

CAPITOLO PRIMO

*Introduzione agli ingranaggi conici
ed ai loro metodi di taglio*

01.1 - INFORMAZIONI DI BASE

Nel mondo degli ingranaggi per trasmissioni, il settore degli ingranaggi conici occupa un posto particolare.

Mentre la generazione degli ingranaggi cilindrici è, in un certo senso, più facilmente comprensibile essendo la cinematica utensile-ingranaggio intuibile e rappresentabile con semplici formule matematiche, la formazione degli ingranaggi conici è più complessa e non facile da capire per chi non è esperto del settore.

Si vuole dare qui una panoramica delle diverse metodologie di taglio e della terminologia impiegata nella trattazione della lavorazione degli ingranaggi conici.

Intanto bisogna dire che una coppia di ruote coniche è formata da un **pignone** (la ruota con il minor numero di denti) e una **corona** (l'altra ruota con il maggior numero di denti) e serve per trasmettere il moto da un albero ad un altro che abbia direzione diversa.

Quasi sempre l'angolo tra i due alberi è di 90°, ma può essere anche un angolo diverso. L'uso tipico degli ingranaggi conici è un riduttore di velocità, con l'uscita a 90° rispetto l'asse di entrata (figura N°01.1)



Figura N°01.1

Una trasmissione di questo tipo era molto frequente nel ponte posteriore e nel differenziale delle automobili che un tempo avevano il motore in posizione longitudinale. Da alcuni anni a questa parte una in una discreta parte delle vetture, il motore è in posizione trasversale e la trazione è sull'asse anteriore; quindi la coppia di rinvio ai semiassi utilizza ingranaggi cilindrici. Il difetto di questa disposizione del motore, è per la vettura, un raggio di sterzata ampio, che nelle vetture piccole non ha un gran peso, mentre nelle vetture di più alta gamma, la maneggevolezza diventa un fattore critico. Alcuni Costruttori sono rimasti quindi con la trazione posteriore/motore longitudinale ed altri stanno ora tornando a questa soluzione. Le coppie coniche sono ancora comunemente usate, oltre che dai predetti Costruttori, anche nei veicoli industriali, trattori, macchine movimento terra e in molte trasmissioni per gli usi più disparati.

Nella stragrande maggioranza dei casi delle trasmissioni predette è un particolare tipo di coppia conica: gli assi non si intersecano, ma giacciono su piani diversi: si tratta delle coppie **Ipoidi**. Queste coppie hanno notevoli vantaggi sulle coppie assiali; la più importante è una maggiore capacità di carico a parità di volume.

Gli ingranaggi conici possono essere di diversi tipi. In primo luogo si dividono in ingranaggi **a denti dritti** ed ingranaggi **a denti spirali** (o con generatrice curva) (figura N°01.2).

Gli ingranaggi conici con denti a spirale danno luogo ad un'azione di ingranamento dei denti più graduale, con carico distribuito permanentemente su due o più denti e sono, nel complesso, meno rumorosi. Possono trasmettere una coppia maggiore a parità di dimensioni. Una variante degli ingranaggi conici spirali sono gli *ingranaggi ipoidi*.

Mentre gli ingranaggi rappresentati in figura N°01.2 hanno gli assi che si intersecano e quindi appartengono ad uno stesso piano, gli ingranaggi ipoidi hanno gli assi che non si intersecano (figura N°01.3).

La trasmissione del moto avviene in questo caso con più gradualità (maggiore ricoprimento) e poiché il pignone risulta di diametro maggiore a pari rapporto di trasmissione rispetto ad un ingranaggio conico spirale, si possono quindi trasmettere potenze maggiori.

Si ha però l'inconveniente che si verifica un notevole scorrimento tra le superfici dei denti della corona e quelli del pignone e quindi spesso è consigliabile usare lubrificanti con additivi EP (Extreme Pressure).

Per dare un'idea della complessità di una coppia di ingranaggi conici, è sufficiente considerare la quantità di parametri che definiscono le dentature.

Nella figura N°01.4, sono indicate schematicamente le caratteristiche di una coppia di ingranaggi conici a denti dritti con assi a 90° e nella tabella N°01.1 il significato dei simboli



Figura N°01.2



Figura N°01.3

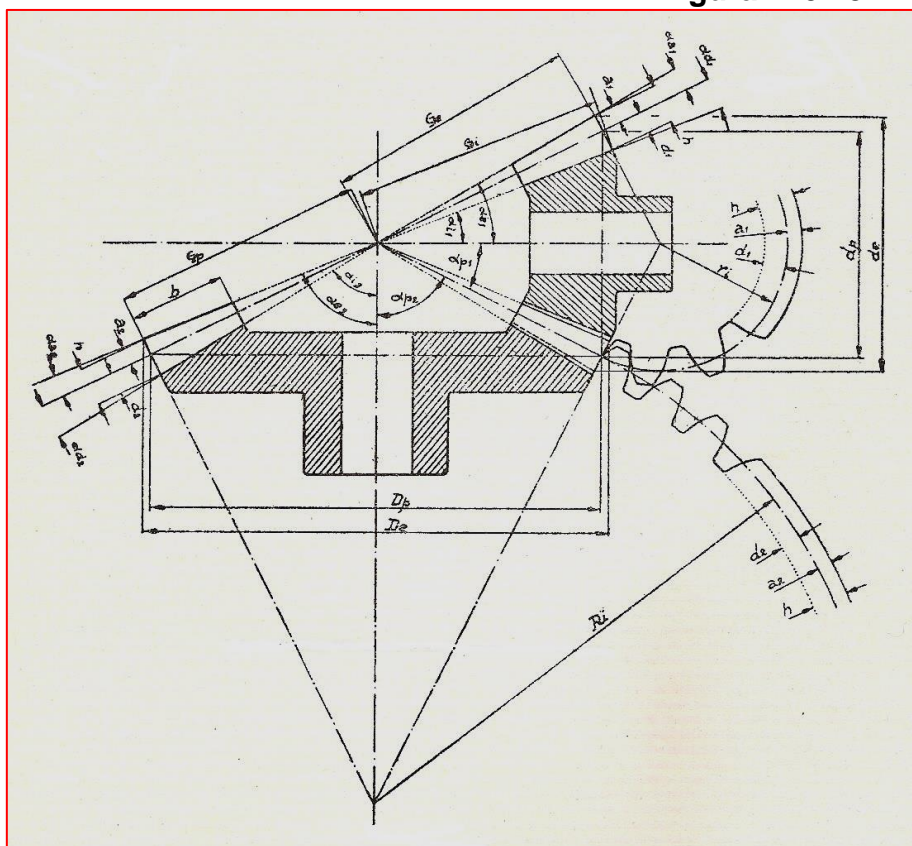


Figura N°01.4

Tabella N°01-1

| Elementi | Pignone | Corona |
|----------------------------|---|---|
| Angolo di pressione | α | |
| Modulo | M | |
| Numero di denti | z | Z |
| Rapporto di trasmissione | $\varphi = \frac{z}{Z}$ | |
| Diametro primitivo | $d_p = z \cdot M$ | $D_p = Z \cdot M$ |
| Angolo primitivo | $\alpha_{p1} \left(\tan \alpha_{p1} = \frac{z}{Z} \right)$ | $\alpha_{p2} \left(\tan \alpha_{p2} = \frac{Z}{z} \right)$ |
| Generatrice primitiva | $G_p = \frac{d_p}{2 \sin \alpha_{p1}} = \frac{D_p}{2 \sin \alpha_{p2}}$ | |
| Raggio immaginario | $r_i = \frac{d_p}{2 \cos \alpha_{p1}} = \frac{r_p}{\cos \alpha_{p1}}$ | $R_i = \frac{R_p}{\cos \alpha_{p2}}$ |
| Numero di denti immaginari | $z_i = \frac{z}{\cos \alpha_{p1}}$ | $Z_i = \frac{Z}{\cos \alpha_{p2}}$ |
| Addendum normale | $a_1 = M$ | $a_2 = M$ |
| Dedendum normale | $d_1 = 1,188 M$ (secondo Gleason) | $d_2 = 1,188 M$ |
| Altezza dente | 2,188 M | |
| Spessore circolare normale | $s_p = S_p = \frac{\pi M}{2}$ | |
| Angolo addendum | $\alpha_{a1} \left(\tan \alpha_{a1} = \frac{a_1}{G_p} \right)$ | $\alpha_{a2} \left(\tan \alpha_{a2} = \frac{a_2}{G_p} \right)$ |
| Angolo dedendum | $\alpha_{d1} \left(\tan \alpha_{d1} = \frac{d_1}{G_p} \right)$ | $\alpha_{d2} \left(\tan \alpha_{d2} = \frac{d_2}{G_p} \right)$ |
| Angolo esterno | $\alpha_{e1} = \alpha_{p1} + \alpha_{a1}$ | $\alpha_{e2} = \alpha_{p2} + \alpha_{a2}$ |
| Angolo interno | $\alpha_{i1} = \alpha_{p1} - \alpha_{a1}$ | $\alpha_{i2} = \alpha_{p2} - \alpha_{a2}$ |
| Diametro esterno | $d_e = d_p + 2a_1 \cos \alpha_{p1}$ | $D_e = D_p + 2a_2 \cos \alpha_{p2}$ |
| Generatrice esterna | $G_e = \frac{G_p}{\cos \alpha_{a1}} = \frac{a_1}{\tan \alpha_{a1}}$ | $G_e = \frac{G_p}{\cos \alpha_{a2}} = \frac{a_2}{\tan \alpha_{a2}}$ |
| Generatrice interna | $G_i = \frac{G_p}{\cos \alpha_{d1}} = \frac{a_1}{\tan \alpha_{d1}}$ | $G_i = \frac{G_p}{\cos \alpha_{d2}} = \frac{a_2}{\tan \alpha_{d2}}$ |

Il modulo nominale dell'ingranaggio è quello che moltiplicato per il numero di denti dà il diametro primitivo dal lato esterno, questo secondo la geometria Gleason con denti a doppia conicità. La Oerlikon considera invece il diametro primitivo a metà della fascia dentata per la sua geometria con un dente ad altezza costante.

Se poi si considera una coppia conica spirale c'è un ulteriore elemento di complessità relativo all'elica della dentatura.

Ne risulta che lo studio dell'utensile che deve generare la dentatura conica elicoidale deve tener conto sia della geometria dell'ingranaggio, ma anche del posizionamento relativo tra ingranaggio e utensile sulla macchina.

Nella figura N°01.8, per esempio, è indicato lo spostamento che deve avere la fresa rispetto al centro dell'ingranaggio, spostamento che dipende oltre che dalla geometria del dente anche dal diametro della fresa.

I dati necessari per costruire la fresa e le impostazioni sulla macchina, sono riepilogati in tabelle denominate “summary” che vengono fornite dai programmi di calcolo Gleason, se si usano macchine di questa ditta per tagliare gli ingranaggi.
Gli ingranaggi conici hanno generalmente il fondo dente con larghezza variabile, così come è variabile lo spessore e l’altezza del dente.

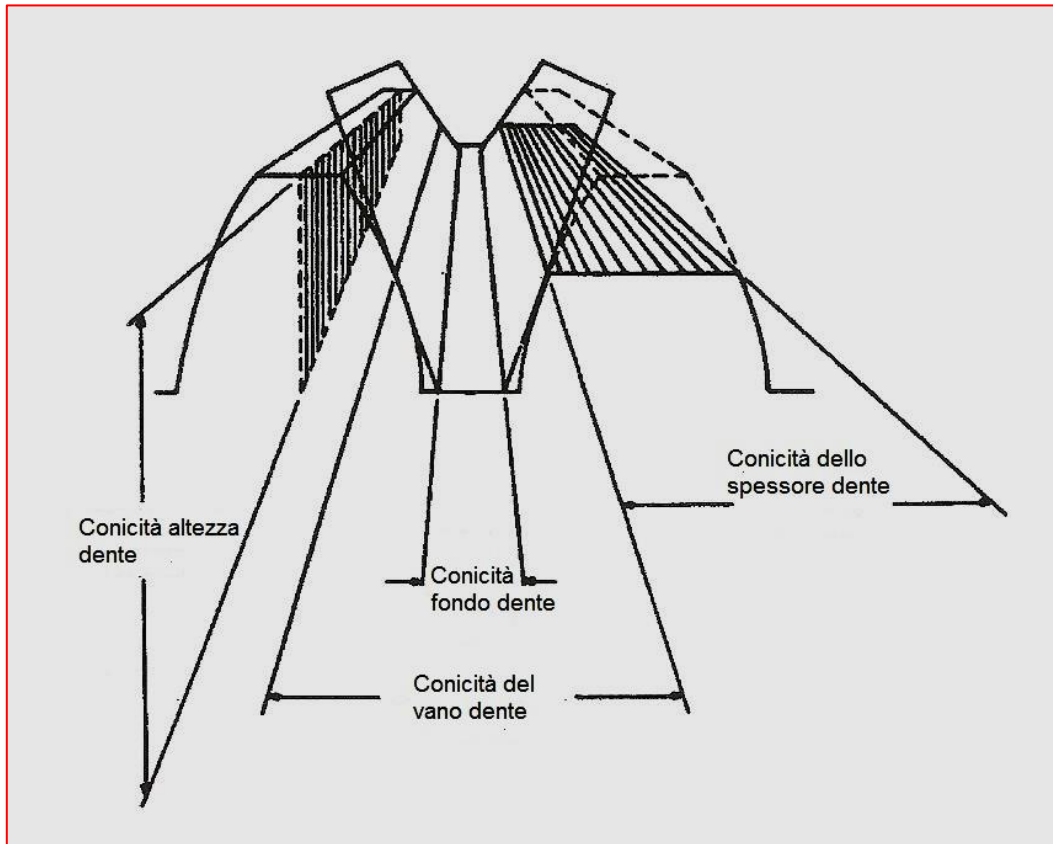
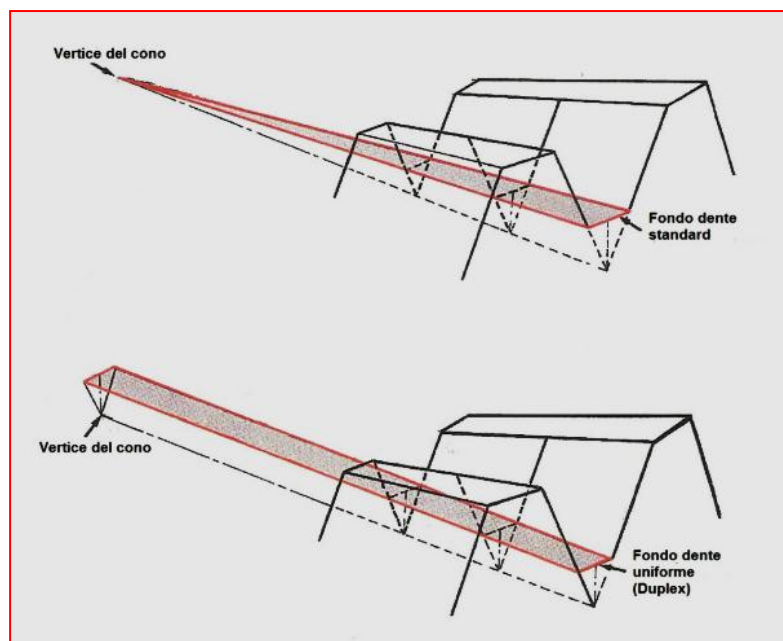


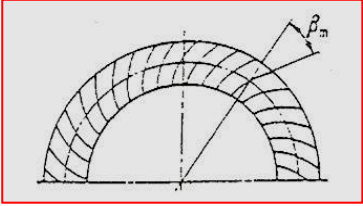
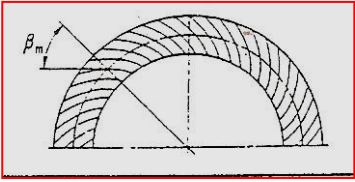
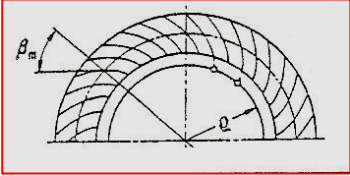
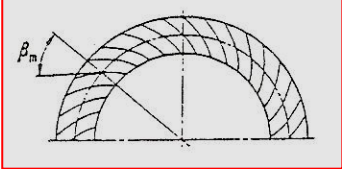
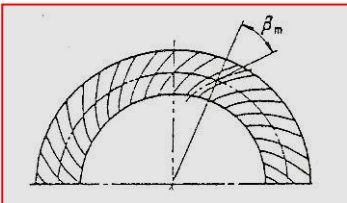
Figura N°01.5

E' prevista una speciale correzione delle conicità denominata dalla Gleason “tilted root angle” o «Duplex Taper» che rende di larghezza uniforme il fondo dente.
Con questa operazione il vano dente risulta più ampio nella zona di fondo, con la possibilità quindi di utilizzare utensili da taglio o rettifica, aventi punte più consistenti, con ovvio vantaggio sulla vita utensile.

Figura N°01.6



Vari tipi di geometrie per ruote coniche a dentatura elicoidale

| | |
|--|---|
| <p><u>Gleason</u></p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Direttrice: Arco di cerchio (spirale) ➤ Spessore trasversale, altezza del dente e vano rastremati verso il vertice del cono. Doppia conicità ➤ Angolo della spirale da 0° (dentatura Zerol) fino a circa 45°; normalmente circa 35°. |
| <p><u>Oerlikon – Spiromatic</u></p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Direttrice: Epicicloide ➤ Altezza del dente costante ➤ Dentatura N: il modulo normale è massimo al centro del dente e si riduce verso i due lati. Angolo di spirale in genere compreso tra 30° e 50° ➤ Dentatura G: angolo della spirale da 0° fino a circa 50°. |
| <p><u>Klingelberg – Palloid</u></p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Direttrice : Evolvente ➤ Altezza di dente costante ➤ Passo e spessori normali ➤ Angolo della spirale normalmente 35° – 38° ➤ Superficie leggermente sfaccettata (provocata dalle sezioni involuppo del creatore conico) |
| <p><u>Klingelberg - Zyclo – Palloid</u></p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Direttrice: Epicicloide ➤ Altezza dei denti costante ➤ Modulo e passo normali secondo l'angolo della spirale rastremati fino a quasi costanti. ➤ Angoli della spirale da 0° fino a circa 45° |
| <p><u>Modul – Kurvex</u></p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Direttrice: Arco di cerchio ➤ Altezza del dente costante o rastremata ➤ Angoli della spirale da 25 a circa 45° |

01.2 – Metodi di produzione degli ingranaggi conici

01.2.1 Alcune classificazioni delle ruote coniche:

Angolo tra gli assi

Angolo tra gli assi = 90°

Angolo tra gli assi minore di 90°

Angolo tra gli assi maggiore di 90°

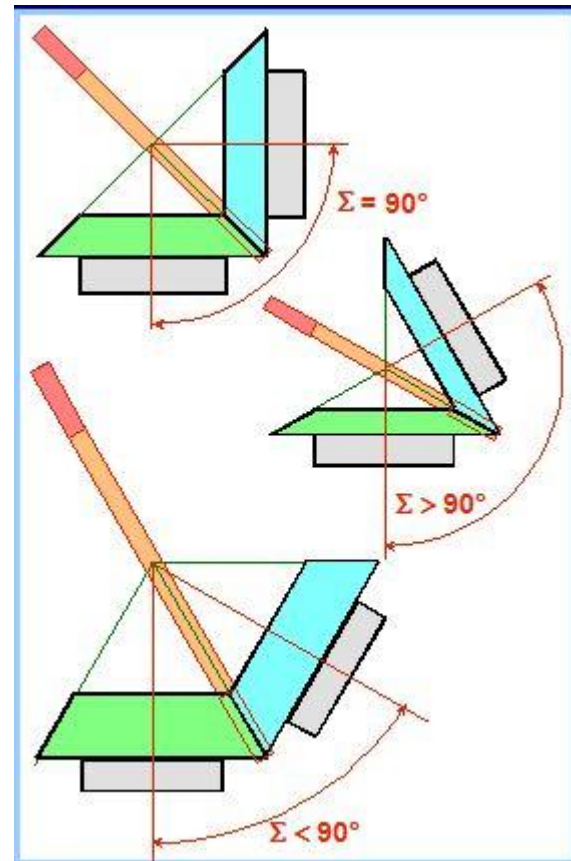


Figura N° 1.7

Altezza del dente

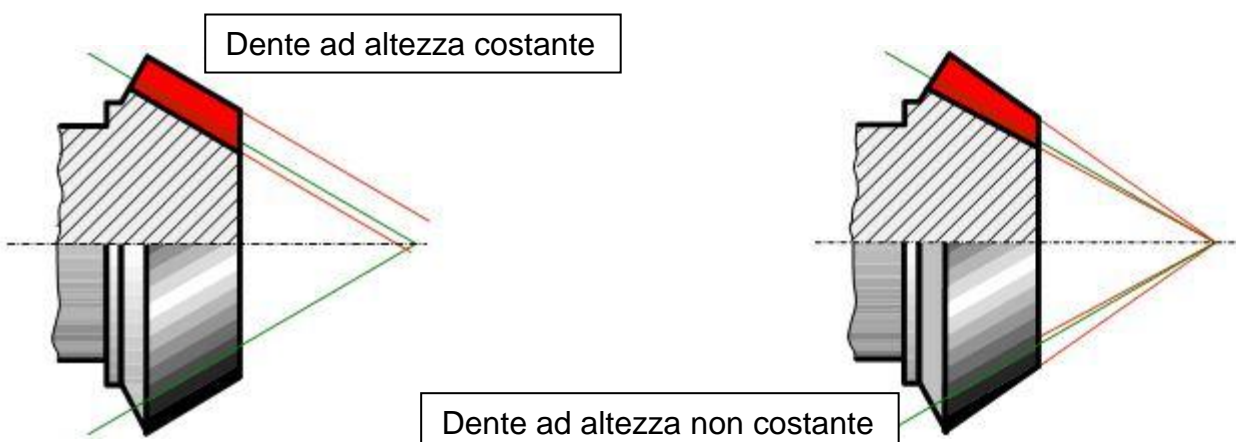


Figura N°1.8

Curvatura longitudinale del dente

Arco di cerchio

Epicycloide

Evolvente

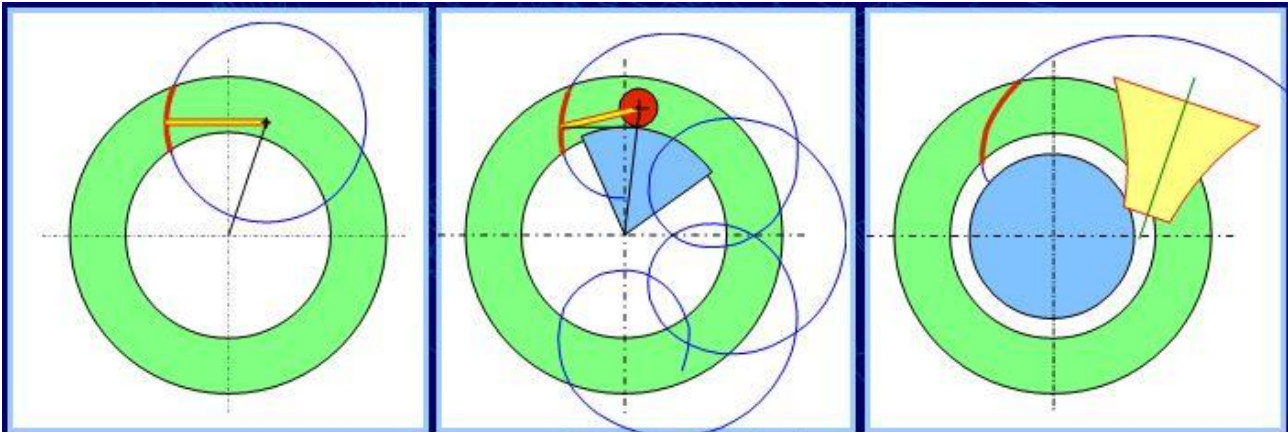


Figura N°1.9

Sistema di index: ovvero successione nel tagliare i vani dei denti:

Metodo continuo: tutti i vani vengono tagliati assieme = Face Hobbing

Metodo discontinuo: i vani vengono tagliati uno per volta = Face Milling

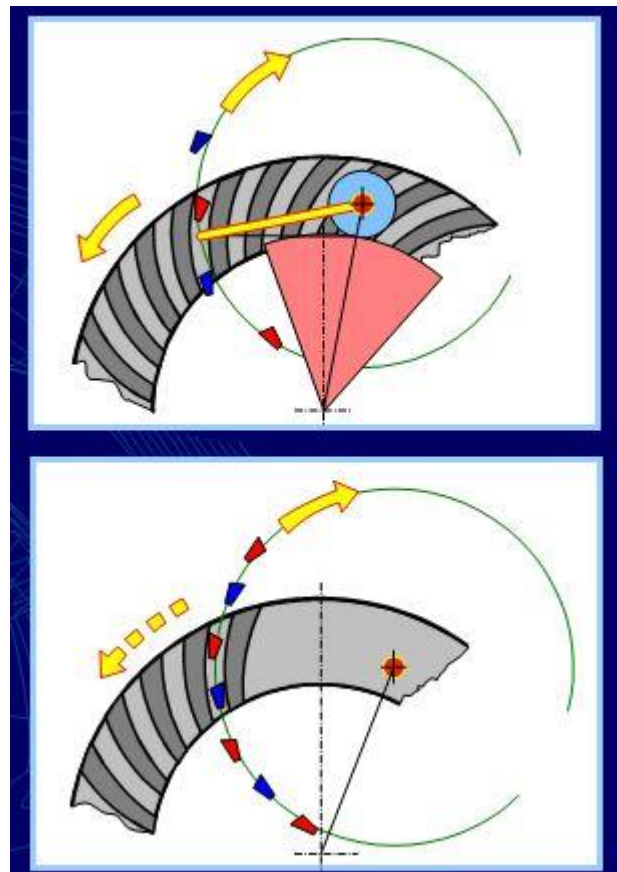
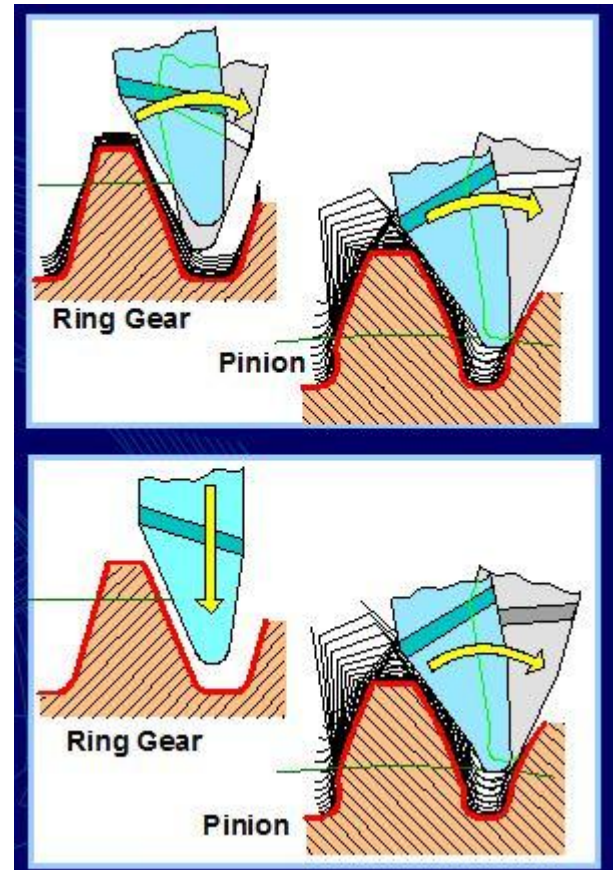


Figura N°1.10

Metodo di taglio:

Pignone e corona "generati"



Pignone generato e Corona "formato"
 Ovvero con utensile di forma = Formate

Figura N°1.11

Tabella di confronto tra metodi Face Milling e Face Hobbing:

| Face Milling o indexaggio singolo | Face hobbing o indexaggio continuo |
|---|---|
| Spread blade (o fixed setting o five cut) | Metodo Completing |
| 2 operazioni di taglio per la corona | |
| Sgrossatura | 1 operazione di taglio per membro |
| Finitura | |
| 3 operazioni di taglio per il pignone | È sufficiente una sola macchina |
| Sgrossatura | Minori operazioni di carico/scarico |
| Finitura lato di rilascio (fianco concavo) | Minore necessità di spazio |
| Finitura lato di tiro (fianco convesso) | Maggiore flessibilità in produzione |
| | |
| Duplex: | |
| Metodo completing per pignone e corona | |
| È sufficiente una sola macchina | |
| Minori operazioni di carico/scarico | |
| Minore necessità di spazio | |
| Maggiore flessibilità in produzione | |
| | |

Face Milling

sistema di indexaggio

Face Hobbing

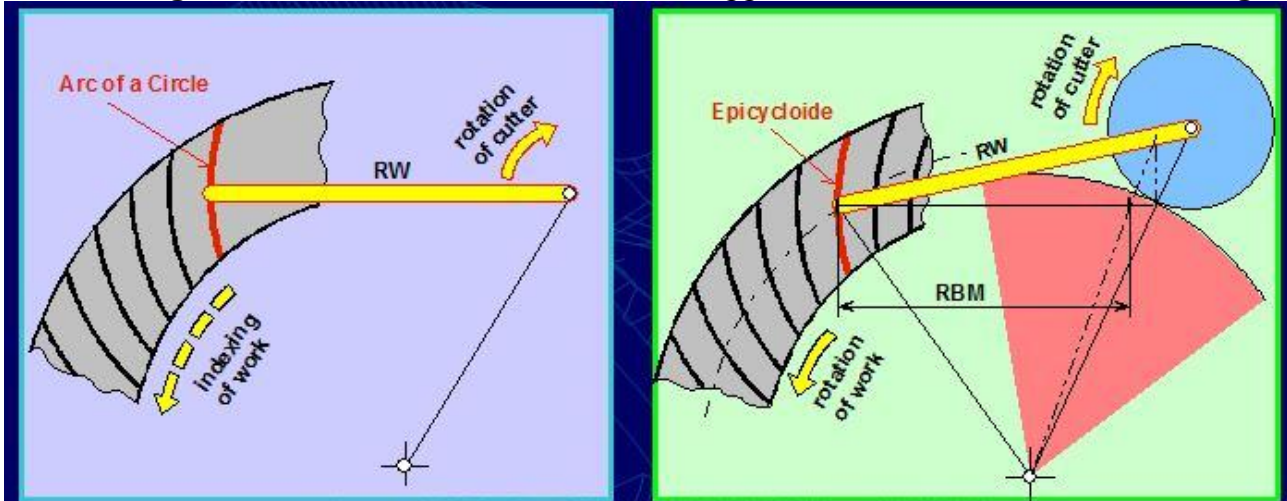


Figura N°1.12

Ciascun vano è tagliato successivamente al precedente
 Curvatura longitudinale:
 Arco di cerchio (raggio costante)

Tutti i vani sono tagliati simultaneamente
 Epicicloide allungata (raggio non costante)

Face Milling

sistema di indexaggio

Face Hobbing

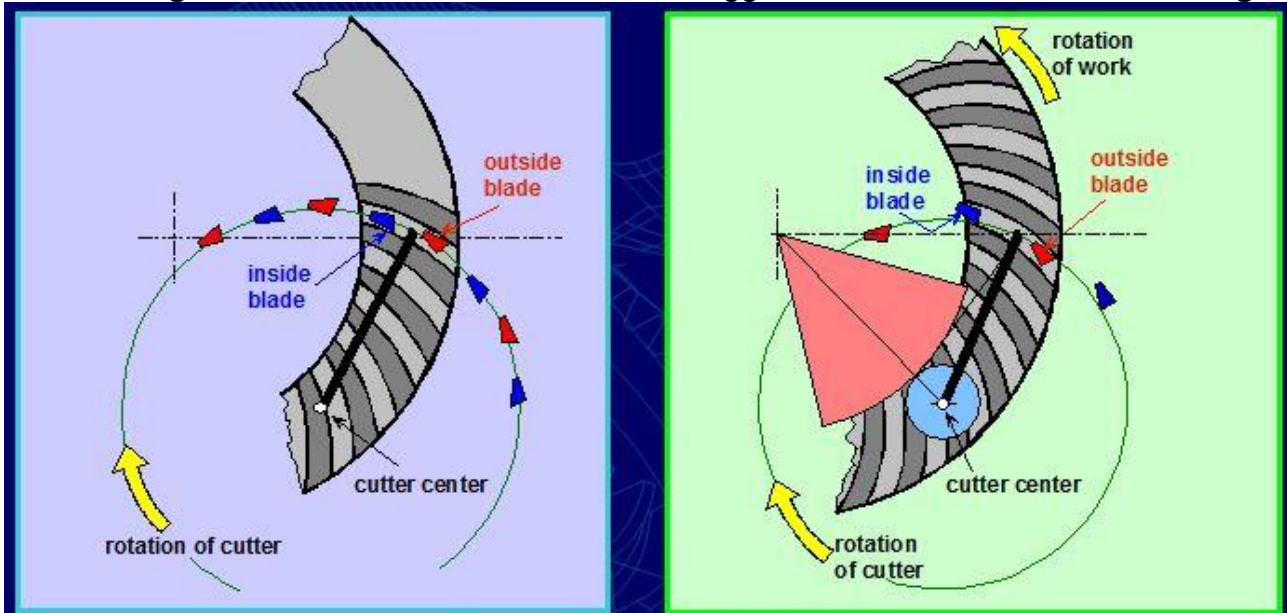


Figura N°1.13

I raggi della lama esterna (OB) e della lama interna (IB) sono diversi

I raggi delle lame esterna ed interna sono identici teoricamente

Face Milling

sistema di indexaggio

Face Hobbing

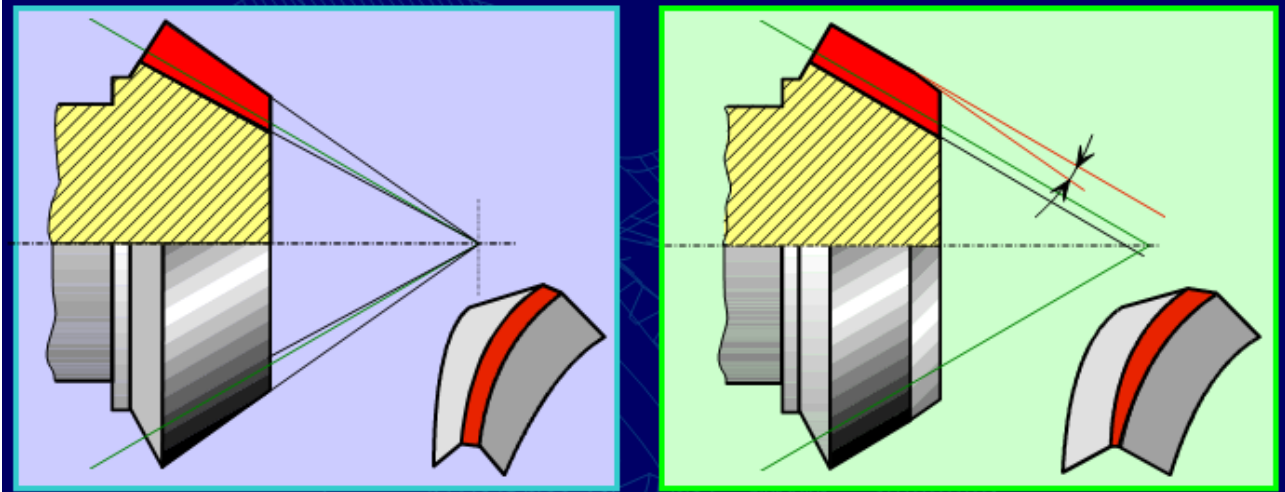


Figura N°1.14

L'altezza dente è rastremata.
Il piano di testa (topland) è costante

L'altezza dente è costante.
Il topland diminuisce da tallone a punta

Face Milling

sistema di indexaggio

Face Hobbing

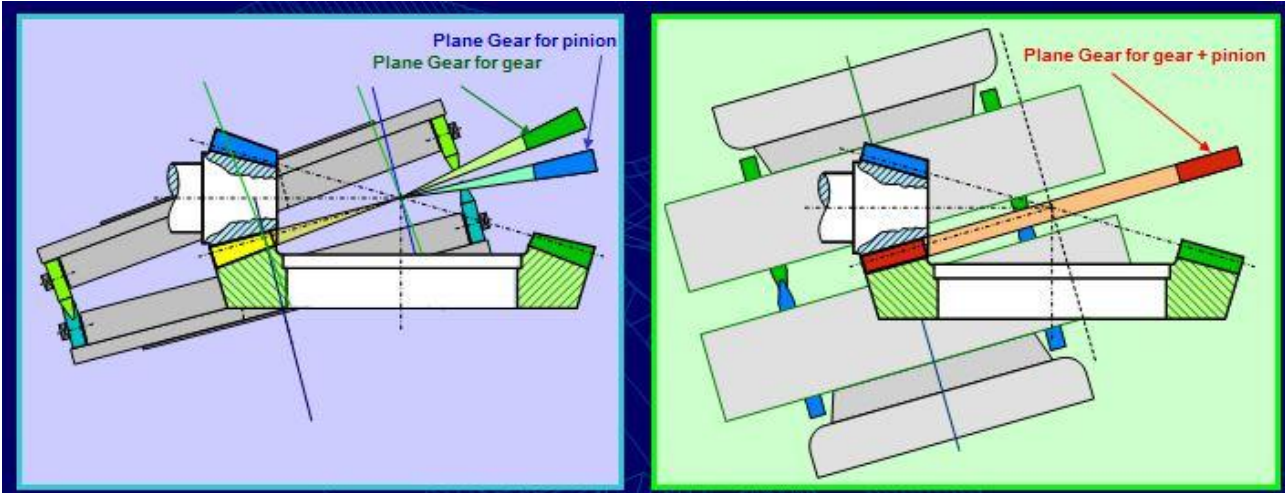


Figura N°1.15

Le ruote piane generanti sono diverse tra pignone e corona.
Gli assi delle ruote piane non coincidono; altezza dente non costante.

Le ruote piane generanti sono teoricamente identiche per pignone e corona.
Gli assi delle ruote piane coincidono; altezza dente costante

Face Milling

sistema di indexaggio

Face Hobbing

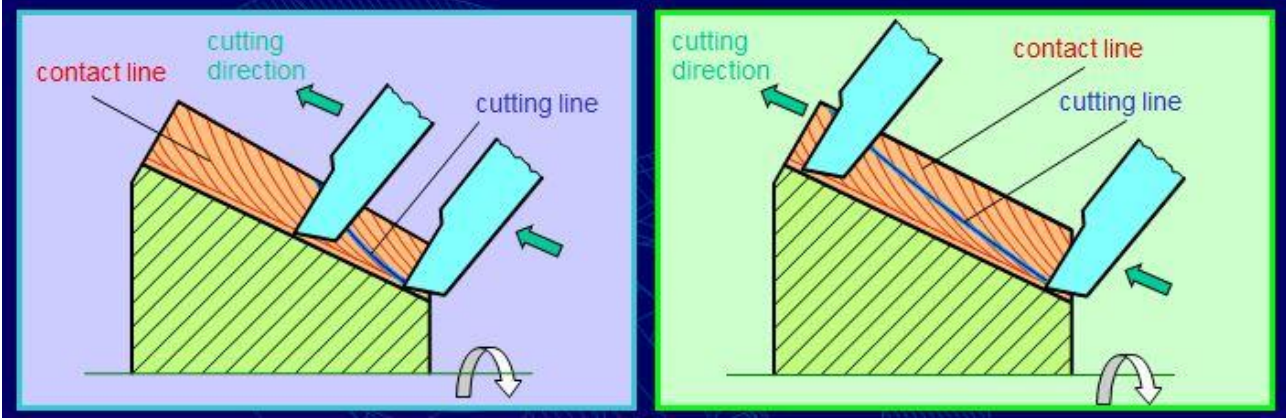


Figura N°1.16

Le linee generate dall'utensile sono parallele (coincidono) con le linee di contatto.
Le linee di taglio sono più corte che non in Face Hobbing.
Con notevoli avanzamenti le linee di taglio appaiono come piani (sfaccetta mento)

Le linee generate dall'utensile sono incrociano le linee di contatto con un certo angolo.
Le linee di taglio sono più lunghe che non in Face Milling.
Con notevoli avanzamenti le linee di taglio appaiono come piani (sfaccetta mento)

Face Milling

Linee di contatto

Face Hobbing

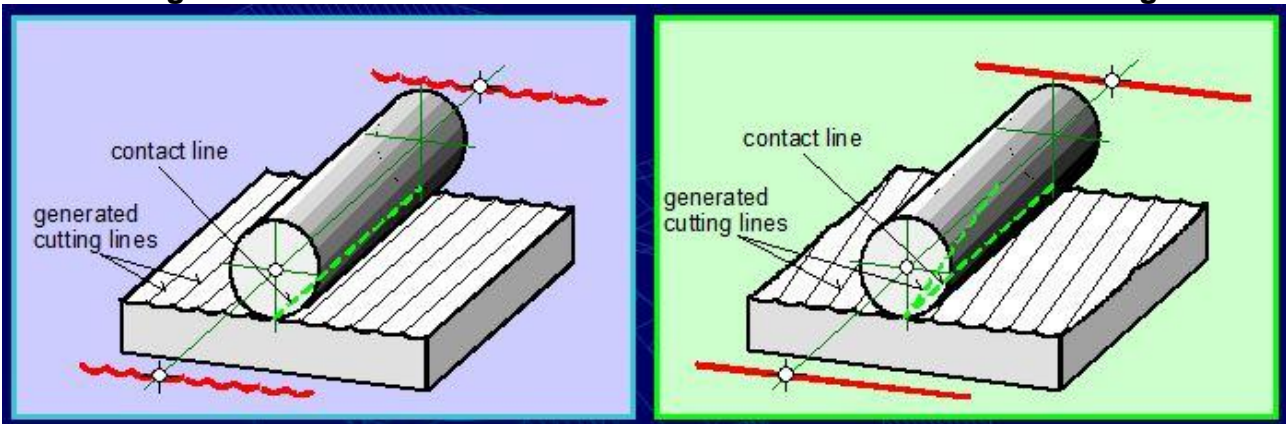


Figura N°1.17

I segni di avanzamento (generati dalle linee di taglio) sono paralleli alle linee di contatto.
L'affilatura ed il posizionamento delle lame è critico per un buon rotolamento senza generazione di rumore

I segni di avanzamento (generati dalle linee di taglio) non sono paralleli alle linee di contatto.
Si possono utilizzare tolleranze di posizione delle lame più larghe, senza problemi di rotolamento.

Taglio con il metodo Face Milling

Il Face Milling è un metodo di taglio discontinuo, ovvero si taglia completamente un vano dente e poi si passa al vano dente successivo.

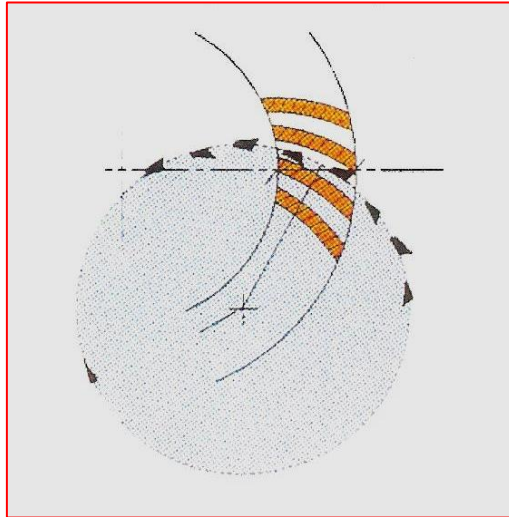


Figura N°01.18

La fresa è posizionata scenterata rispetto al centro del pezzo dei valori $O'A$ e $O'B$, in modo che il diametro medio della fresa sia tangente al fianco del dente, cioè abbia un'inclinazione dell'angolo β nel punto medio del dente. (figura N°01.19).

Si precisa che l'angolo di spirale nominale è quello presente a metà della fascia dentata per gli ingranaggi conici spirali; in realtà si tagliano archi di circonferenza che sono particolari tipi di spirale.

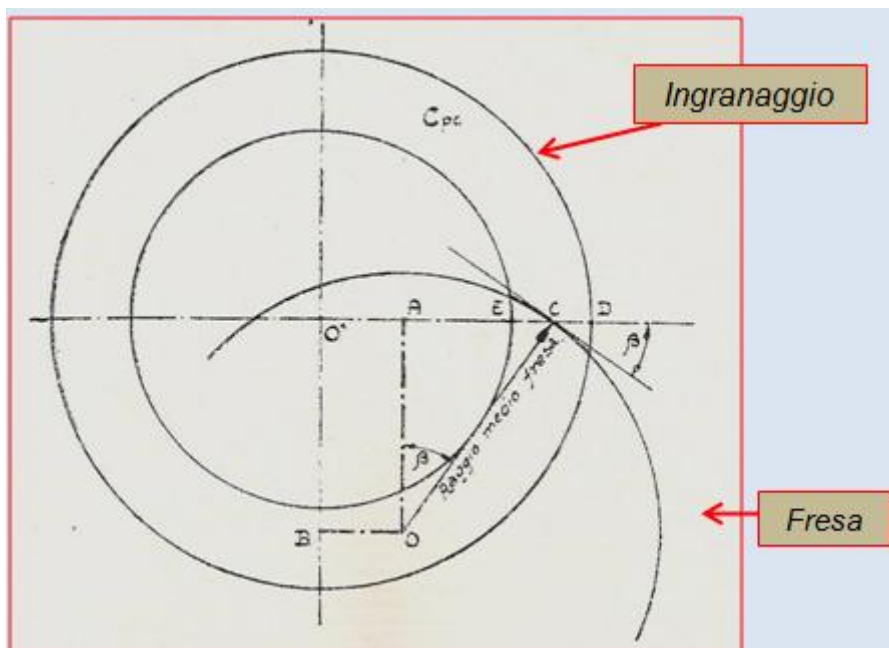


Figura N°01.19

Taglio con il metodo Face Hobbing

L'altro metodo usato per la produzione di ingranaggi conici spiroidali è il Face Hobbing, che è un metodo di taglio in continuo.

Il pezzo ruota in sincronia con l'utensile in modo che i denti della fresa ingranino con i denti del pezzo analogamente come succede nella dentatura di ingranaggi cilindrici con il creatore. Nella figura N°01.20 è rappresentato schematicamente questo sistema.

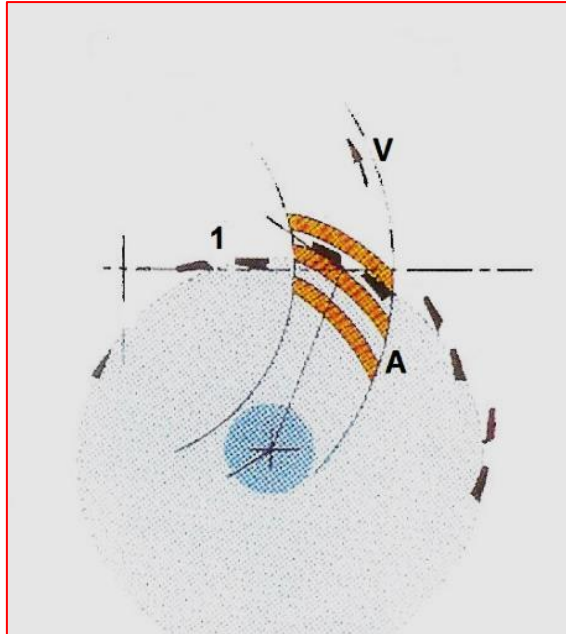


Figura N°01.20– Metodo di taglio Face Hobbing

Mentre il pezzo ruota nella direzione V, l'utensile, dopo aver tagliato un vano con una serie di taglienti, entra con un'altra serie di taglienti (1) nel vano seguente (A).

I taglienti della fresa quindi **non** sono disposti su una circonferenza coincidente con il centro di rotazione, ma **su spirali** come si vede chiaramente nella figura N°01.21 che rappresenta una fresa Gleason con lame del tipo Pentac FH® per il taglio con metodo Face Hobbing.



Figura N°01.21 – Fresa per Face Hobbing della Gleason, con lame Pentac®

La lavorazione con il sistema Face Milling comprende due metodi:

- Metodo "Formate"
- Metodo "Generate"

Con il **metodo Formate** si lavora con una fresa di forma. Viene adottato per dentare esclusivamente le corone, queste possono comunque essere tagliate anche con metodo "Generate". Eventuali errori su una lama non influiscono molto sulla qualità della superficie generata, perché su ogni vano passano tutti i denti della fresa che hanno tutti la sagoma del vano da generare. Il metodo, molto produttivo, si applica a coppie di ingranaggi conici spirali con rapporto superiore a 1:2.5

Con il **metodo Generate** si lavora per generazione (analogamente a quanto avviene con il creatore per ruote elicoidali). I denti della fresa rappresentano un dente della ruota piana generante, che rotolando con il pignone o la corona ne genera i vani dente. Eventuali errori su una lama provocano un errore sul fianco dente dell'ingranaggio, perché ogni lama genera un tratto di profilo del dente e quindi, in caso di errore sulla lama si avrebbe un errore su un tratto del profilo del dente.

01.2.1 Ingranaggi conici a denti diritti

Sono gli ingranaggi conici più semplici e tuttora i più usati. Hanno una impronta di contatto lineare lungo tutta la generatrice del dente; Gleason ha introdotto il metodo "Coniflex" che genera una bombatura longitudinale: questa permette migliore insensibilità ai disallineamenti.

Per le ruote da differenziale (le più diffuse) poiché normalmente non girano, ma trasmettono solo coppia, Gleason propone un metodo di taglio "Revacycle" molto produttivo, essendo sostanzialmente una brocciatura. Tuttavia si sta affermando anche lo stampaggio in net shape che permette di ottenere la superficie dei denti finita di stampo.

Metodi di taglio: sempre un dente alla volta, tipo face milling, con macchine Coniflex Gleason 102, 104, 114, oppure con macchine Modul. Per alta produttività macchina Gleason Revacycle.

Metodi più aggiornati Gleason Coniflex plus, in pratica Coniflex su macchina CNC, ma con utensile a barrette in metallo duro. con diversi posizionamenti di una sola fresa a dentatura radiale (al posto della coppia di lame Coniflex, realizzata con carbide stick blades, oppure Oerlikon Hypoflex, realizzato con frese circolari composte da carbide stick blades mediante interpolazione di assi su macchina CNC.

Prima di esaminare i tipi di utensili utilizzati per il taglio delle coppie coniche, dobbiamo precisare che il posizionamento della fresa, con il principio illustrato in figura N°8 deve essere integrato da un corretto posizionamento assiale del pezzo rispetto alla fresa. Ogni errore in questo set-up comporta un errore sul profilo o sulla spirale.

Gli errori di questo genere provocano un contatto non corretto tra le superfici dei denti della corona e del pignone.

Ma bisogna considerare che il contatto ideale, cioè quello che assicura la massima silenziosità e la massima efficienza dell'accoppiamento, deve avvenire sotto carico, con gli ingranaggi trattati termicamente.

I denti degli ingranaggi sotto carico si deformano, esattamente come avviene negli ingranaggi cilindrici, e quindi varia la zona di contatto.

Per avere un contatto corretto sotto carico è necessario quindi eseguire gli ingranaggi con profili e spirali che compensino le deformazioni sotto carico.









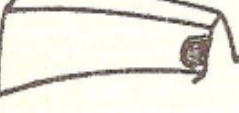
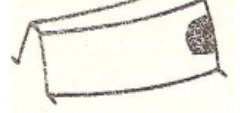
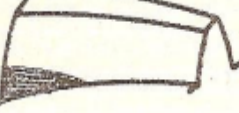


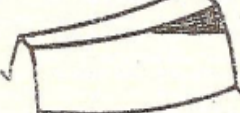
Esistono dei software molto sofisticati che in base al carico e alle caratteristiche della coppia conica determinano a tavolino queste compensazioni, ma più frequentemente viene fatto un controllo con un tester che lavora sotto debole carico e si esamina la traccia del contatto, traendo da queste le correzioni da applicare per riportare i contatti in zona ottimale.

In base al tipo di contatto si fanno le dovute correzioni del set up, oggi molto facilitato sulle macchine a Controllo Numerico.

Nella tabella N°01.2 sono illustrati i tipi di contatto possibili ed il tipo di regolazione da fare.

Se l'ingranaggio non subisce operazioni di finitura dopo il trattamento termico, cioè rettifica dei denti o ripassatura con frese in metallo duro, bisogna considerare le deformazioni dovute al trattamento termico e anche in questo caso dovranno essere modificati i profili e le spirali ottenute nel processo di dentatura in modo da pre-correggere queste deformazioni.

Tabella N°01.2

| <i>Fianco concavo</i> | <i>Fianco Convesso</i> | <i>Azione</i> |
|---|---|--|
|  |  | <i>Contatto buono</i> |
|  |  | 1) <i>Avvicinare la corona o il pignone al vertice</i> |
|  |  | 2) <i>Allontanare la corona o il pignone dal vertice</i> |
|  |  | 3) <i>Aumentare lo spostamento verticale</i> |
|  |  | 4) <i>Diminuire lo spostamento verticale</i> |
|  |  | 5) <i>Azioni combinate 2) e 3)</i> |
|  |  | 6) <i>Azioni combinate 3) e 4)</i> |

Scelta del diametro della fresa

Il diametro medio della fresa è scelto in base alle caratteristiche della dentatura da eseguire ed in particolare bisogna considerare il modulo, l'altezza del dente da eseguire, la massima larghezza della fascia dentata.

Il diametro medio della fresa non è strettamente vincolante, nel senso che ha una certa possibilità di variazione.

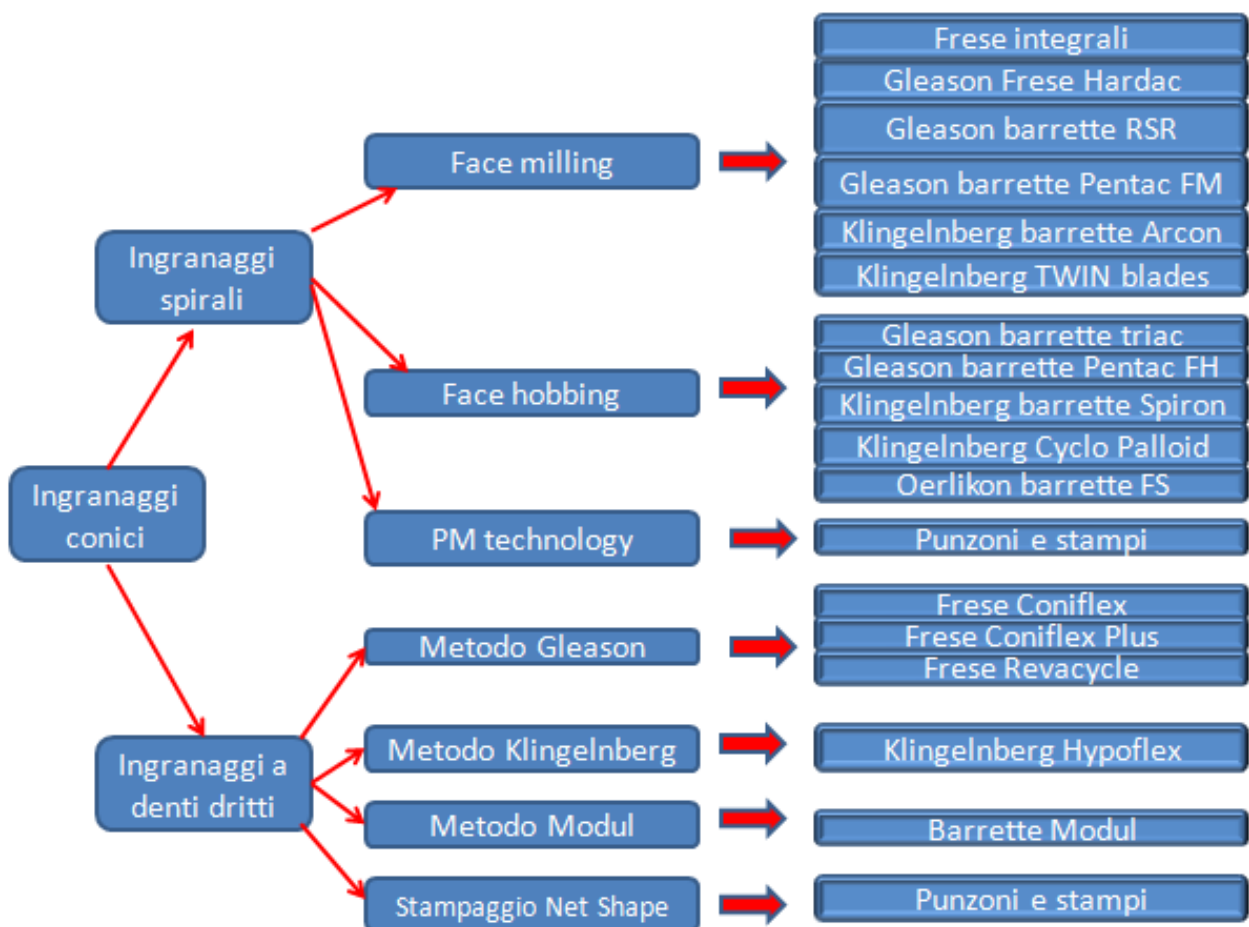
Nella tabella N°01.3 sono riportate a titolo indicativo i diametri delle frese in base alle caratteristiche degli ingranaggi.

Tabella N°01.3

| Diametro medio della fresa | 1 1/16" | 1 1/2" | 2" | 3 1/2" | 6" | 7 1/2" | 9" | 12" | 18" |
|----------------------------|---------|--------|-----|--------|----|--------|----|-----|-----|
| Max modulo (mm) | 1,75 | 2,5 | 2,5 | 4,5 | 5 | 7 | 7 | 10 | 10 |
| Max altezza del dente (mm) | 3,5 | 5 | 5 | 9 | 10 | 14 | 14 | 20 | 20 |
| Max larghezza fascia (mm) | 6 | 8 | 10 | 20 | 32 | 38 | 45 | 65 | 100 |

I recenti software di calcolo degli ingranaggi conici, tra i quali i più diffusi di origine Gleason e Klingelberg, hanno diverse scelte per il diametro dell'utensile: ovvero per gli ingranaggi conici spirodali, il software calcola il diametro ottimale, ma chi esegue il calcolo può entro certi limiti modificarlo; per gli ingranaggi ipoidi invece il diametro fresa è un dato di input.

01.3 - Riepilogo dei principali sistemi per produrre gli ingranaggi conici



01.4 *La finitura degli ingranaggi conici*

L'operazione di fresatura dei vani delle dentature coniche, è seguita da trattamenti termici che servono ad esaltare le caratteristiche dei vari acciai utilizzati per costruire gli ingranaggi.

Come per quasi tutti gli organi meccanici, soggetti a carichi alterni e/o a contatto con altri organi con cui si scambiano sforzi, esistono due scuole di pensiero per il trattamento termico/sceita dei materiali da costruzione: una è la scuola americana che sceglie materiali ad alto contenuto di carbonio, basso legati, per una tempra superficiale; mentre la scuola europea sceglie materiali alto legati, a basso carbonio per carbo-cementazione. Nei due casi il dimensionamento è diverso in quanto diversi sono i limiti di fatica delle due famiglie di materiali.

In Europa si preferisce progettare elementi di macchina di caratteristiche tirate e dimensioni contenute, sfruttando anche lo stato di coazione elastica indotto dalla carbo-cementazione per aumentare il limite di fatica a bending della dentatura.

In ogni caso un trattamento termico che determina passaggi di fase dei materiali, non può non deformare i componenti stessi; quindi dopo il trattamento termico, molto spesso i pignoni per la loro forma a fungo, vengono raddrizzati e talvolta anche le corone; i diametri sede di cuscinetto vengono portati per rettifica o tornitura alle dimensioni che il progettista ha determinato per il corretto posizionamento degli elementi volventi

01.4.1 *finitura di lappatura*

Sia le coppie coniche ottenute per Face Hobbing, che quelle per Face Milling, vengono lappate: questa operazione, ottenuta con particolari macchine, chiamate lappatrici, prevede che pignone e corona rotolino assieme sotto una moderata coppia; Un lapping compound (olio ed abrasivo) viene pompato tra i denti in presa che rotolano in varie posizioni reciproche: in questo modo, alcuni centesimi di materiale superficiale vengono asportati in zone preventivamente determinate.

I due pezzi compongono ora una coppia non più intercambiabile, in quanto si sono adattati le superfici a vicenda, compensando così le distorsioni indotte dal trattamento termico.

Un'ulteriore verifica fatta su una macchina chiamata tester determina la posizione reciproca di pignone e corona, dove gli errori di trasmissione sono minimi e quella sarà la posizione da rispettare anche nel montaggio per avere il minore rumore di rotolamento.

01.4.2 *Finitura di rettifica*

Modernissime rettificatrici CNC sono in grado di rettificare le superfici dei vani dei denti nel solo caso di Face Milling; le superfici vengono verificate con macchine di misura tridimensionale opportunamente adattate per esplorare la topografia del dente.

Le rettificatrici sono in grado di riprodurre e mantenere topografie nel campo di pochi micron e così pure lo spessore dente.

A questo punto è sufficiente una misura di tipo statistico della topografia dei denti e quindi le due produzioni di pignoni e corone, procedono parallelamente, per arrivare al montaggio, dove random possono essere montate senza verifica della posizione di montaggio.

01.4.3 *Finitura per hard finishing.*

Nel caso di Face Hobbing è possibile recuperare le deformazioni di trattamento termico, attraverso l'hard skiving, ovvero con una fresa che monta utensili in metallo duro, è possibile tagliare per una profondità di 0.1 mm e togliere così le distorsioni.

Questo metodo è particolarmente delicato e si applica a grandi coppie che non è possibile rettificare.

Quanto sopra è di semplice informazione a completamento della trattazione sulle coppie coniche, ovviamente non è esaustivo né completo di tutte le problematiche produttive della produzione di coppie coniche.