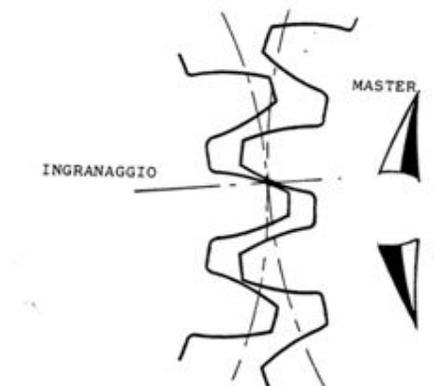
Piccole anomalie, quali ad esempio ammaccature inferiori a 0,01 mm non vengono evidenziate perché sono assorbite dai giochi presenti nelle varie parti mobili e dalla elasticità dei vari organi.

Ultimamente a dire il vero ci sono sul mercato ingranometri che invece di usare un carrello portamaster con movimento radiale, montano il master su un braccio oscillante che, eliminando i movimenti lineari, permettono sensibilità maggiori.

Gli spostamenti radiali del master sono inoltre fortemente influenzati dall'angolo di pressione della dentatura.

Infine, naturalmente, non è possibile isolare gli errori relativi ad un fianco da quelli relativi all'altro fianco.

L'ingranometro monofianco, invece, che lavora come indicato in fig.N°4, ha una sensibilità molto maggiore perché mette in evidenza gli scostamenti angolari del master rispetto alla rotazione teorica.



**Fig. N°4**

Ci si rende subito conto che in primo luogo l'inerzia è molto minore e quindi maggiore sarà la velocità di risposta del sistema ed in secondo luogo che i giochi nei vari collegamenti possono, in questo caso, essere ridotti quasi a zero, elevando la sensibilità della misura.

Tutte le imperfezioni che si evidenziano in questo modo sono quelle che saranno presenti nel funzionamento dell'ingranaggio montato nella scatola cambio, tenendo sempre presente però che le condizioni reali sono alquanto diverse (forze, velocità ecc.).

Se il controllo di questo tipo non mette in evidenza errori, significa che l'ingranamento è corretto e quindi, in assenza di altre cause, il funzionamento è silenzioso.

Questo controllo *cumulativo* permette di saltare il controllo metrologico completo dell'ingranaggio, con evidenti vantaggi di tempo.

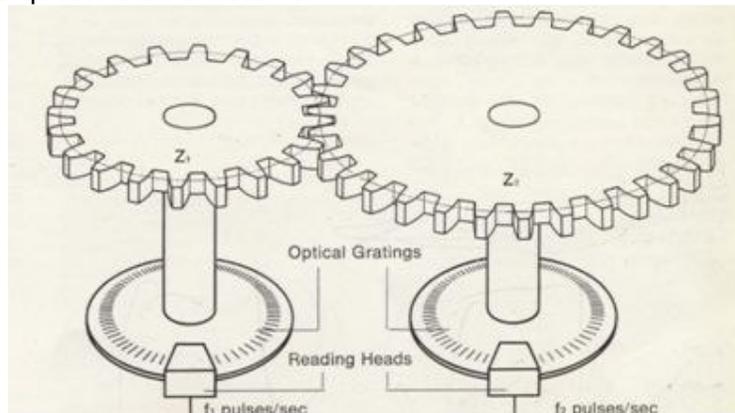
L'ingranometro monofianco rileva, come si è detto, con particolare precisione, su un fianco alla volta i seguenti errori:

- *Errore composto tangenziale (sommatoria di errori di divisione, errori di profilo, distorsione, ecc.)*
- *Valore del gioco con un interasse prefissato*
- *Entità delle ammaccature*

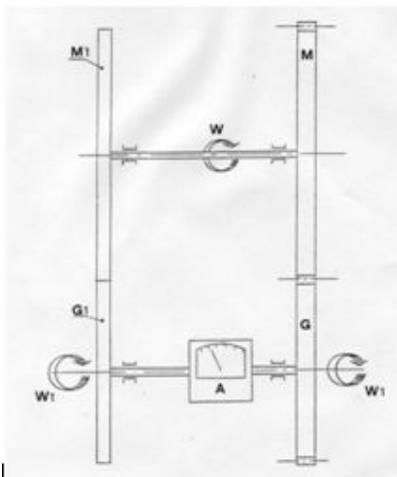
Esistono diversi tipi di ingranometri di questo tipo sul mercato, ma tutti i sistemi si basano sul principio di confrontare la rotazione teorica dell'accoppiamento con quella effettiva ed evidenziarne le differenze.

La comparazione tra rotazione teorica e reale può avvenire in molti modi: ad esempio impiegando la tecnologia dei controlli numerici, che oggi è quella quasi esclusivamente usata, oppure misurando la velocità di rotazione del master e dell'ingranaggio con dischi ottici (Fig.N°5a), oppure perfino con sistemi meccanici, come aveva fatto alcuni anni or sono la Samputensili (Bologna) su un apparecchio che ora è fuori produzione.

Ma per capire più facilmente il principio di funzionamento di questo tipo di apparecchi illustriamo proprio questo ultimo sistema.



**Fig. N°5°** - Controllo con dischi ottici -  $Z_1$ =master ;  $Z_2$ = ingranaggio da controllare



**Fig. N°5b**- Controllo con sistema meccanico

Con riferimento alla figura N°5b, il master M ed il disco primitivo  $M_1$  sono montati sullo stesso asse e ruotano solidali tra loro alla velocità angolare  $W$ .

Il disco primitivo  $M_1$  ha il diametro uguale al diametro primitivo di funzionamento del master M.

Il master M ingrana con l'ingranaggio G e lo trascina in rotazione con velocità angolare  $W_1$ , mentre il disco primitivo  $M_1$  viene premuto contro il disco primitivo  $G_1$  (che ha il diametro uguale al diametro primitivo di funzionamento dell'ingranaggio G) e lo trascina in rotazione per attrito alla velocità angolare  $W_1$ .

Ogni imperfezione dell'ingranaggio G (ammaccature, errori di passo, ecc.) si traduce in una variazione istantanea della velocità angolare  $W_1$  rispetto alla velocità  $W$  dell'ingranaggio G.

Poiché l'ingranaggio G ed il disco  $G_1$  sono coassiali ma non fissi tra loro si ha uno spostamento angolare dell'ingranaggio G rispetto il disco  $G_1$  e l'apparecchio A rileva questo spostamento angolare.

Invertendo il senso di rotazione è inoltre possibile quantificare l'entità del gioco tra ingranaggio G e master M.

#### Definizione degli errori di rotolamento

La norma DIN 3960 definisce gli errori di rotolamento nell'ingranometro con un singolo fianco a contatto.

E' importante attenersi a questa simbologia che, tra l'altro, è stata cambiata rispetto alla precedente edizione della norma citata, in modo che non sorgano dubbi nella interpretazione dei diagrammi.

Durante il controllo del rotolamento vengono accoppiati i due ingranaggi con dentature coniugate e l'insieme dei loro singoli errori geometrici (errori singoli) durante la rotazione vengono definiti come errori di rotolamento.

Questi possono essere imputati ad un ingranaggio (all'ingranaggio da controllare), se viene utilizzato come accoppiante un ingranaggio master i cui errori rispetto agli errori dell'ingranaggio da controllare sono trascurabili.

Molte volte l'ingranaggio master viene scelto con una qualità di almeno tre livelli più precisa della qualità teorica dell'ingranaggio da controllare.

Ad esempio se si deve controllare un ingranaggio di classe 6 (DIN 3962) è opportuno scegliere un master di classe 3.

Bisogna però osservare che pur essendo possibile la costruzione di master di classe 2, normalmente non sono usati a causa del loro costo elevato e della loro difficile reperibilità.

Se gli errori dell'accoppiante non sono trascurabili (per es. nel controllo di rotolamento di due ingranaggi di trasmissione) le variazioni di rotolamento possono essere imputate solo all'insieme della coppia di ingranaggi.

La norma DIN 3960 definisce i seguenti errori:

#### Controllo di rotolamento di un fianco

Nel controllo di rotolamento di un fianco i due ingranaggi ingrano con interasse definito, dove o il fianco destro o il fianco sinistro rimangono in contatto continuo.

Gli errori di rotolamento del fianco destro di un ingranaggio sono, in genere, diversi da quelli del fianco sinistro dello stesso ingranaggio.

Partendo da una posizione iniziale, vengono misurate le variazioni dell'angolo di rotazione, cioè le variazioni delle posizioni di rotolamento dell'ingranaggio rispetto alle posizioni teoriche definite dalle posizioni dell'accoppiante e dal rapporto di trasmissione (rapporto tra il numero di denti).

Di solito gli errori vengono indicati come lunghezze (es. centesimi o millesimi di mm) lungo la circonferenza di un cerchio di misura, per es. del cerchio primitivo o del cerchio di base; esse possono però essere indicate anche in misura di angolo (per es. in secondi di grado oppure in millesimi di radiante).

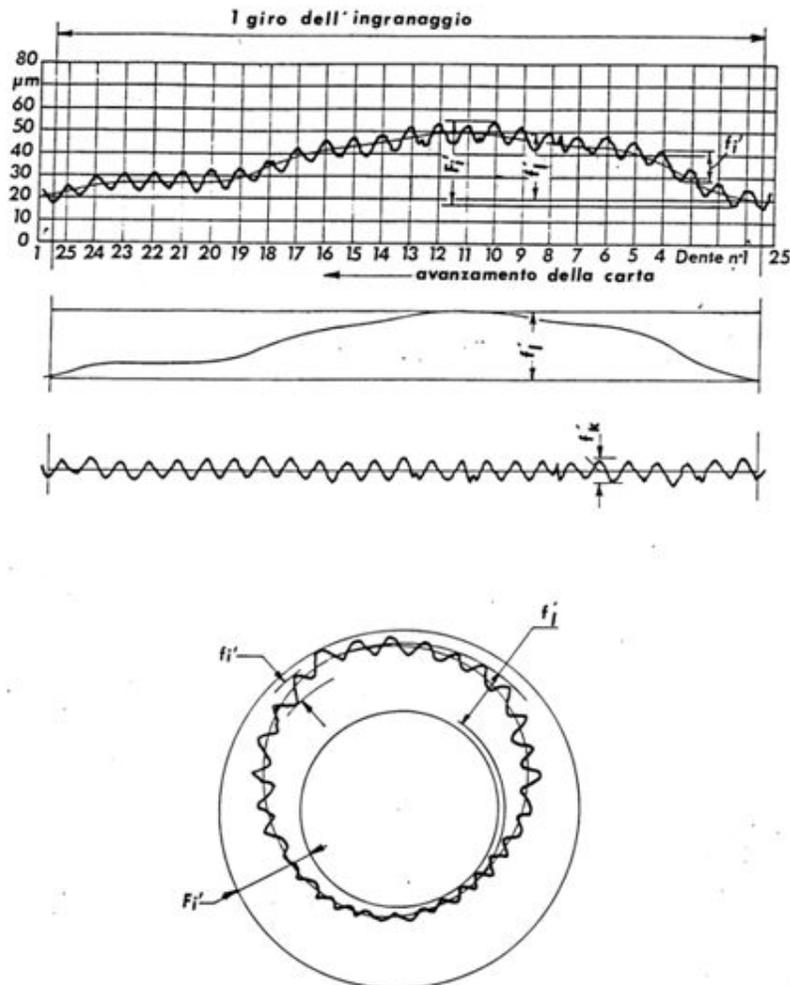


Fig. N°6

Errori di rotolamento di un fianco  $F_i'$

Con riferimento alla figura N°6 l'errore di rotolamento di un fianco  $F_i'$  si ricava, come si è già detto più volte, dalle posizioni reali di rotazione rispetto alle posizioni teoriche.

Esso si ottiene come differenza algebrica della più grande variazione di posizione di rotazione che va avanti e della più grande variazione di rotazione che rimane indietro, rispetto ad un valore iniziale in un giro dell'ingranaggio da controllare.

In un diagramma polare l'errore di rotolamento  $F_i'$  è la differenza tra la più grande e la più piccola distanza della linea di controllo tracciata dal centro (origine degli assi polari).

In un diagramma di controllo lineare l'errore di rotolamento  $F_i'$  è la differenza tra le più grandi e le più piccole ordinate della linea di controllo.

Errore somma di rotolamento  $f_i'$

L'errore somma di rotolamento si ricava esaminando la curva ottenuta tracciando la linea di compensazione del diagramma degli errori di rotolamento.

In genere questa curva è approssimativamente una sinusoide con periodo pari ad un giro dell'ingranaggio.

Si definisce errore somma di rotolamento  $f'_i$  la differenza tra il più alto ed il più basso punto della curva di compensazione (ved. fig.N°6).

Nel caso di diagramma polare  $f'_i$  è la differenza tra la più grande e la più piccola distanza della curva di compensazione dal centro.

#### Errori singolo di rotolamento $f'_k$

Gli errori singoli di rotolamento vengono letti nelle zone con “*ondulazioni brevi*” del diagramma di rotolamento di un fianco.

Essi si ottengono dalla differenza tra il minimo ed il massimo del diagramma tracciato prendendo come riferimento la curva di compensazione di cui al punto precedente.

Il numero di periodi per ogni rotazione dell'ingranaggio è uguale al numero di denti dell'ingranaggio da controllare.

L'entità e la forma di queste onde brevi che caratterizzano il passaggio da un dente all'altro, dipendono, oltre che dagli errori di divisione, anche dagli errori di elica e di profilo.

L'errore di rotolamento singolo  $f'_k$  è la differenza tra il punto più alto ed il punto più basso del diagramma di un'onda breve con riferimento alla curva di compensazione.

L'errore somma di rotolamento  $f'_i$  e l'errore singolo di rotolamento  $f'_k$  danno insieme l'errore di rotolamento di un fianco  $F'_i$ .

#### Salto di rotolamento $f'_i$

Il salto di rotolamento di un fianco  $f'_i$  è la più grande differenza che si rileva esaminando tutti gli errori singoli nel diagramma degli errori di rotolamento durante un giro dell'ingranaggio.

Si prende cioè il punto più alto ed il punto più basso di un periodo (*onde brevi*) riferito alle coordinate del diagramma e tra questa serie di differenze si considera quella che ha il valore assoluto maggiore.

#### Individuazione dei colpi

Un'ammaccatura su un dente dell'ingranaggio è un'anomalia molto comune e costituisce una delle principali fonti di rumore nell'accoppiamento tra due ingranaggi.

Quando nella zona di contatto si inserisce la deformazione di un colpo, la velocità di rotazione dell'ingranaggio viene rapidamente variata e ciò si presenta sul diagramma di ingranamento come una punta molto acuta più o meno ampia seconda l'ampiezza dell'ammaccatura.

Se l'individuazione del colpo attraverso la lettura del diagramma è agevole e quasi immediata, l'analisi da parte del computer presenta invece qualche difficoltà.

Tra i vari metodi possibili c'è quello del calcolo dell'accelerazione, cioè del calcolo, punto per punto, della derivata seconda. Se questo valore supera un certo livello, significa che l'accelerazione istantanea è provocata da un colpo.

#### Considerazioni sull'errore singolo di rotolamento $f'_k$

Come si è già detto questo errore si ripete con frequenza pari al numero di denti dell'ingranaggio durante un giro e dipende da molti fattori.

I principali sono: l'errore di passo, l'errore di profilo e l'errore di elica.

Non è sempre possibile separare i vari errori leggendo il diagramma, ma questo in definitiva non è un grande inconveniente.

Bisogna infatti tenere presente che l'ingranometro monofianco giudica la dentatura nel suo complesso. Se i vari errori presenti interferiscono tra loro e sommando i loro effetti si ottiene un ingranamento buono, non è tanto importante misurare ogni singolo errore e giudicare il suo parziale effetto sull'ingranamento.

Ciò che si vuole dire è che probabilmente è inutile ricercare la perfezione sull'evolvente, con costi alti, quando l'effetto di questo errore sull'ingranamento può non essere molto importante.

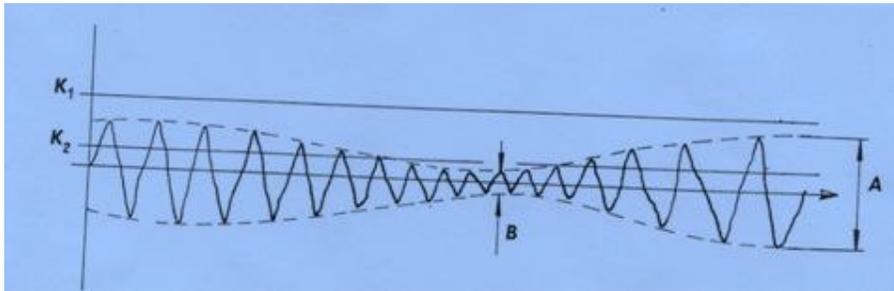
L'importanza dell'ingranometro monofianco è appunto questa: che cioè si può giudicare l'influenza di ogni singolo errore sull'effetto finale e quindi restringendo o allargando la tolleranza di costruzione là dove è necessario e possibile.

In generale, l'oscillazione ad *onda corta* riscontrabile nel diagramma mette in evidenza una vibrazione dell'ingranaggio.

Se questa vibrazione supera un certo livello l'ingranaggio sarà rumoroso e la rumorosità si manifesterà come un *fischio* o come un *effetto sirena*.

Se l'ampiezza della vibrazione è inferiore a questo livello limite normalmente l'ingranaggio è accettabile, ma non sempre.

A volte accade che durante un giro l'ampiezza di queste oscillazioni varia, si ha cioè una modulazione dell'ampiezza che provoca un effetto sonoro definito come *sirena modulata*, più percepibile del suono continuo.



**Fig. N°7**

Con riferimento alla figura N°7, il valore dell'ampiezza massima A dà una prima selezione; infatti se supera il valore  $K_1$  il suono è talmente forte che l'ingranaggio è sicuramente di scarto; se A è inferiore al valore  $K_2$  il suono non sarà percepibile ed il pezzo sarà accettabile anche in presenza di un effetto di modulazione.

Se però l'ampiezza A è compresa tra i valori  $K_1$  e  $K_2$  sarà necessario stimare se l'effetto di modulazione è accettabile o no e questo si può fare calcolando il rapporto  $A/B$  stabilendo opportune barriere.

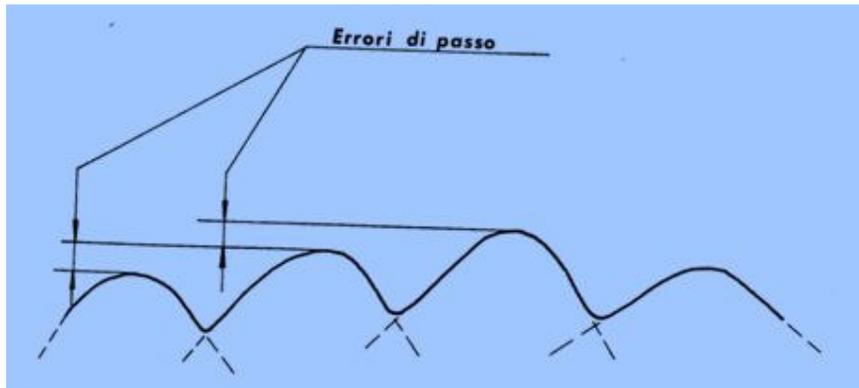
La determinazione con il computer di A e di B è semplice e non presenta alcuna difficoltà. Se si vuole trovare il valore di A e di B depurato da ogni altra perturbazione è necessario calcolare l'armonica numero Z della serie di Fourier.

### *Errore di passo singolo*

Si è detto che è difficile distinguere i vari errori presenti nel dente dell'ingranaggio perché i loro effetti si accumulano e alla fine, sia gli errori di evolvente che di elica si traducono in ogni istante in errori di passo.

In pratica, a stretto rigore, ogni deviazione del diagramma rispetto ad una retta è imputabile ad un istantaneo errore di passo.

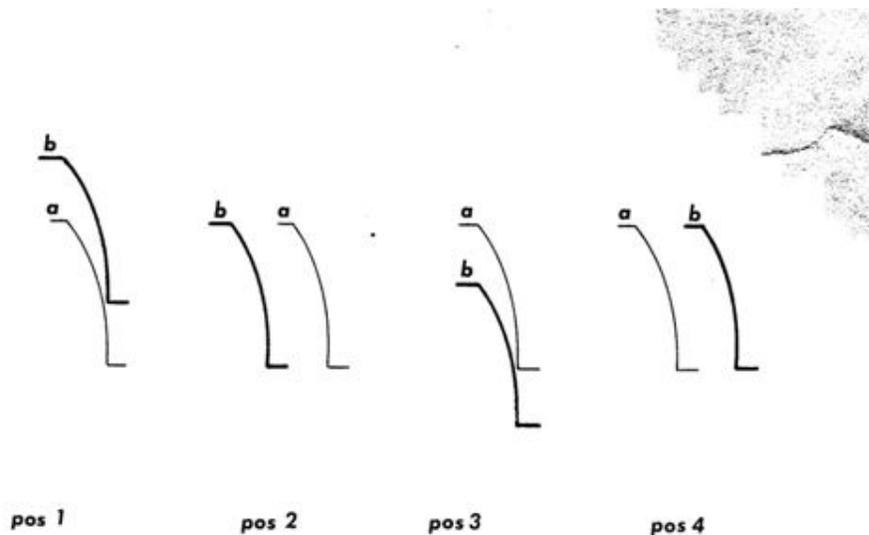
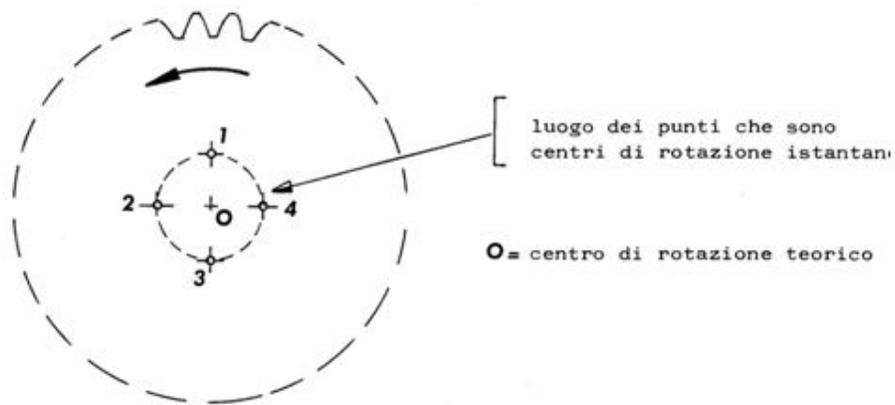
Però, su due denti contigui, in punti analoghi, si può pensare che gli errori di elica e di evolvente siano molto simili, per cui, per esempio, la differenza tra due punti di massimo contigui può essere imputata con ottima approssimazione al solo errore di passo (errore di divisione). Vedere fig. N°8.



**Fig. N°8**

*Eccentricità della dentatura*

Quando si dice che la dentatura è eccentrica, si vuol dire che l'asse di rotazione dell'ingranaggio non corrisponde all'asse sul quale è stata costruita la dentatura. Questo in pratica si traduce in un continuo spostamento del cerchio di base e quindi dell'evolvente rispetto alla sua posizione teorica. Vedere fig.N°9.



a = evolvente in posizione teorica  
b = evolvente spostata per effetto dell'eccentricità

**Fig.N°9**

L'ingranamento in queste condizioni è evidentemente irregolare perché il passo della dentatura varia continuamente e l'ingranaggio è soggetto a continue variazioni di velocità. Nel passaggio dalla posizione 1 alla posizione 2 si ha un decremento della velocità di rotazione dell'ingranaggio (che è trascinato dal master) perché la posizione del dente si sposta in avanti passando da una posizione di ritardo rispetto al teorico ad una posizione di anticipo.

Poiché questo fianco deve rimanere in contatto con il master, l'ingranaggio sarà costretto a ridurre la velocità.

Subito dopo, però, passando dalla posizione 2 alla posizione 3 il fianco si avvicina alla posizione teorica e quindi l'ingranaggio accelererà fino a raggiungere il massimo spostamento nella posizione 4.

E' necessario osservare che durante una rotazione di  $90^\circ$  (dalla posizione 1 alla posizione 2), il dente passa da una situazione di anticipo ad una posizione di massimo ritardo, mentre per un'analoga rotazione di  $90^\circ$  (dalla posizione 2 alla posizione 3), si passa da un massimo ritardo ad una posizione di ritardo intermedio.

Ciò vuol dire che gli spostamenti del dente non seguono esattamente una legge sinusoidale, ma il diagramma degli spostamenti avrà tratti più ripidi e tratti meno ripidi. In effetti è una sinusoide deformata.

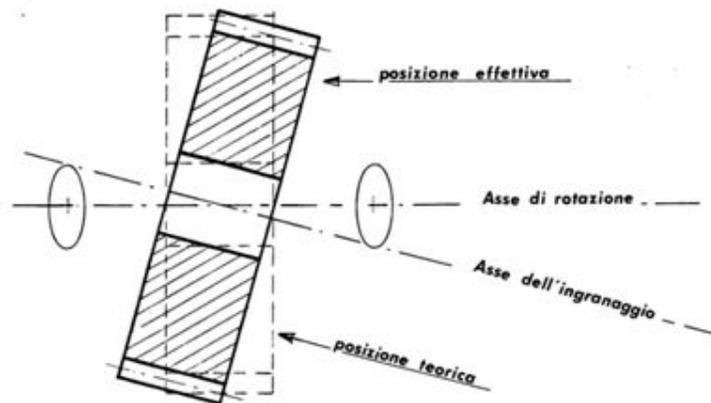
Ciò può avere una certa importanza quando si cerca la scomposizione del diagramma con il metodo di Fourier; ci si può trovare in presenza di un'armonica le cui origini sono appunto da ricercarsi nell'eccentricità.

Quello che risulta però chiaro è che quest'onda ha un periodo pari ad un giro, cioè il diagramma si ripete ogni  $360^\circ$  di rotazione.

#### *Sfarfallamento dell'ingranaggio*

E' un errore molto comune negli ingranaggi cilindrici ed è provocato dalla non perpendicolarità delle facciate rispetto all'asse di rotazione.

In sostanza si ha che l'asse di rotazione non è parallelo all'asse della dentatura. L'asse della dentatura ruota sghembo rispetto all'asse di rotazione. Vedere figura N°10

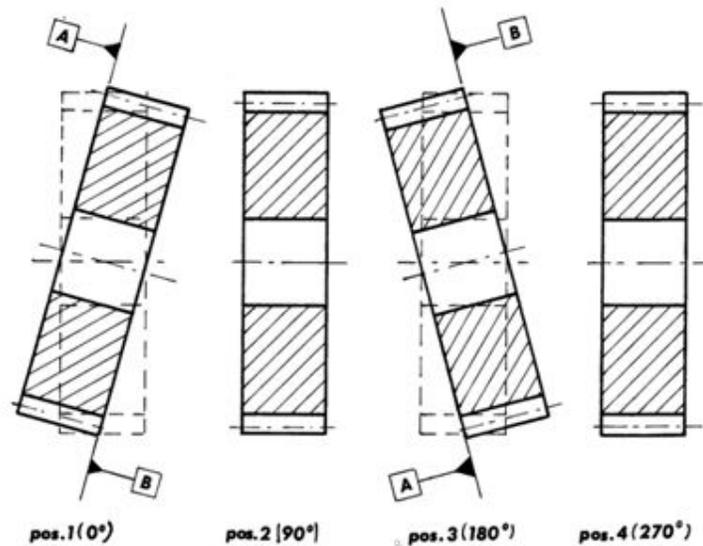


**Fig. N°10**

In queste condizioni l'ingranamento evidentemente non è corretto e quindi il diagramma presenterà certe caratteristiche che saranno proprie di questo tipo di errore.

Se si esaminano le quattro posizioni che assume l'ingranaggio passando da  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  (vedere fig. N°11), si può osservare che nella posizione 1 il lato A della dentatura è

posto su un diametro maggiore e quindi il master avrà costretto l'ingranaggio in una posizione di anticipo rispetto alla posizione teorica.



**Fig. N°11**

Il contatto tra master ed ingranaggio avverrà appunto nel lato A.

Ruotando si passerà poi gradatamente alla posizione 3 posta a 180° che sarà analoga alla 1, solamente che il contatto avverrà sul lato B.

Nelle posizioni intermedie 2 e 4 non si ha uno spostamento in senso radiale della dentatura, ma si ha una variazione dell'angolo dell'elica, prima in un senso e poi nell'altro, che tendono a far anticipare l'ingranaggio rispetto alla posizione teorica, ma in misura minore rispetto a quanto avvenuto nelle posizioni 1 e 3.

In definitiva si ha una curva di ingranamento che in un giro avrà due massimi (posizioni 1 e 3) e due minimi (posizioni 2 e 4), cioè avrà una frequenza doppia rispetto all'onda caratteristica dell'eccentricità.

C'è da osservare però che l'oscillazione avrà un'ampiezza minore di quella che può sembrare in un primo momento; infatti non ci saranno posizioni in cui il dente dell'ingranaggio si presenterà su quello del master come se fosse più magro del teorico, lo spessore apparente del dente sarà sempre maggiore del teorico.

Ma quello che qui interessa per il momento è aver dimostrato che l'errore di farfallamento genera un diagramma di ingranamento che è caratterizzato da una frequenza doppia di quella fondamentale.

#### Esempio di programma di controllo (Flow Chart)

L'impiego del computer permette una grande flessibilità d'impiego. E' infatti possibile allestire un programma multifunzionale con possibilità di molte opzioni in modo da adeguare l'apparecchio alle più svariate necessità.

Uno stesso apparecchio può essere impiegato per controlli in linea da operatori non particolarmente specializzati e, con un semplice richiamo di un sottoprogramma, si possono analizzare particolari aspetti della curva di ingranamento, per fare statistiche, misurare spessori di denti, eccentricità e farfallamento, da parte di personale più preparato.

Naturalmente si possono studiare di volta in volta programmi speciali che tengano conto di particolari esigenze nella costruzione di ingranaggi.

Il programma qui descritto è un esempio che può essere sufficiente nella quasi totalità dei casi, perché tiene conto di tutti gli elementi che possono rendere rumoroso un ingranaggio.

Nel Flow Chart di fig.12, si vede che il primo controllo prevede la determinazione dell'errore  $F'_i$ , cioè la differenza massima tra il punto più basso ed il punto più alto del diagramma di ingranamento.

Se questo valore è superiore ad un certo limite, l'ingranaggio è di scarto (scarto primario).

Se è inferiore si procede calcolando  $f'_i$ , cioè l'altezza dell'onda lunga e verificando se sia inferiore ad un certo valore limite oltre il quale si ha lo scarto per errore di forma totale.

Sia nel primo scarto che nel secondo si ha una possibilità di opzione per un'analisi più completa e cioè per il calcolo della 1<sup>a</sup> e della 2<sup>a</sup> armonica relative rispettivamente all'eccentricità ed allo farfallamento, con stampa dei relativi valori e del grafico nella forma di istogramma.

Si ha altresì la possibilità di stampare i diagrammi di ingranamento dei primo e del secondo fianco, del diagramma dell'onda lunga e dell'onda corta in accordo con la norma DIN 3960.

A questo punto vengono ricercati i colpi con il calcolo di  $V'_i$ , cioè della derivata seconda; se questo valore è superiore ad un certo limite, cioè se nel dente "i" siamo in presenza di un colpo si calcola la sua ampiezza, cioè  $(f'_k)_i$  e se viene superata una certa barriera, l'ingranaggio sarà di scarto per colpi, mentre se il colpo è tanto piccolo da essere tollerato si prosegue nel controllo..

Vengono ora determinati i valori di  $f'_k$  su tutti i denti determinando a e B.

Se A è superiore ad un certo limite  $K_2$  il pezzo è di scarto per salto dente (rumorosità per effetto sirena), se è inferiore a  $K_2$  ed a  $K_1$  il pezzo è accettato come buono.

Ma se pur essendo inferiore a  $K_2$  è superiore a  $K_1$ , è necessario calcolare il rapporto A/B che se risulta superiore ad un certo valore determina lo scarto per effetto di sirena modulata.

Se invece il rapporto A/B risulta entro i limiti tollerati, si va a determinare il gioco minimo, che non deve essere troppo piccolo altrimenti si rischiano impuntamenti nel funzionamento dell'ingranaggio.

Se il gioco  $\chi_1$  è superiore al minimo, si può calcolare lo spessore cordale  $S_c$  del dente.

Infatti, l'interasse nell'apparecchio è conosciuto, è conosciuto lo spessore cordale del master, il gioco medio è determinato dall'apparecchio e quindi ci sono i dati sufficienti per calcolare lo spessore dei denti dell'ingranaggio e verificare così se questo parametro rientra nei limiti stabiliti dal disegno.

Riepilogando, questo programma introduce ben 7 filtri e stabilisce 7 motivi di scarto e cioè:

- *Scarto primario ( $F'_i$ ) troppo grande)*
- *Scarto per difetto di forma totale ( $f'_i$  troppo grande)*
- *Scarto per colpi ( $f'_k$  relativo ad un colpo, troppo grande)*
- *Scarto per salto dente ( $f'_k$  troppo grande)*
- *Scarto per modulazione ( rapporto A/B troppo grande)*
- *Scarto per gioco minimo (gioco tra i fianchi troppo piccolo)*
- *Scarto per spessore dente fuori tolleranza (spessore dente troppo piccolo).*

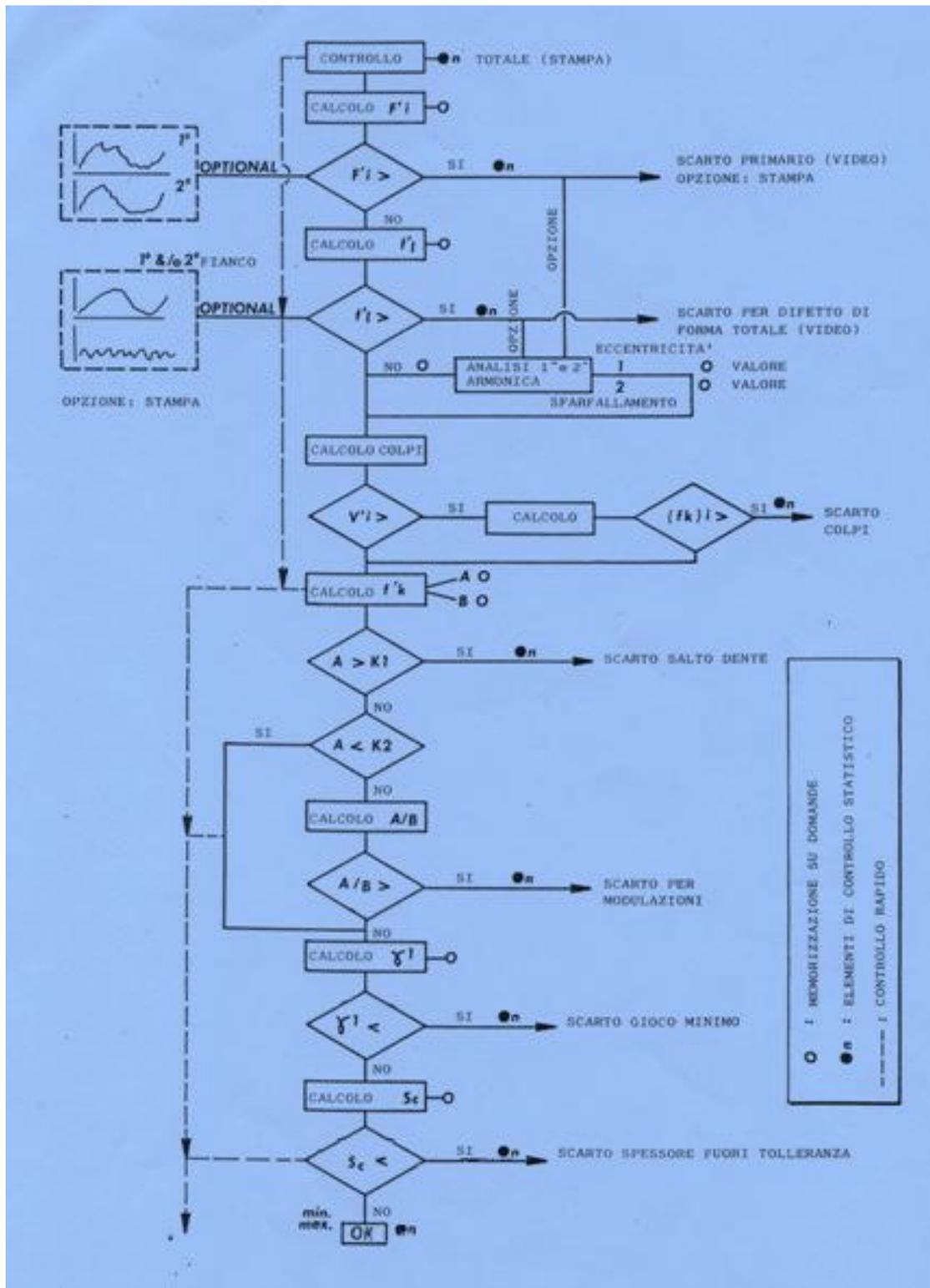


Fig. N°12

Diagrammi degli errori di ingranamento – esempi.

Nelle figure 13, 14, 15, sono riportati degli esempi di grafici degli errori di ingranamento, delle curve filtrate (onda lunga), ondulazioni dei passi singoli (onda corta) e dell'amplificazione degli errori di ingranamento su un dente.

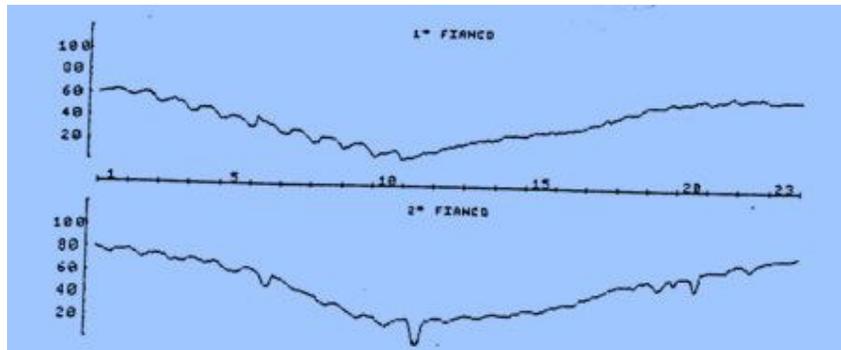


Fig. N. 12 Curve degli errori di ingranamento

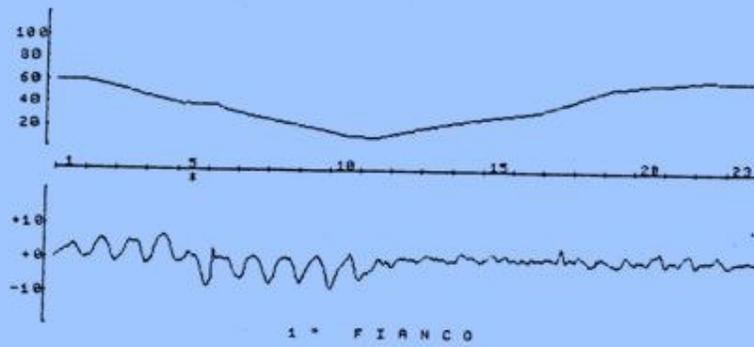


Fig. N. 13 Curva di compensazione ed errori di passo singolo (1° fianco)

Figura N°13

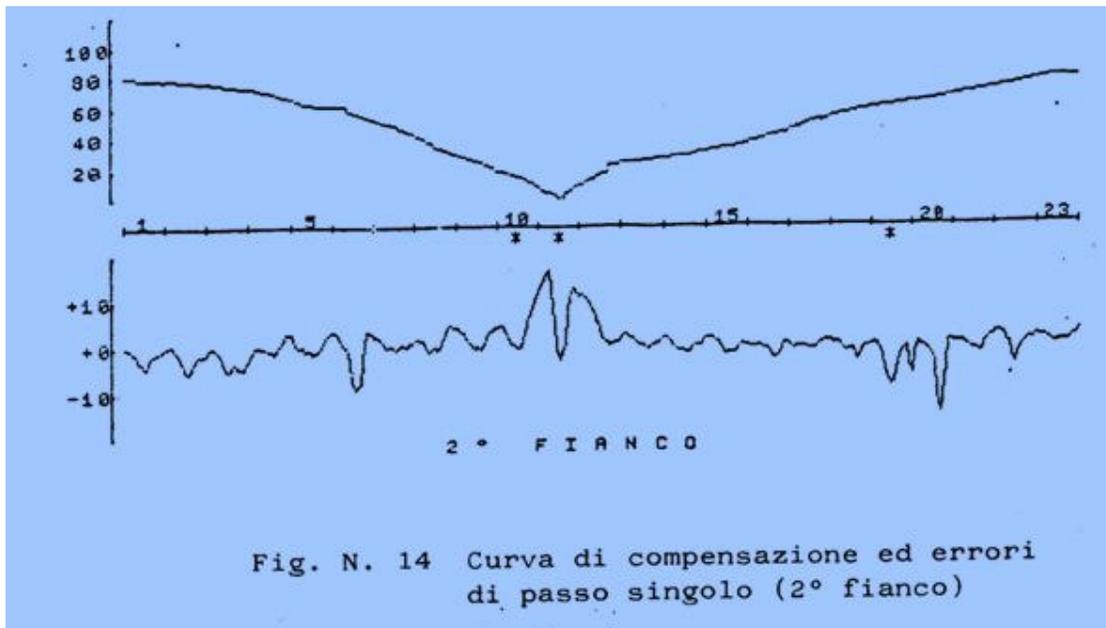


Fig. N. 14 Curva di compensazione ed errori di passo singolo (2° fianco)

Figura N°14

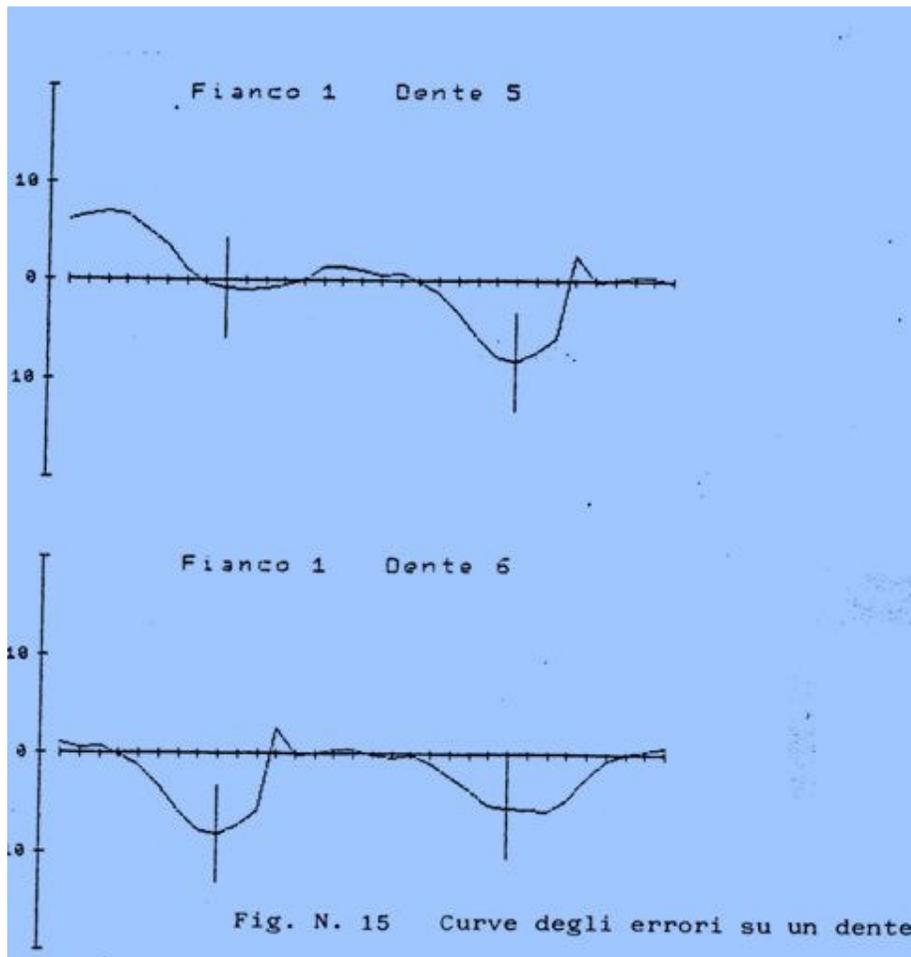


Figura N°15