

### Condizioni di lavoro nella dentatura con creatore

Poiché il rendimento del creatore dipende da un numero molto grande di variabili che, a volte, interagiscono tra loro, è praticamente impossibile dare delle informazioni esatte sulla velocità di taglio, sull'avanzamento per giro pezzo, sul valore dello shifting e sul numero di pezzi che si può fare in una determinata operazione.

La casistica è talmente ampia che non è possibile, oggi, dare una legge matematica per fissare i parametri di taglio fondamentali, ed allora bisogna accontentarsi di considerazioni di carattere generale che possono orientare l'utilizzatore verso una prima scelta delle condizioni di lavoro, condizioni che dovranno essere poi affinate con una serie di prove pratiche.

In primo luogo dobbiamo decidere quale è il metodo per stabilire il rendimento di un creatore.

Non è esatto parlare solo di numero pezzi dentati per ogni affilatura, perché i pezzi possono avere pochi o tanti denti, possono avere una fascia dentata larga o stretta. E' più giusto parlare di lunghezza di dentatura eseguita per ogni affilatura.

Ma anche questo indice non è completo, perché l'ingranaggio può essere tagliato con un creatore corto o con un creatore lungo, con uno che ha molti taglienti o con uno che ha pochi taglienti. E' opportuno quindi introdurre il concetto di numero di denti del creatore interessati al taglio ed arrivare all'indice di rendimento:

$$\boxed{K = \text{lunghezza della dentatura eseguita per ogni dente del creatore}}$$

Con le seguenti notazioni, sono valide le formule riportate di seguito.

$Z$  = Numero di denti dell'ingranaggio

$l$  = Larghezza della fascia dentata dell'ingranaggio

$\beta$  = Angolo dell'elica dell'ingranaggio

$L$  = Lunghezza totale dei denti dell'ingranaggio (in metri)

$L_p$  = Lunghezza totale dei denti di  $p$  ingranaggi (in metri)

$b_1$  = Lunghezza utile del creatore

$t_{os}$  = Passo assiale del creatore

$i_o$  = Numero di taglienti del creatore

$N_z$  = Numero di denti totale del creatore interessati al taglio

$$L = \frac{Z \cdot l}{1000 \cdot \cos \beta} \quad ; \quad L_p = p \cdot L = \frac{p \cdot Z \cdot l}{1000 \cdot \cos \beta}$$

$$N_z = i_o \cdot \frac{b_1}{t_{os}} \quad ; \quad K = \frac{L_p}{N_z} = \frac{p \cdot Z \cdot l \cdot t_{os}}{1000 \cdot i_o \cdot \cos \beta \cdot b_1}$$

Il coefficiente di rendimento  $K$  si misura in metri per dente e dovrebbe essere almeno compreso tra 4 e 5 metri/dente affinché il rendimento del creatore sia considerato buono.

Naturalmente bisogna sempre tenere presente che il rendimento così definito è solo uno dei tanti criteri che si possono scegliere per stimare la convenienza di determinate condizioni di lavoro. E' molto comune, per esempio, la scelta di

privilegiare l'aumento della velocità di taglio e quindi la riduzione del tempo di taglio rinunciando ad un buon rendimento meccanico del creatore.

Ad ogni modo, se dal creatore ci si aspetta un certo risultato e questo risulta inferiore all'aspettativa, si devono modificare le condizioni di lavoro riducendo progressivamente la velocità di taglio e l'avanzamento per giro pezzo ed aumentando eventualmente il valore dello shifting.

Bisogna considerare che una velocità di taglio troppo elevata aumenta l'usura per abrasione sul fianco del dente, mentre un troppo forte avanzamento tende ad aumentare la formazione del cratere. L'esame dell'usura può dare delle utili indicazioni su come modificare le condizioni di lavoro.

Alla luce del criterio sopra indicato, può essere interessante la verifica di come si stanno utilizzando i creatori nella propria officina. Rendimenti notevolmente inferiori a 4 m/dente meritano un'analisi più approfondita.

Va notato infine che prima di calcolare il valore di K, è necessario fissare a quale livello arrivare con l'usura del creatore prima di sostituirlo.

E' infatti chiaro che se teniamo il creatore in macchina fino a quando l'usura arriva a livelli molto alti, possiamo dentare più pezzi innalzando così il valore di K, ma alla fine potremo affilare poche volte il creatore. Il costo dell'utensile per ogni pezzo prodotto (o, meglio, per ogni metro di dentatura eseguita) aumenterà.

Oggi sono universalmente usati i creatori con ricoperture varie e quindi, si può dare un'indicazione di massima di quale deve essere l'usura ammessa. Ci si può basare sui seguenti valori:

- Per moduli da 1 a 2 mm : usura max = 0,20 mm
- Per moduli da 3 a 4 mm : usura max = 0,25 mm
- Per moduli da 5 a 6 mm : usura max = 0,30 mm

Si ricorda comunque che il criterio sopra esposto per giudicare il rendimento del creatore è solo uno dei parametri che incidono sul costo totale dell'ingranaggio prodotto. Altri elementi che è necessario considerare sono: il costo dell'utensile, il tempo di dentatura ed altri costi accessori (affilatura, lubrorefrigerante, attrezzature, ecc.).

Un'altra opzione che l'utilizzatore deve prendere in considerazione è il *numero di passate*. Finora si è parlato come se il creatore finisse il pezzo in un'unica passata, ma è abbastanza frequente fare una prima passata di sgrossatura ed una seconda passata di finitura.

Questo sistema oggi è molto facilitato dal fatto che si possono programmare facilmente le condizioni di lavoro delle due passate e gestire tutto il ciclo con il Controllo Numerico.

Le due passate si usano in particolare quando si vuole ottenere un ingranaggio finito accuratamente utilizzandolo poi senza ulteriori operazioni di finitura.

Oppure quando ci sono delle particolari difficoltà nell'operazione di rasatura per cui si preferisce partire con un pezzo sgrassato che abbia limitati errori.

Un altro caso dove sono richiesti pezzi dentati accuratamente è dove si finisce con la levigatura (honing).

Il soprametallo che normalmente si lascia per la seconda passata dipende dal modulo. Per moduli da 1,5 a 3,5 mm il soprametallo su ogni fianco può variare da 0,3 a 0,5 mm.

#### Velocità di taglio

Negli ultimi anni si sono realizzati grandi progressi in molti settori che riguardano la dentatura degli ingranaggi: le macchine sono diventate più efficienti, più rigide, capaci

di sopportare forti sollecitazioni; i controlli numerici che le gestiscono sono veloci e capaci di dosare tutti i parametri di taglio; gli utensili hanno migliorato la precisione ma, soprattutto, sono costruiti con acciai molto migliori di un tempo.

A seguito di tutto ciò ora si possono raggiungere velocità di taglio che solo qualche anno fa erano impensabili.

Purtroppo qui non si possono dare indicazioni precise a causa delle numerose variabili che entrano in gioco. Si pensi solo alla combinazione tra gli acciai da lavorare e a tutti i materiali taglienti oggi disponibili, all'influenza che ha lo spessore del truciolo o le caratteristiche geometriche del creatore, al tipo di macchina ed al refrigerante ed infine alla precisione che si vuole ottenere sul pezzo ed al rendimento che si vuole avere con il creatore.

C'è chi preferisce ridurre il tempo di taglio accontentandosi di uno scarso rendimento dell'utensile e chi invece preferisce fare con il creatore il più grande numero di pezzi possibile non essendo interessato a ridurre il tempo di taglio.

Attualmente sono disponibili dei programmi utilizzabili in ogni P.C. con cui, da determinati dati di partenza si possono ricavare le migliori condizioni di lavoro.

Per il momento, tanto per fissare le idee, limitiamoci a fare qualche esempio che potrà servire come base per ulteriori verifiche. Gli esempi che seguono si riferiscono ad ingranaggi con modulo compreso tra 1,5 e 3 mm.

**1)-** Ingranaggio in acciaio da cementazione e tempra con  $R = 600 \div 700 \text{ N/mm}^2$ .

Dentatrice a CN dell'ultima generazione; creatore in acciaio M35 (oppure in ASP30) ricoperto con TiAlN anche sul petto tagliente:  **$V_t = 100 \div 110 \text{ m/min}$** .

**2)-** Stessa situazione precedente ma con il petto tagliente non ricoperto dopo l'affilatura:  **$V_t = 90 \div 100 \text{ m/min}$** .

**3)-** Ingranaggio in acciaio bonificato, con  $R = 1000 \div 1100 \text{ N/mm}^2$ . Dentatrice a CN dell'ultima generazione; creatore in acciaio M35 (oppure ASP30) ricoperto con TiAlN anche sul petto tagliente:  **$V_t = 60 \div 80 \text{ m/min}$** .

**4)-** Ingranaggio in acc. da cementazione e tempra con  $R = 600 \div 700 \text{ N/mm}^2$ . Dentatrice a CN dell'ultima generazione. Creatore in acciaio superlegato con ricopertura in TiAlN:  **$V_t = 140 \div 170 \text{ m/min}$**  e anche di più.

**5)-** Nei primi tre esempi, se la macchina è del tipo convenzionale, non a CN, ma in buono stato, le velocità di taglio devono essere **ridotte del 10 ÷ 15%**.

**6)-** Nella dentatura di ingranaggi con modulo superiore a 3 mm, la velocità di taglio deve essere ridotta tanto più quanto è maggiore il modulo.

Gli esempi di cui sopra si riferiscono a lavorazioni con creatori in acciaio superapido, ma un discorso a parte va fatto per i creatori in Metallo Duro (carbide).

Questo tipo di creatore può essere adoperato convenientemente solo in particolari circostanze, e cioè solo se si dispone di una dentatrice moderna, particolarmente rigida e costruita per le alte velocità di rotazione.

Se si lavorano ingranaggi in acciaio da cementazione e tempra, con una resistenza compresa tra i 600 ed i 700  $\text{N/mm}^2$  si possono avere velocità di taglio anche di molto oltre 300 m/min.

Per riassumere i dati sulla velocità di taglio e per dare una qualche indicazione ai tecnici interessati, si riporta la tabella N°1, avvertendo che in ogni caso questi dati devono essere usati con una certa precauzione. Si nota per esempio che tra i valori della tabella ed i valori indicati negli esempi di cui sopra, ci sono delle differenze. La tabella infatti riporta dei dati di carattere generale dove, per esempio, non è considerato il tipo di macchina ed il tipo di ricoprimento.

Tabella N° 1

Resistenza dell'acciaio (N/mm <sup>2</sup> )	Velocità di taglio in m/min		
	Acciaio rapido ad umido	Metallo duro a secco	Metallo duro ad umido
600	120	320	305
700	110	290	280
800	100	270	240
900	85	240	200
1000	70	210	180
1100	60	180	160

Un'altra importante considerazione che, purtroppo, complica ulteriormente la questione, è che bisogna considerare anche la lavorabilità del materiale, non essendo sufficiente la resistenza dell'acciaio.

Infatti, in base alla composizione chimica due diversi acciai, anche con la stessa resistenza, possono avere molto differenti gradi di lavorabilità.

Nella tabella N°2 sono riportati gli acciai più comunemente usati divisi in tre gradi di lavorabilità. E' evidente che per una lavorabilità scarsa bisognerà ridurre opportunamente le condizioni di lavoro ed in particolare la velocità di taglio.

Tabella N°2

<b>Lavorabilità degli acciai</b>		
Buona	discreta	difficile
16 Mn Cr 5	42 Cr Mo 4	30 Cr Ni Mo 8
20 Cr Cr 5	17 Cr Ni Mo 6	14 Ni Cr 14
15 Cr 3	18 Cr Ni 8	36 Ni Cr 6
34 Cr 4	CK 45	34 Cr Ni Mo 6 V
CK 15 (fino 35)	C60	30 Cr Mo V 9 V
30 Mn 5	Cf 70	40 Ni Cr Mo 7
15 Cr Ni 6	28 Ni Cr Mo 4	
20 Mo Cr 4	37 Mn Si 5	
21 Ni Cr Mo 2		

### Avanzamento

Nella dentatura si usa indicare l'avanzamento del creatore per ogni giro del pezzo.

Essendo:

$N$  = numero di giri al minuto del creatore

$N_g$  = numero di giri al minuto del pezzo

$Z_0$  = numero di filetti del creatore

$Z$  = numero di denti dell'ingranaggio.

$A'$  = avanzamento al minuto del creatore (alimentazione)

$f_a$  = avanzamento del creatore per ogni giro del pezzo

Si ha:

$$N_g = \frac{N \cdot Z_0}{Z} \quad ; \quad f_a = \frac{A'}{N_g} \quad ; \quad f_a = \frac{A' \cdot Z}{N \cdot Z_0}$$

Anche l'avanzamento per giro dipende da molti fattori, come il materiale lavorato, il materiale dell'utensile, il numero di taglienti del creatore, la precisione voluta sul pezzo, lo stato della dentatrice (in particolare per quanto riguarda la sua rigidità), ecc.

Non è affatto vero però che minore è l'avanzamento al giro, minore risulterà l'usura. Tra lo spessore del truciolo e la velocità di propagazione dell'usura esiste una relazione (empirica) che è schematizzata in figura N°01.

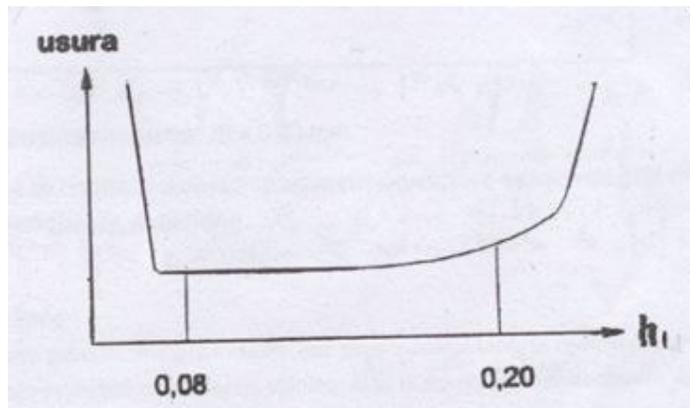


Figura N°01

Lo spessore del truciolo si può calcolare esattamente solo con la formula di Hoffmeister di cui si dirà tra breve.

E' quindi molto importante non superare lo spessore del truciolo consigliato, in primo luogo per evitare la formazione di usure precoci, in secondo luogo per evitare rotture premature dei denti.

Lo spessore massimo del truciolo dipende fortemente dal modulo e si può considerare che per moduli compresi tra 1 e 3,5 mm si ha:  $0,10 \leq h_1 \leq 0,30$ , mentre per moduli compresi tra 3,5 e 6 mm si ha  $0,30 \leq h_1 \leq 0,35$ .

Per esempio, se si considera un modulo vicino a 2 mm lo spessore massimo del truciolo è di circa 0,25 mm.

Per la determinazione di  $h_1$  in funzione di  $m_n$  si può comunque utilizzare il grafico di fig. N°02

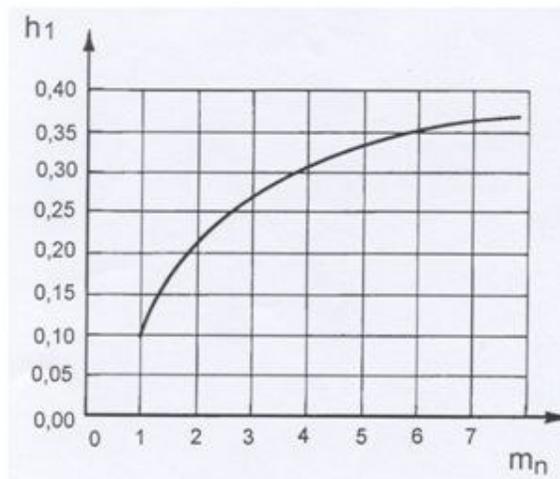


Figura N°02

Ma lo spessore massimo del truciolo dipende anche dal tipo di acciaio lavorato, dal materiale dell'utensile e dal tipo di lavorazione (ad umido o a secco). Quindi i valori

massimi, per il massimo modulo, elencati più sopra, devono essere modificati secondo la tabella seguente.

Tabella N° 3

Resistenza dell'acciaio N/mm <sup>2</sup>	Spessore massimo del truciolo (mm)			
	Acc. Rapido e metallo duro ad umido (minimo spessore)	Acciaio Rapido ad umido (massimo spessore)	Metallo duro ad umido (massimo spessore)	Metallo duro a secco (minimo spessore)
600	0	0,35	0,18	0,10
700	0	0,32	0,17	0,10
800	0	0,29	0,16	0,10
900	0	0,26	0,15	0,10
1000	0	0,23	0,14	0,10
1100	0	0,20	0,14	0,10

Analogamente all'operazione di fresatura, anche nel taglio delle ruote con creatore si possono distinguere due tipi di avanzamento: si parlerà allora di *taglio in opposizione* (in inglese: *climb*) e di *taglio in concordanza* (in inglese: *conventional*) , vedere figura N°03.

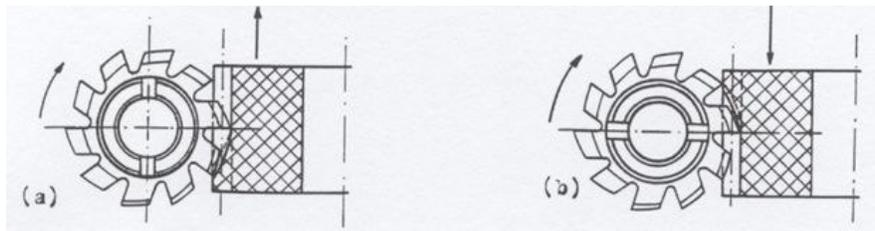


Figura N°03

Con il metodo in opposizione (fig.N°03a), il truciolo risulta di spessore crescente da zero fino al suo valore massimo ed assume la forma di una virgola allungata. Per questo motivo i taglienti del creatore, all'inizio del taglio, tendono a scorrere sulla superficie del pezzo prima di intaccare il truciolo e ciò provoca una rapida usura del creatore, un incrudimento del materiale lavorato particolarmente dannoso sulle ruote che devono essere finite con la sbarbatura ed infine si ha la formazione di una specie di tagliente di riporto sul dorso del dente che provoca un aumento della scabrosità della superficie lavorata.

Per tutti questi motivi il metodo di taglio in opposizione non permette l'impiego di velocità di taglio elevate. L'unico vantaggio che si ha, è che la forza di taglio spinge sempre la tavola in modo da annullare eventuali giochi e quindi l'avanzamento è più regolare.

Per contro il metodo di taglio in concordanza tenderebbe a spingere la tavola nella stessa direzione dell'avanzamento (fig.03b), e quindi esisterebbe il pericolo di un avanzamento a sbalzi della tavola.

C'è però da dire che questo inconveniente è oggi completamente superato con soluzioni tecniche che prevedono il recupero automatico dei giochi nella catena cinematica e quindi il problema, nelle moderne dentatrici, non si pone, specialmente

nelle dentatrici a controllo numerico in cui la rotazione del creatori e del pezzo sono date da motori indipendenti gestiti dal Controllo Numerico.

Il metodo di taglio in concordanza permette l'attacco del truciolo dalla sua parte più grande e la forma del truciolo stesso è quella di una virgola più corta; queste condizioni permettono di ottenere un maggiore rendimento del creatore.

### La formula di Hoffmeister

La famosa formula di Hoffmeister è abbastanza complicata da applicare, anche se oggi, con un opportuno programmino sul PC diventa un problema facile da risolvere. E' utile sia la formula che permette di calcolare lo spessore massimo del truciolo dato un certo avanzamento per giro pezzo, sia la formula inversa che permette di calcolare l'avanzamento per giro pezzo che dà un determinato spessore del truciolo.

Nella figura N°04 è indicato il significato di spessore massimo di testa del truciolo  $h_1$ .

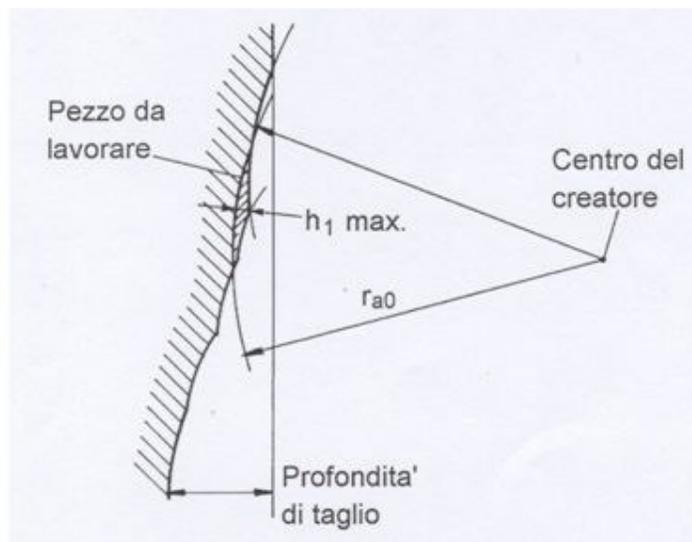


Figura N°04

Calcolo dello spessore massimo del truciolo

$$h_{1\max} = 4,9 \cdot m_n \cdot Z_2^{(9,25 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_2 - 0,542)} \cdot e^{-0,015 \cdot (\beta_2 + x_p)} \cdot \left( \frac{f_a}{m_n} \right)^{0,511} \cdot \left( \frac{d_{a0}}{2 \cdot m_n} \right)^{(-8,25 \cdot 10^3 \cdot \beta_2 - 0,225)} \cdot \left( \frac{i_0}{Z_0} \right)^{0,877} \cdot \left( \frac{h}{m_n} \right)^{0,319}$$

Calcolo dell'avanzamento per giro pezzo

$$f_a = h_1^{1,9569} \cdot 0,0446 \cdot m_n^{(-1,6145 \cdot 10^{-2} \cdot \beta - 0,7730)} \cdot Z_2^{(-1,8102 \cdot 10^{-2} \cdot \beta + 1,0607)} \cdot e^{0,0294 \cdot \beta} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2}\right)^{(1,6145 \cdot 10^{-2} \cdot \beta + 0,4403)} \cdot \left(\frac{i_0}{Z_0}\right)^{1,7162} \cdot h^{-0,6243} \cdot e^{0,0294 \cdot x_p}$$

La formula di Hoffmeister che dà il valore dell'avanzamento per giro pezzo in funzione degli altri parametri, si presta bene ad interessanti considerazioni, specie se i vari fattori che la compongono vengono rappresentati sotto forma grafica. Nella tabella N°4 sono appunto elencati i vari fattori evidenziando gli elementi che più li influenzano.

Tabella N°4

Fattori	Valore	Figura	Commenti
$F_{h1}$	$h_1^{1,9569}$	05	Si vede che l'influenza dello spessore del truciolo $h_1$ è forte; praticamente $F_{h1}$ varia quasi in proporzione al quadrato di $h_1$
$F_m$	$0,0446 \cdot m_n^{(-1,6145 \cdot 10^{-2} \cdot \beta - 0,7730)}$	06	Qui si vede chiaramente che con l'aumentare del modulo $m_n$ il fattore $F_m$ cala in maniera esponenziale; ciò significa che per avere uno stesso spessore del truciolo si deve avere un avanzamento molto minore, a parità di altre condizioni. Inoltre l'influenza di $\beta$ è trascurabile.
$F_{Z2}$	$Z_2^{(-1,8102 \cdot 10^{-2} \cdot \beta - 1,0607)}$	07	Si può osservare che si ha quasi una relazione lineare tra il numero di denti dell'ingranaggio $Z_2$ ed il fattore $F_{Z2}$ . Ciò significa che a parità di spessore del truciolo, con più denti si può avere un avanzamento per giro pezzo maggiore. $\beta$ può essere trascurato.
$F_d$	$\left(\frac{d_0}{2}\right)^{(-1,6145 \cdot 10^{-2} \cdot \beta + 0,4403)}$	08	Anche in questo caso l'influenza di $\beta$ è marginale, ma con l'aumentare del diametro esterno del creatore si ha un sensibile aumento dell'avanzamento per giro pezzo
$F_{i0/Z0}$	$\left(\frac{i_0}{Z_0}\right)^{1,7162}$	09	Qui gioca un ruolo molto importante il numero di taglienti ed il numero di principi del creatore. Si vede chiaramente che per poter aumentare l'avanzamento è necessario ridurre il numero di principi $i_0$ ed aumentare il numero di taglienti $Z_0$ .

$F_{h/xp}$	$h^{-0,6243} \cdot e^{0,0294 \cdot x_p}$	10	<p><i>Il fattore di correzione <math>X_p</math> influisce scarsamente, ma l'altezza totale del dente <math>h</math> (o meglio, la profondità di taglio) è di grandissima importanza. L'altezza totale del dente è praticamente proporzionale al modulo. In definitiva è un altro fattore che dice che quando il modulo cresce, l'avanzamento per giro deve ridursi.</i></p>
------------	--	----	---

In questa formula i due parametri tra loro dipendenti sono l'avanzamento per giro pezzo  $f_a$  e lo spessore del truciolo  $h_1$ . Sono questi due parametri che devono essere fissati.

Tutti gli altri sono, in un certo senso, già fissi, cioè sono elementi geometrici del creatore o dell'ingranaggio.

Per determinare le condizioni di lavoro dobbiamo scegliere quale è lo spessore del truciolo massimo, e da questo calcolare l'avanzamento per giro ammesso.

E' lo spessore del truciolo, infatti, che dà il livello di sollecitazione del dente del creatore e indicare se il creatore può essere soggetto a rotture precoci.

Se invece si conosce a priori il valore dell'avanzamento per giro pezzo, fissato, per esempio, per soddisfare a certe esigenze di produzione, si può verificare se lo spessore del truciolo è o no entro i limiti ammessi.

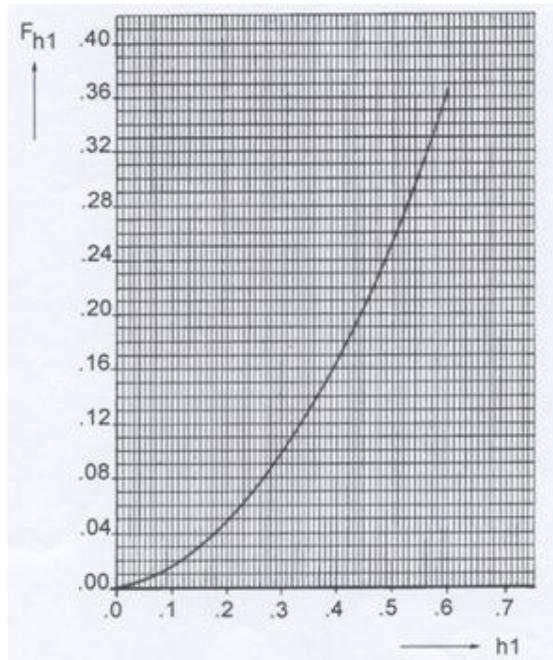


Figura N°05

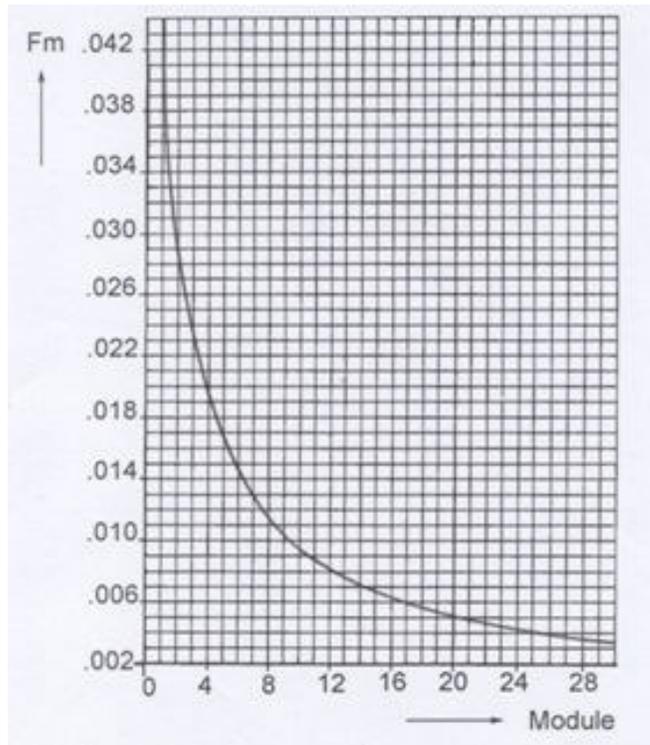


Figura N°06

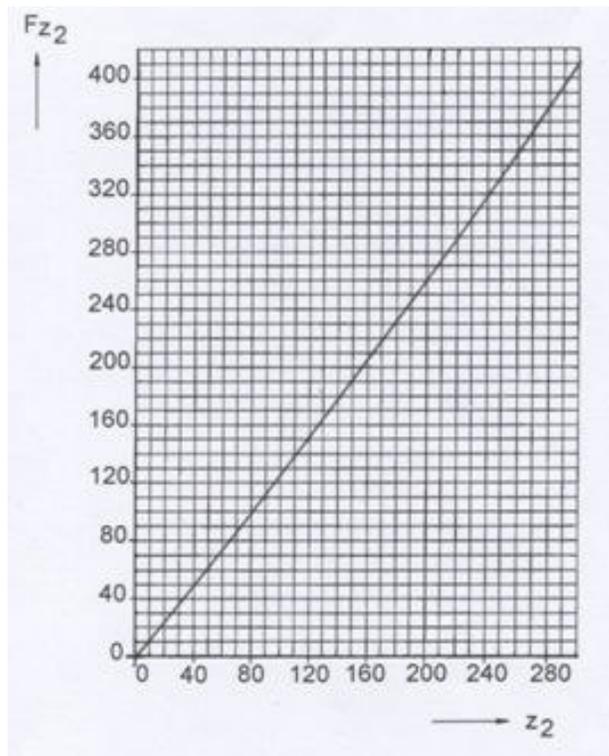


Figura N°07

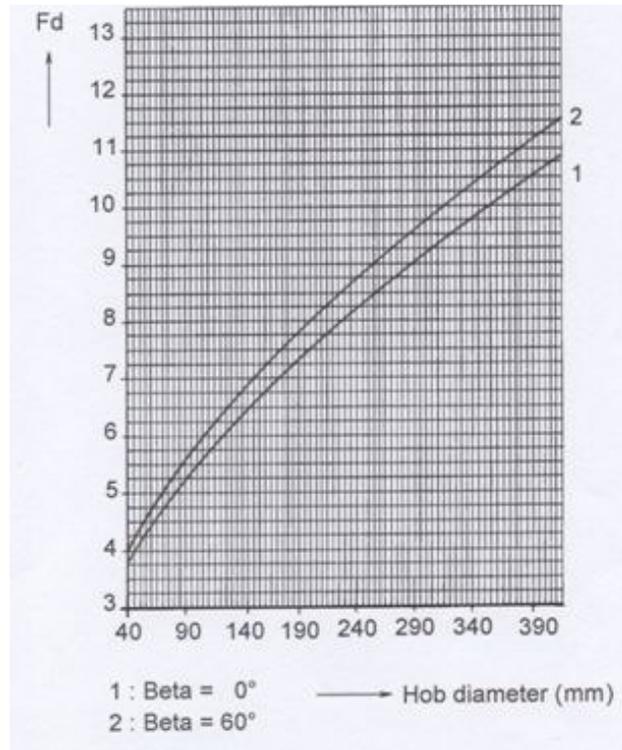


Figura N°08

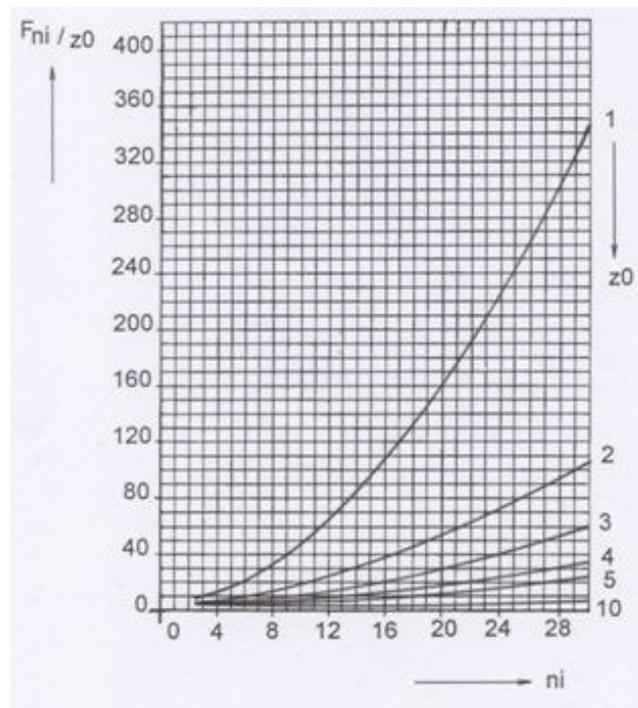


Figura N°09

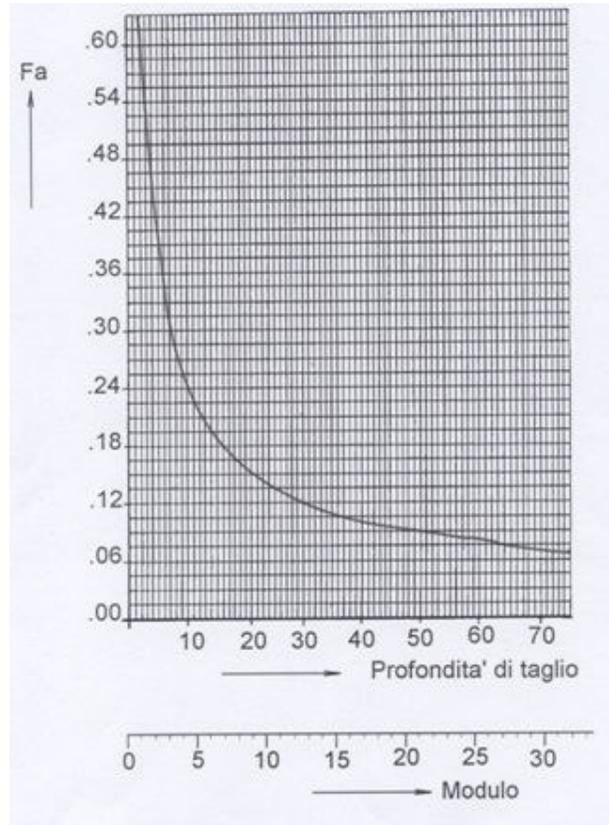


Figura N°10

In linea generale il valore dell'avanzamento, come si è visto, deve essere ridotto con l'aumentare del numero di principi del creatore, tuttavia i limiti per l'avanzamento sono sostanzialmente:

- ◆ *la precisione del profilo ed dell'elica sull'ingranaggio;*
- ◆ *la resistenza fisica alla rottura dei denti del creatore;*
- ◆ *la rigidità della dentatrice.*

Per ingranaggi di modulo inferiore a 3 mm si possono suggerire i seguenti avanzamenti per giro pezzo, nelle condizioni ottimali, lavorando acciai con  $R = 600 \div 700 \text{ N/mm}^2$ :

- ◆ *Creatori a 1 principio =  $4 \div 6 \text{ mm/giro}$*
- ◆ *Creatori a 2 principi =  $3,5 \div 4,5 \text{ mm/giro}$*
- ◆ *Creatori a 3 principi =  $2,5 \div 3,5 \text{ mm/giro}$*
- ◆ *Creatori a 4 principi =  $2,0 \div 3,0 \text{ mm/giro}$*
- ◆ *Creatori a 5 principi =  $2,0 \div 2,5 \text{ mm/giro}$*

Ripetiamo che questi valori devono essere considerati come assolutamente indicativi e che, in ogni caso, bisogna verificare sia lo spessore massimo del truciolo, sia la

precisione dell'ingranaggio prodotto, sia la resistenza del creatore stesso in funzione del suo stato di usura ed in funzione del materiale lavorato.

Per esempio, avanzamenti dell'ordine di quelli proposti nel caso di 1 principio, vengono oggi raramente usati, perché, specie con creatori di limitato diametro esterno, producono dei rilevanti errori di elica (solcatura). In genere non si dovrebbero superare i 15 – 20 micron negli errori di elica e di profilo.

#### Ulteriori considerazioni sullo spessore del truciolo

Come si è visto poco sopra, lo spessore del truciolo è un elemento importante che condiziona i parametri di taglio e quindi il tempo di dentatura.

Come si vedrà, il tempo di dentatura, dipende dalla velocità di rotazione del pezzo e dall'avanzamento del creatore per ogni giro del pezzo.

Si tratta quindi, se si vuole ridurre il tempo macchina, di far girare più velocemente il pezzo ed avanzare più velocemente, fermo restando la regola che non si deve superare lo spessore massimo del truciolo.

Per aumentare la velocità di rotazione del pezzo, la strada più facile è quella di aumentare la velocità di taglio.

Ciò è possibile se si usano creatori costruiti con acciai fortemente legati e ricoperti con i metodi più moderni, inoltre essi devono essere usati su dentatrici moderne, in buono stato ed adatte a sopportare senza danno le alte velocità della tavola portapezzo.

L'alta velocità di taglio ha come effetto di far aumentare la temperatura dei trucioli e quindi anche quella della zona di contatto truciolo-utensile.

A causa di ciò il truciolo diventa più plastico e la sua asportazione richiede un minore sforzo. Questa considerazione permetterebbe di adottare spessori di truciolo leggermente superiori.

Il minore sforzo sul petto di taglio, autorizzerebbe a pensare che l'usura per craterizzazione sia minore, ma l'aumento della temperatura nella zona di impatto del truciolo sull'utensile provoca un ammorbidimento della matrice di acciaio dell'utensile con effetti deleteri su questo tipo di usura.

Inoltre vengono accentuati quei fenomeni chimici tra truciolo ed utensile che sono una delle componenti principali nella formazione del cratere.

Attualmente nella dentatura di ingranaggi automobilistici si possono raggiungere velocità di taglio comprese tra 120 e 170 m/min se si usano creatori in acciaio superlegato e velocità di oltre 300 m/min se si usano creatori in metallo duro.

Normalmente si tende ad aumentare la velocità di taglio, anche oltre i limiti consentiti, per ottenere riduzioni dei tempi di dentatura e quindi si preferisce sacrificare il costo del creatore per pezzo prodotto a vantaggio del costo del tempo.

Più interessante ed attuale è invece la possibilità di ridurre lo spessore del truciolo attraverso un aumento del numero dei taglienti del creatore.

Oggi si usano comunemente, e con buoni risultati tecnico economici, creatori in acciaio con 25 – 30 taglienti.

E' questa una tendenza che portata agli estremi genera i cosiddetti *creatori usa e getta* con un forte numero di taglienti, piccoli diametri e che vengono usati una sola volta e poi, senza essere affilati, vengono rottamati.

A dire il vero questa idea, finora non ha avuto molta fortuna.

Molto più usati sono invece i creatori *multitaglienti*, che pur avendo un alto numero di taglienti, permettono di eseguire qualche affilatura.

Esaminiamo un po' in dettaglio cosa comporta l'aumento del numero di taglienti su un creatore che mantenga inalterato il diametro esterno.

Il primo effetto è quello di ridurre la lunghezza utile del dente.

Se si considera l'esempio di un creatore con  $m = 2$  e diametro esterno  $d_{a0} = 110$  mm, con un numero di taglienti  $i_0=17$ , la larghezza del dente utilizzabile è di circa 11 mm. Se si passa ad  $i_0=28$  la larghezza utile passa a 5 mm.

Il profilo del dente è generato per involuppo dalla successione del numero di taglienti pari a  $\frac{i_0}{Z_0}$ , quindi il tratto ad evolvente del dente dell'ingranaggio è approssimato ad

una spezzata che è tanto più vicina al profilo teorico tanto è maggiore il numero dei taglienti e quanto è minore il numero di principi.

La discontinuità del profilo eseguito con un basso numero di denti è particolarmente evidente nel tratto di trocoide in prossimità del piede del dente, zona, questa, che tra l'altro non è completamente finita con l'operazione di rasatura.

Si hanno due alternative:

- Lasciare lo stesso numero di principi ed aumentare il numero di taglienti:  
*l'ingranaggio viene più preciso*
- Aumentare il numero di taglienti ed anche il numero di principi lasciando inalterato il loro rapporto:  
*si riduce il tempo di dentatura*

A prescindere dalla minor utilizzazione del creatore in entrambi i casi si ha un vantaggio.

La riduzione dello spessore del truciolo ha, come è ovvio, l'effetto di ridurre lo sforzo di taglio.

Questo significa che poiché il dente è meno sollecitato, la sua larghezza residua, cioè la larghezza del dente a fine vita, potrà essere minore.

In altre parole, si recupera una certa parte delle affilature perse a causa della diminuzione della larghezza totale del dente dovuta all'aumento di  $i_0$ .

Poiché i trucioli si formano in frammenti più piccoli e la loro evacuazione risulta più facile, il solco d'affilatura potrà avere una forma diversa e privilegiare la larghezza del dente, aumentando così la sua resistenza e l'ulteriore aumento delle affilature possibili.

L'obiezione che potrebbe essere sollevata a questo punto è che il creatore, avendo un numero di taglienti maggiore, costa di più perché richiede un tempo di lavorazione maggiore.

Questo è vero solo in parte ed in ogni caso l'aumento del costo di lavorazione è molto limitato.

I maggiori tempi, nella costruzione di un creatore, sono quelli di spogliatura e quelli della rettifica dei denti, che sono una parte dei costi totali.

In entrambi i casi, se è vero che il numero di denti da lavorare aumenta, è anche vero che essi sono meno larghi.

In pratica il percorso che deve fare l'utensile di spogliatura o la mola, per completare tutto il creatore, è uguale o di pochissimo superiore, mentre c'è il vantaggio che essendo il salto delle camme più piccolo, durante la lavorazione ci sono meno vibrazioni ed è quindi possibile adottare velocità di avanzamento maggiori.

Complessivamente quindi non ci sono significative variazioni di costo per l'utensile.

### Shifting

Il creatore deve essere spostato di una certa entità in senso assiale dopo aver eseguito uno o più pezzi: questo spostamento si chiama *shifting*.

Lo spostamento assiale si effettua per sfruttare in modo completo il creatore, cioè per distribuire l'usura lungo tutta la sua lunghezza.

Il problema della determinazione dello shifting ottimale non è di facile soluzione e normalmente ci si basa su una serie di prove pratiche per stabilire quale è il valore dello shifting che dà la maggiore uniformità nella distribuzione dell'usura.

Sono decenni oramai che si provano diversi metodi di shifting; oggi, quello che dà i migliori risultati, sembra essere il seguente.

Eseguire una prima serie di shifting dividendo l'intera corsa possibile in più tratti di entità importante, per esempio 10 mm, ottenendo gli intervalli  $\overline{P_1 P_2}; \overline{P_2 P_3}; \dots; \overline{P_{n-1} P_n}$ .

Ritornare nella posizione iniziale  $P_1$  ed eseguire uno shifting di un valore limitato  $x$  (per esempio  $0,05 \div 0,2$  mm) e spostarsi poi successivamente nei punti

$$P_2 + x ; P_3 + x \dots \dots P_{n-1} + x .$$

Reiterare la procedura  $i$  volte fino a che  $P_1 + \sum x_i$  non coincida con  $P_2$  ed in successione  $P_2 + \sum x_i$  con  $P_3$  eccetera.

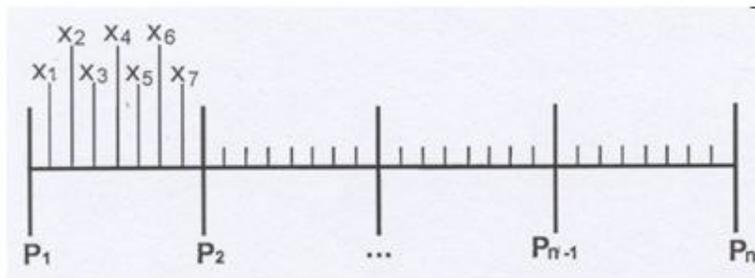


Figura N°11

Il risultato complessivamente è il migliore possibile a patto che l'intervallo  $x$  sia quello che generi in tutti i denti la stessa usura. Infatti gli spostamenti di entità maggiore, da  $P_1$  a  $P_2$  a  $P_n$  sono importanti per tenere bassa la temperatura dei taglienti, il che è a tutto vantaggio della vita dell'utensile.

Le moderne macchine a Controllo Numerico prevedono nei programmi la possibilità di questo tipo di shifting.

Nelle dentatrici più vecchie questo sistema è più problematico, in quanto lo spostamento assiale del creatore non è gestito dal Controllo Numerico.

Nelle vecchie macchine è quindi conveniente shiftare il creatore dopo ogni ingranaggio dentato a dopo una o più mandrinate di più pezzi.

Per il valore da assegnare allo shifting di tipo "tradizionale" ci si può basare sulla seguente formula:

$$S_h = \frac{2 \cdot m}{i_o} \quad \text{dove:}$$

$S_h$  = valore dello shifting in mm

$m$  = modulo

$i_o$  = numero dei taglienti del creatore

Bisogna infine considerare la direzione dello shifting, che può essere concorde o discorde rispetto la rotazione del pezzo. (Figura N°12)

**Shifting discorde:** In questo caso i denti che finiscono l'ingranaggio hanno il tagliente non ancora usurato, quindi si produce un ingranaggio con un buon grado di finitura. Successivamente, con lo shifting, questi denti finitori vengono portati nella zona A di grossatura. Con questo sistema però il creatore si usura prima.

Shifting concorde: i denti che finiscono l'ingranaggio hanno compiuto in precedenza il lavoro di sgrossatura nella zona A e di conseguenza il grado di finitura che si ottiene è peggiore, in compenso il creatore si usura meno velocemente. Questo è il sistema usato più frequentemente, tanto più che le eventuali imperfezioni di dentatura possono poi venire corrette dalle successive operazioni di rasatura o di rettifica.

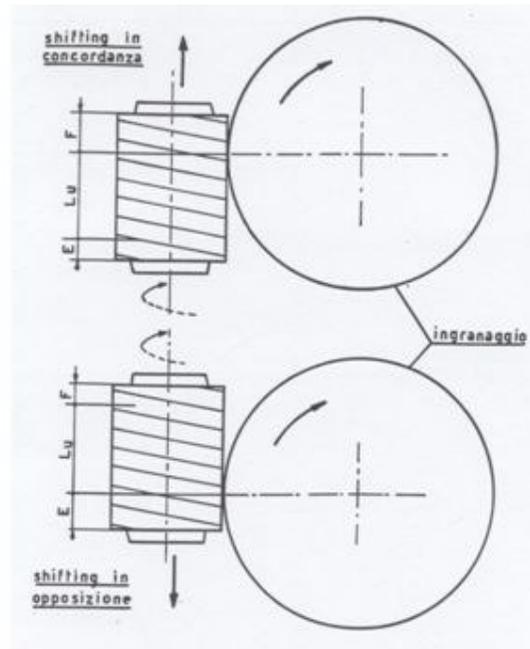


Figura N°12

Secondo che si lavorino grandi serie o piccole serie bisogna ragionare in maniera diversa riguardo lo shifting.

Per le grandi serie, dove normalmente il ritmo d'officina è cadenzato su due o tre turni, è abitudine fare in modo di cambiare il creatore alla fine di un turno o all'inizio di quello successivo.

Bisognerà quindi stabilire lo shifting sia come frequenza che come entità in modo di arrivare alla fine del turno con il creatore che abbia completato le corse stabilite.

In altre parole bisogna evitare di dover sostituire il creatore quando è a metà della corsa di shifting.

Per le produzioni basse, quando si deve smontare e rimontare spesso il creatore prima che sia arrivato il momento di affilarlo, è opportuno che si usi un'apposita scheda su cui sia segnata la posizione del creatore al momento dello smontaggio, il verso dello shifting, il numero delle corse e di pezzi fatti ed ogni altro dato relativo allo shifting.

Solo in questo modo si potrà avere un'usura regolare su tutta la lunghezza del creatore.

### Montaggio del creatore

Il creatore deve essere posizionato correttamente sulla macchina se si vuole sfruttarlo correttamente, cioè in modo completo.

Si vedono spesso in officina dei creatori che alle estremità hanno alcuni denti che non hanno lavorato. Questo significa perdere in rendimento complessivo ed aumentare i costi dell'ingranaggio prodotto.

Con riferimento alla figura N°13, il creatore verrà sfruttato al massimo della sua lunghezza se lo shifting totale ha un valore  $b_3$  che è ben approssimata dalla relazione  $b_3 = b_2 - (l_1 + l_2)$  dove la dimensione minima di posizionamento all'inizio della lavorazione, misurata lungo l'asse del creatore è data da  $l_1$  :

$$l_1 = \frac{h_{k1}}{\operatorname{tg} \alpha_2} + \frac{t_0}{2} + 0,2 \cdot t_0 \quad \text{dove } t_0 \text{ è il passo assiale dei denti del creatore}$$

mentre la dimensione minima di posizionamento alla fine della lavorazione misurata lungo l'asse del creatore è data da  $l_2$  :

$$l_2 = \frac{h_{k1}}{\operatorname{tg} \alpha_2} + 0,2 \cdot t_0$$

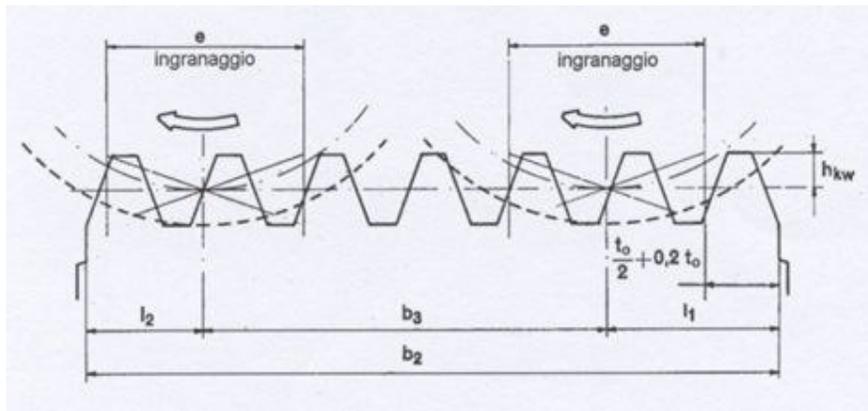


Figura N°13