

Ottimizzare l'energia in fresatura

Effetto del numero di denti della fresa e frese a alto avanzamento

Massimiliano Annoni

Questo articolo vuole fornire alcuni spunti di riflessione utili alle aziende operanti nel settore della fresatura per pensare o ripensare alle strategie e agli utensili da usare per ottenere un risparmio energetico.

Nell'articolo "L'energia in tornitura e fresatura", pubblicato sul numero di novembre di *Macchine Utensili*, abbiamo avuto modo di comprendere come un parametro noto agli operatori del settore come il k_c (pressione di taglio), abbia un significato fisico utile quando si voglia valutare l'energia richiesta per una operazione di asportazione di truciolo.

Il k_c è facile da calcolare a partire dalle tabelle fornite dagli utensilieri, in cui si entra con il nome o la composizione chimica del



materiale e con la sua durezza e si esce con il valore della pressione specifica di taglio k_{c1} , grazie alla quale si calcola direttamente la pressione di taglio in funzione dello spessore di truciolo, quindi dell'avanzamento e dell'angolo di registrazione. Le formule di dettaglio si trovano nell'articolo citato. Alcune di esse saranno utili anche per questo articolo e saranno riportate nel seguito. La cosa che rende il k_c particolarmente utile e interessante è che basta moltiplicare il suo valore per il tasso di asportazione di materiale (volume rimosso nell'unità di tempo) per ottenere la potenza di taglio che la macchina deve erogare per effettuare la lavorazione desiderata. Se poi moltiplichiamo la potenza per il tempo di lavorazione, abbiamo l'energia richiesta per quella lavorazione. Ma c'è ancora un altro utilizzo del k_c molto utile quando si parla di energia: moltiplicando il valore del k_c per il volume da asportare, vale a dire la differenza tra il volume del grezzo e il volume del finito, si ottiene l'energia necessaria per effettuare tale rimozione di materiale. Nel caso più semplice, si usa un valore medio della pressione di taglio e così si ottiene una stima dell'energia richiesta. Se si vuole stimare l'energia in lavorazioni particolari all'interno di quelle predisposte per rimuovere il materiale, si può andare in maggiore dettaglio e calcolare il k_c proprio della singola operazione e così il suo esborso energetico. Si tratta di un metodo molto efficace e diretto per valutare l'energia, tanto da essere molto interessante ora che finalmente il mondo manifatturiero è interessato a ridurre l'impatto energetico delle lavorazioni. Questo articolo nasce per esemplificare l'u-

so del k_c a riguardo della stima della forza, della potenza e dell'energia richiesta per una lavorazione di fresatura, ma anche per fornire alcuni spunti di riflessione sul numero di denti delle frese e sulle frese a alto avanzamento.

Effetto del numero di denti sulla potenza in fresatura

Innanzitutto, bisogna dire che il numero di denti di una fresa Z gioca un ruolo sulla capacità della fresa di evacuare il truciolo (più denti a pari diametro della fresa riducono l'ampiezza del flute quindi la capacità della fresa di smaltire il truciolo, soprattutto su materiali a truciolo lungo come l'alluminio) e sulla sua robustezza (molti denti possono indebolire la parte centrale della fresa che ha il compito di resistere alle forze e alle coppie in gioco).

Meno evidente è il fatto che il numero di denti di una fresa, a parità di tasso di asportazione di materiale MRR (anche detto Q) (Figura 1)

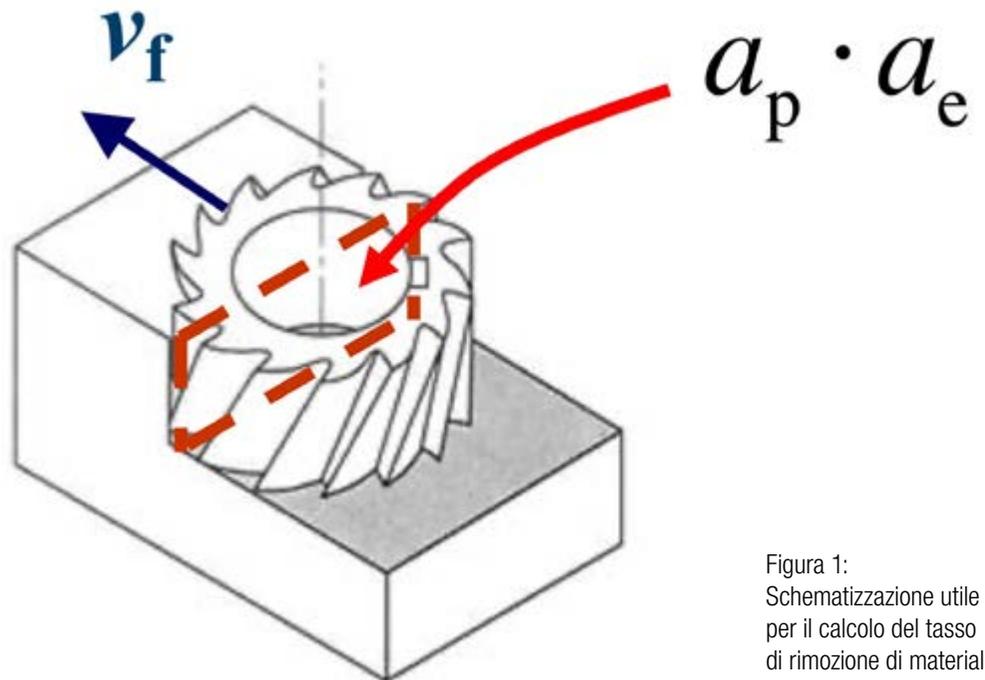
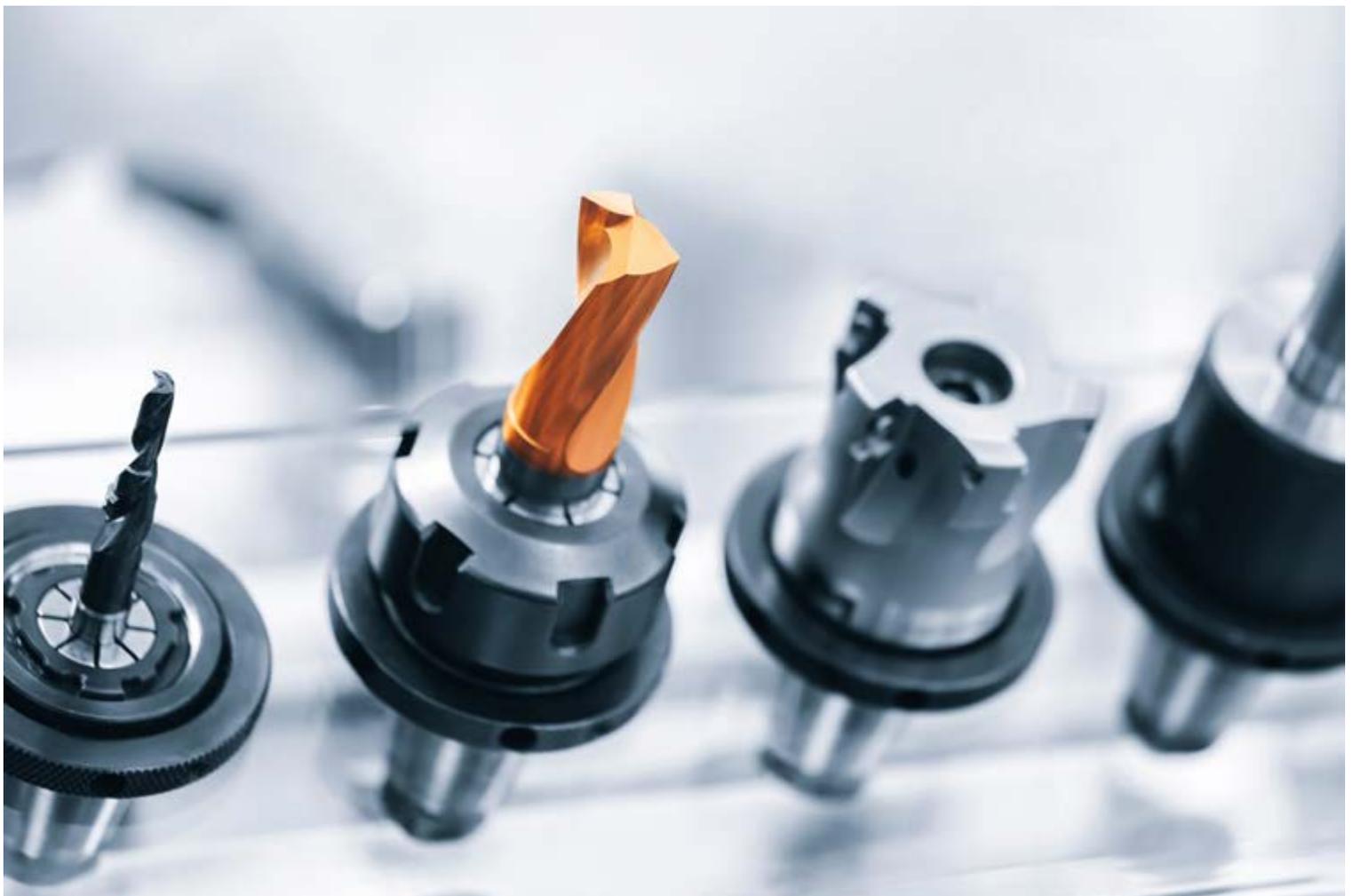


Figura 1:
Schematizzazione utile
per il calcolo del tasso
di rimozione di materiale
MRR (o Q)



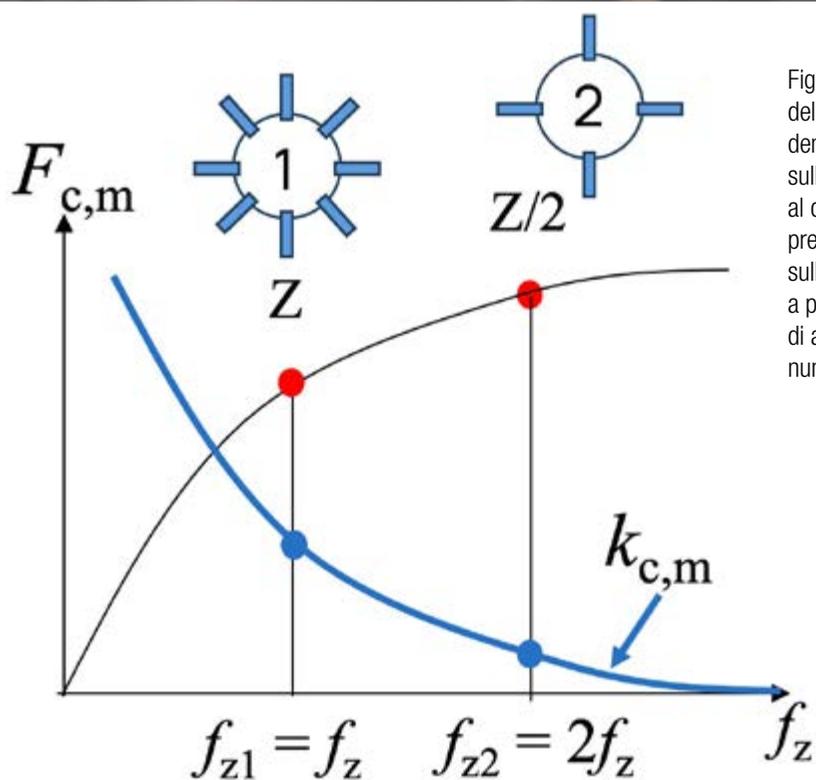


Figura 2: Effetto del numero di denti della fresa sull'avanzamento al dente, sulla pressione di taglio e sulla forza di taglio a parità di velocità di avanzamento e numero di giri

e di velocità di taglio v_c , abbia un impatto sulla potenza e sull'energia.

$$MRR = Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f$$

In questa trattazione, vogliamo mantenere MRR costante, quindi manteniamo costanti la profondità di passata assiale a_p , la profondità di passata radiale a_e e la velocità di avanzamento v_f . Dato che però vogliamo mantenere costante anche la velocità di taglio v_c e il diametro della fresa D_c , rimane costante anche il numero di giri del mandrino n :

$$v_c = \frac{\pi D_c n}{1000}$$

Se n rimane costante e v_f rimane costante, come abbiamo già detto, gli unici parametri che possono variare sono il numero di denti della fresa Z e l'avanzamento al dente f_z :

$$v_f = n \cdot f_z \cdot Z$$



In particolare, se Z diminuisce, f_z deve aumentare.

In altre parole, nel caso in esame nulla cambia per la macchina, che vede montata sempre la stessa fresa, che deve ruotare sempre allo stesso numero di giri, avanzare sempre con la stessa velocità di avanzamento essendo impegnata sempre con le stesse profondità di passata.

Immaginiamo che la fresa sia ad inserti. Ora il punto è: cosa accade se rimuoviamo dalla fresa metà degli inserti, come raffigurato nella Figura 2?

Per le ipotesi che abbiamo fatto, quando rimuoviamo metà dei denti della fresa ogni dente dovrà sopportare un avanzamento al dente doppio in quanto l'avanzamento al giro della fresa deve rimanere costante. La variazione di avanzamento al dente comporta una variazione nella

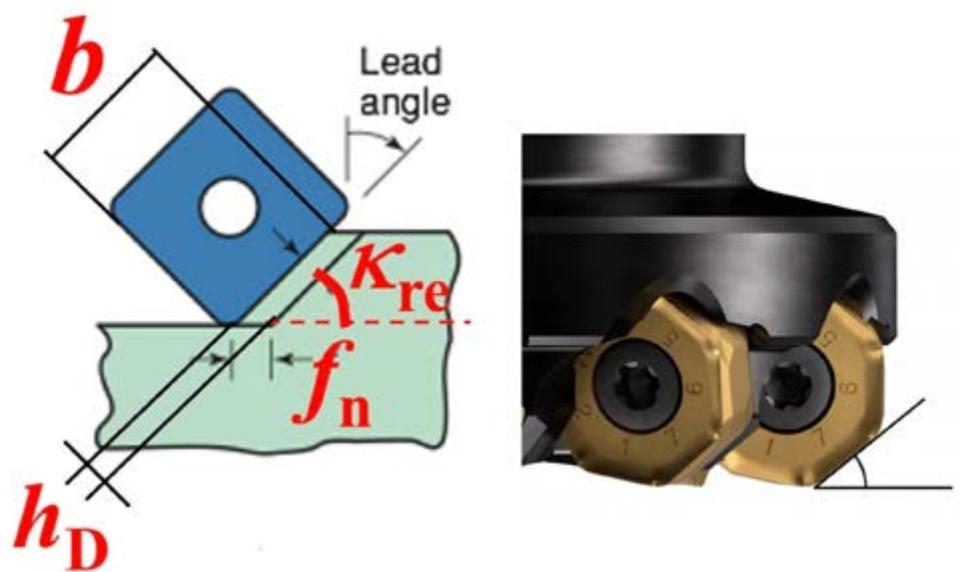


Figura 3: Angolo di registrazione di una fresa (figura a destra: cortesia Sandvik Coromant)

pressione di taglio e nella forza di taglio. Per comprendere tali variazioni, facciamo un ripasso delle formule della fresatura. Lo spessore medio di truciolo si può calcolare con la formula:

$$h_m = \frac{2f_z a_e}{\varphi D_c} \sin \kappa_{re}$$

Nella formula compare il diametro della fresa D_c , l'avanzamento al dente f_z , la profondità di passata radiale a_e e l'angolo di registrazione dei taglienti della fresa κ_{re} , tutti parametri noti all'utilizzatore.

L'angolo di registrazione κ_{re} è visibile nella Figura 3.

L'arco in presa φ non è noto a priori, ma è calcolabile con la formula seguente:

$$\cos(\varphi) = \frac{\frac{D_c}{2} - a_e}{\frac{D_c}{2}} = \frac{D_c - 2a_e}{D_c} = 1 - \frac{2a_e}{D_c}$$

Lo spessore medio di truciolo è alla base del calcolo della pressione media di taglio $k_{c,m}$:

$$k_{c,m} = k_{c1} h_m^{-x}$$

La pressione specifica di taglio k_{c1} e il coefficiente x , relativo al materiale dell'utensile, si ottengono dai cataloghi degli utensilieri. k_{c1} mantiene lo stesso valore sia in tornitura sia in fresatura, essendo un dato caratteristico del materiale da lavorare.

La forza di taglio si ottiene dalla formula seguente in cui tutti i parametri sono noti:

$$F_{c,m} = k_{c,m} A_D = k_{c,m} h_m a_p$$

Chiamiamo caso 1 quello in cui la fresa ha più denti (8 nella Figura 2) e caso 2 quello in cui abbiamo rimosso la metà dei denti.

Ora possiamo capire che nel caso 2 ogni dente sopporta un avanzamento al dente doppio, co-

me avevamo già detto, per cui la pressione di taglio vista dai denti del caso 2 sarà inferiore, secondo la formula della pressione di taglio e il grafico di Figura 2. La forza vista dai denti del caso 2 sarà superiore alla forza vista dai denti del caso 1, ma l'andamento non è lineare per cui i denti nel caso 2 sentono una forza inferiore al doppio del caso 1. Ciò comporta un vantaggio per il caso 2 in termini di coppia e potenza, che sono inferiori rispetto al caso 1. Proviamolo mediante le formule.

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad k_{c,m1} &= k_{c1} \cdot \left(\frac{2f_{z1} a_e}{\varphi D_c} \sin \kappa_{re} \right)^{-x} \\ \textcircled{2} \quad k_{c,m2} &= k_{c1} \cdot \left(\frac{2f_{z2} a_e}{\varphi D_c} \sin \kappa_{re} \right)^{-x} \end{aligned}$$

Come si può notare, dato che tutti i parametri sono uguali nei due casi, a meno del numero di denti della fresa e dell'avanzamento al dente, possiamo semplificare la formula arrivando



all'espressione seguente:

$$\frac{k_{c,m1}}{k_{c,m2}} = \left(\frac{f_{z1}}{f_{z2}}\right)^{-x} = \left(\frac{f_{z2}}{f_{z1}}\right)^x = 2^x = 2^{0.29} = 1.22$$

La pressione di taglio nel caso 1 è il 22 % maggiore rispetto al caso 2.

Ora consideriamo la potenza di taglio, dove η è l'efficienza meccanica della fresatrice:

$$P_c = \frac{k_{c,m} \cdot v_f \cdot a_p \cdot a_e}{60 \cdot 1000 \cdot \eta}$$

Il caso 1 consuma quindi il 22 % di potenza in più del caso 2 in quanto gli altri parametri presenti nella formula della potenza danno il tasso di asportazione di materiale, che è costante. Da questa trattazione si deduce come si potrebbe risparmiare potenza, quindi energia, usando frese con meno denti. Tali frese dovrebbero però essere costruite per fare in modo che i loro denti resistano a forze superiori. Il

corpo fresa invece sarebbe meno sollecitato in quanto la coppia di taglio del caso 2 è inferiore a quella del caso 1.

Questo fatto si può dedurre dalla potenza oppure anche dalla considerazione sovraesposta secondo la quale la forza aumenta per i denti del caso 2, ma in modo meno che proporzionale. Quando si calcola quindi la coppia moltiplicando la forza al dente per il braccio (cioè il raggio della fresa) e per il numero di denti in presa (pari alla metà del caso 1), si ottiene un valore di coppia inferiore per il caso 2. Non si deve dimenticare che la maggior forza al dente del caso 2 lo rende maggiormente soggetto a vibrazioni.

Frese ad alto avanzamento

Ora consideriamo il caso delle frese ad alto avanzamento.

Questo tipo di frese è caratterizzato da un angolo di registrazione k_{re} molto basso, pari anche

a soli 10°. Sono frese che scaricano le forze di taglio quasi completamente in direzione assiale, fatto che consente loro di avere lunghezze a sbalzo superiori, per esempio quando si tratta di fresare il fondo di una cava molto profonda. Per lo stesso motivo però richiedono che il pezzo sia rigido in direzione assiale affinché non si infletta sotto le forze verticali imposte dalla fresa.

Dato il loro basso angolo di registrazione, le frese ad alto avanzamento non possono effettuare grandi asportazioni assiali per cui sono adatte quando il materiale da rimuovere è anche molto duro, ma lo spessore da rimuovere non è grande in direzione assiale.

Vediamo perché le frese ad alto avanzamento possono resistere, come dice il loro stesso nome, ad avanzamenti superiori.

Per capirlo, si deve partire dall'equazione che definisce il carico per unità di lunghezza di tagliente in presa:



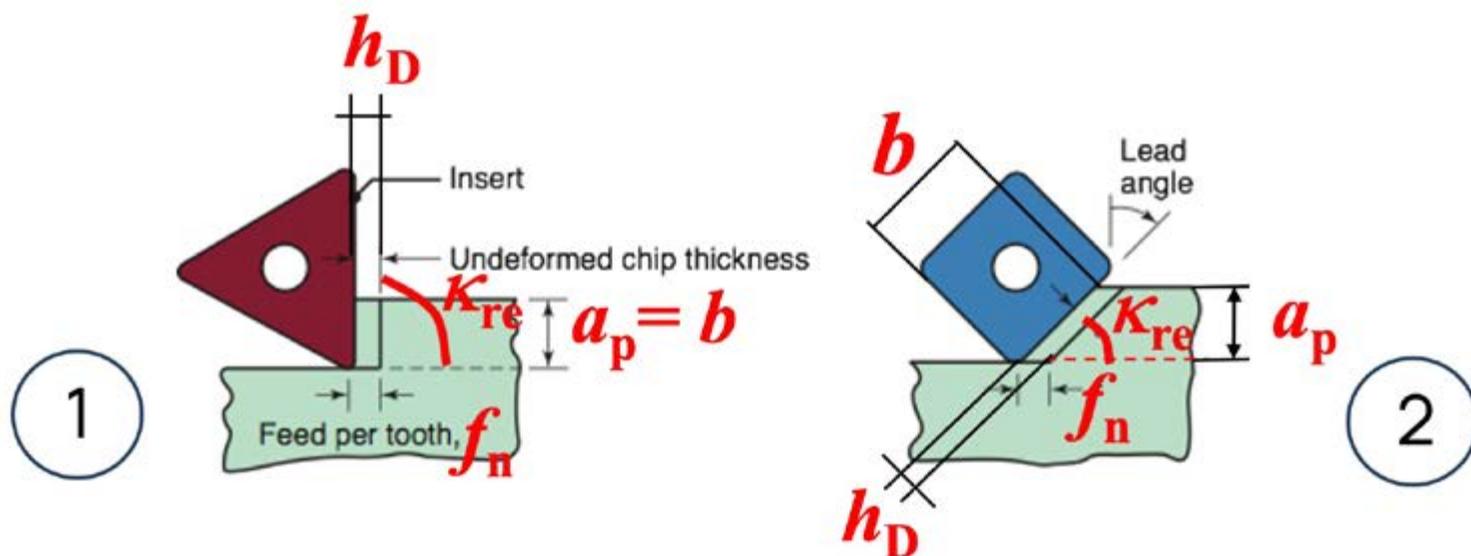


Figura 4: Confronto tra il caso 1 (angolo di registrazione pari a 90°) e il caso 2 (angolo di registrazione pari a 45°)

$$\frac{F_{c,m}}{b} = k_{c1} \cdot h_m^{1-x}$$

Questo è il carico a cui deve resistere un dente di una fresa. L'utensiliere consiglia lo spessore di truciolo massimo, quindi l'avanzamento al dente massimo, sopportabile dalla fresa considerando proprio il carico per unità di lunghezza di tagliente in presa.

Immaginiamo di partire da un angolo di registrazione di 45° e, mantenendo il carico per unità di lunghezza di tagliente in presa, riduciamo tale valore, come accade per le frese ad alto avanzamento. Manteniamo tutti gli altri parametri costanti.

Possiamo calcolare gli spessori di truciolo nei due casi come segue:

$$h_{m1} = \frac{2f_{z1}a_e \sin\kappa_{re1}}{\varphi D_c} \quad h_{m2} = \frac{2f_{z2}a_e \sin\kappa_{re2}}{\varphi D_c}$$

Vogliamo mantenere il carico per unità di lunghezza di tagliente in presa costante per cui:

$$h_{m1} = h_{m2}$$

da cui deriva:

$$\frac{2f_{z1}a_e \sin\kappa_{re1}}{\varphi D_c} = \frac{2f_{z2}a_e \sin\kappa_{re2}}{\varphi D_c}$$

e anche:

$$f_{z1} \sin\kappa_{re1} = f_{z2} \sin\kappa_{re2}$$

in quanto tutti i parametri sono uguali nei due casi a meno dell'angolo di registrazione e dell'avanzamento al dente.

Si può ora calcolare l'avanzamento nel caso 2 in questo modo:

$$f_{z2} = f_{z1} \frac{\sin\kappa_{re1}}{\sin\kappa_{re2}}$$

Nel caso 1 abbiamo il seno dell'angolo di registrazione pari a 1 e nel caso 2 pari a 0,71:

$$1 \quad \sin\kappa_{re1} = \sin 90^\circ = 1$$

$$2 \quad \sin\kappa_{re2} = \sin 45^\circ = 0.71$$

Questo implica che, mantenendo il carico sul dente costante, nel caso 2 la fresa possa sopportare un avanzamento al dente, quindi un MRR, del 41 % superiore:

$$f_{z2} = f_{z1} \frac{1}{0.71} = 1.41 f_{z1}$$

Dato che lo spessore di truciolo è uguale nei due casi, anche la pressione di taglio è uguale. La potenza invece è del 41 % superiore nel caso 2 a causa dell'incremento di MRR. Stessa cosa per la coppia di taglio e per la forza sul singolo dente.

Questo secondo caso ci dice quindi che le frese ad alto avanzamento sono una buona

soluzione per aumentare la velocità di avanzamento senza produrre un aggravio di carico per la fresa.

Questa maggiore capacità di rimuovere materiale nell'unità di tempo però avviene con un aumento proporzionale della potenza di taglio quindi dell'energia richiesta per la lavorazione. Inoltre, non dobbiamo dimenticare che la profondità di passata è ridotta per questo tipo di frese.

Da un punto di vista energetico, il primo caso affrontato in questo articolo (riduzione del numero di denti) produce un interessante risparmio energetico, da usare ovviamente in sgrossatura in quanto la finitura superficiale risente dell'aumento dell'avanzamento al dente. Nel secondo caso invece, l'aumento di MRR che si ottiene con una fresa ad alto avanzamento avviene a spese di un maggior esborso energetico.

Ora nella nostra trattazione in merito alle scelte opportune per ricercare un risparmio energetico nelle lavorazioni di fresatura manca di considerare il caso della fresatura trocoidale, che sarà affrontato in un prossimo articolo.

Riferimenti bibliografici

"Tecnologia Meccanica", M.P. Groover, Edizioni CittàStudi

"Tecnologia Meccanica", S. Kalpakijan, S.R. Schmidt, Edizioni Pearson