L’energia in tornitura e fresatura

Questo articolo fornisce la definizione della pressione di taglio e mostra come sia un parametro chiave per la potenza e l'energia richiesta per le lavorazioni di tornitura e fresatura, ma, più in generale, per tutte le operazioni di asportazione di truciolo

Massimiliano Annoni

L'articolo prende spunto dall'attuale necessità di stimare e ottimizzare l'energia richiesta per le lavorazioni di asportazione di truciolo per pervenire a un utilizzo consapevole e efficiente delle risorse (vedi QR Code in apertura). L'intento è dimostrare come il parametro pressione di taglio venga in mostro aiuto. La pressione di taglio k_c è una grandezza che chi ha seguito un corso di Tecnologia Meccanica ha studiato e chi si è occupato di calcolare le forze di taglio in aziende manifatturiere ha usato, prendendo il suo valore di riferimento dai cataloghi dei produttori di utensili (Figura 1). Non molti sanno però che la pressione di taglio ha un significato fisico importante, soprattutto oggi che giustamente si vuole valutare l'energia richiesta per una operazione di asportazione di truciolo.

Questo articolo fornisce la definizione della pressione di taglio e mostra come sia un parametro chiave per la potenza e l'energia richiesta per le lavorazioni di tornitura e fresatura, ma, più in generale, per tutte le operazioni di asportazione di truciolo.

Significato energetico della pressione di taglio nel taglio ortogonale e in tornitura

Il taglio ortogonale è la situazione più semplice da studiare per l'asportazione di truciolo in quanto rappresenta il caso di una lavorazione ideale che avviene senza avanzamento e che produce forze di taglio appartenenti a un piano. Ciò significa che se lo paragoniamo alla tornitura, cioè la lavorazione più vicina al taglio ortogonale, le forze prodotte non generano la forza di repulsione, vale a dire la forza radiale rispetto al pezzo, ma soltanto la forza di taglio F_c e la forza di avanzamento F_f (Figura 2).

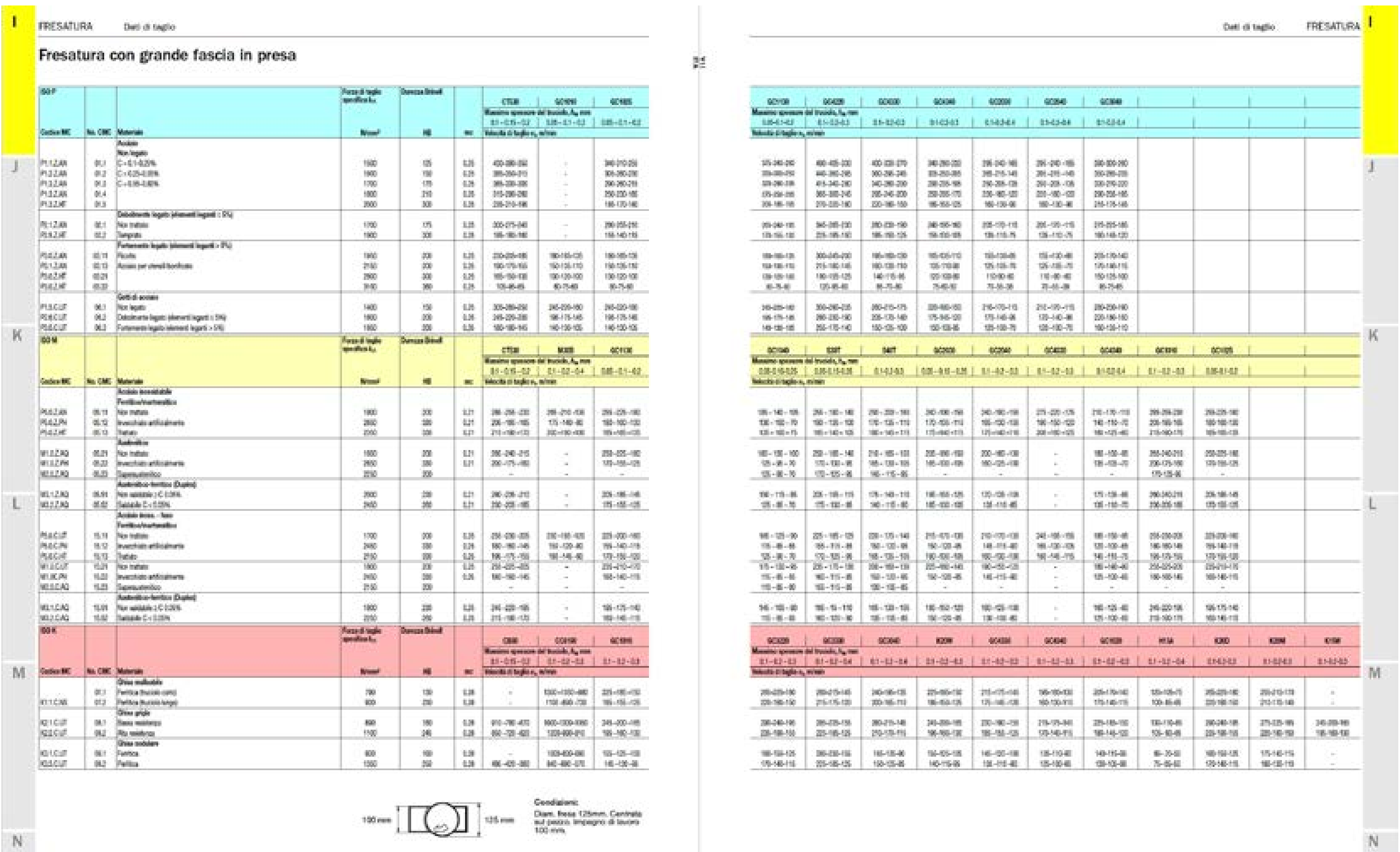


Figura 1: Tabella dei dati di taglio per la fresatura tratta dal Catalogo Utensili Rotanti 2020 (Sandvik Coromant). La tabella riporta la Forza di taglio specifica, kc1

Tutte le grandezze cinematiche e dinamiche appartengono a un piano nel taglio ortogonale. Affinché ciò avvenga, devono essere verificate alcune ipotesi:

- Il tagliente deve essere rettilineo e ortogonale alla direzione di taglio, cioè alla velocità di taglio v_c. Se si vuole ottenere un taglio ortogonale in tornitura, che già è abbastanza simile al taglio ortogonale, l'utensile deve essere "a coltello", cioè deve avere un tagliente parallelo allo stelo, come nella Figura 2.
- L'utensile deve essere più largo del pezzo in modo che il truciolo non sia vincolato lateralmente, come invece avviene quando la punta dell'utensile è in presa. Questa condizione si può ottenere tornendo un tubo con un utensile a coltello che abbia la punta all'interno del tubo stesso, non in presa.
- Lo spessore di truciolo indeformato h_D deve essere molto inferiore alla larghezza del truciolo b. Anche questa condizione serve per fare in modo che gli effetti tridimensionali dovuti alle estremità laterali del truciolo siano poco influenti rispetto alla gran parte della larghezza del truciolo, che si trova invece in una condizione di forze bidimensionali.

Se consideriamo la potenza richiesta da un'operazione di taglio ortogonale, otteniamo:

$$P_c = F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f$$

Il termine a primo membro è la "potenza di taglio" P_c e si ottiene sommando la potenza che utensile e pezzo si scambiano lungo la direzione di taglio e lungo la direzione di avanzamento. Nella formula, F_c è la componente della forza scambiata tra utensile e pezzo che giace lungo la direzione di taglio stabilita da v_c. Per questo motivo F_c è tangenziale al pezzo in tornitura. La F_f è l'altra componente, che è perpendicolare a F_c e che, in tornitura, giace lungo la direzione dell'avanzamento.

Nel calcolo della potenza nel taglio ortogonale, si semplifica la relazione precedente considerando che la forza di avanzamento non lavora e non richiede potenza non essendo presente un moto di avanzamento. In tornitura si semplifica comunque la formula nello stesso modo in quanto solitamente F_f è inferiore a F_c e la velocità di avanzamento v_f è inferiore a v_c. La formula della potenza diventa quindi:

$$P_c = F_c \cdot v_c$$

E' qui che possiamo dare una prima definizione della pressione di taglio, che è anche quella che le fornisce il più interessante significato fisico. La pressione di taglio può essere pensata e calcolata come la potenza richiesta per asportare un'unità di volume di un certo materiale nell'unità di tempo (oppure l'energia richiesta per asportare un'unità di volume):

$$k_c = \frac{P_c}{Q} = \frac{F_c \cdot v_c}{v_c \cdot h_D \cdot b} = \frac{F_c}{h_D \cdot b} = \frac{F_c}{A_D}$$

Nella formula, Q è il tasso di rimozione del ma-

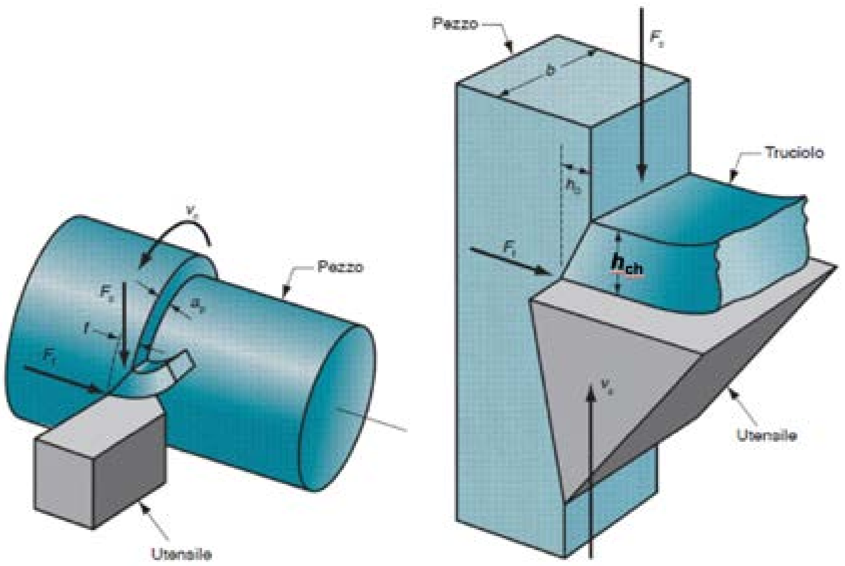


TABELLA Conversioni tra tornitura e taglio ortogonale.

Operazione di tornitura	Modello di taglio ortogonale
Avanzamento f =	Spessore del truciolo h_D
Profondità di passata a_p =	Larghezza di taglio indeformato b
Velocità di taglio v_c =	Velocità di taglio v_c
Forza di taglio F_c =	Forza di taglio F_c
Forza di avanzamento F_f =	Forza di avanzamento F_f

Figura 2: Analogia tra tornitura (a sinistra) e il taglio ortogonale (a destra). Tratto da "Tecnologia Meccanica", M.P. Groover, Edizioni CittàStudi

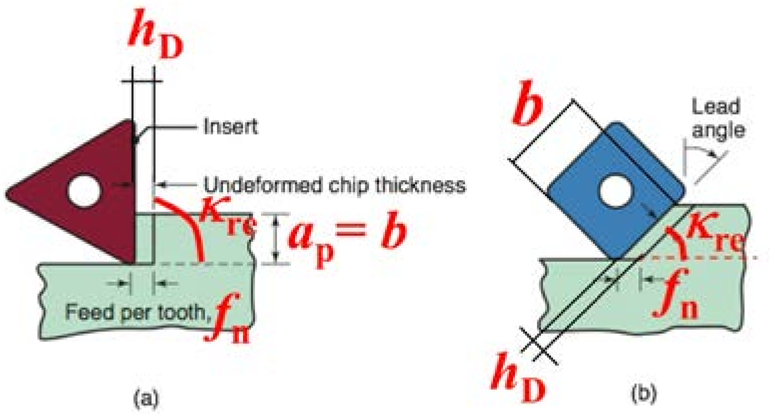


Figura 3: Spessore del truciolo h_D. a) caso di un angolo di inclinazione del tagliente principale pari a 90°; b) caso di un angolo di inclinazione del tagliente principale pari a 45°. Tratto da "Tecnologia Meccanica", S. Kalpakijan, S.R. Schmidt, Edizioni Pearson

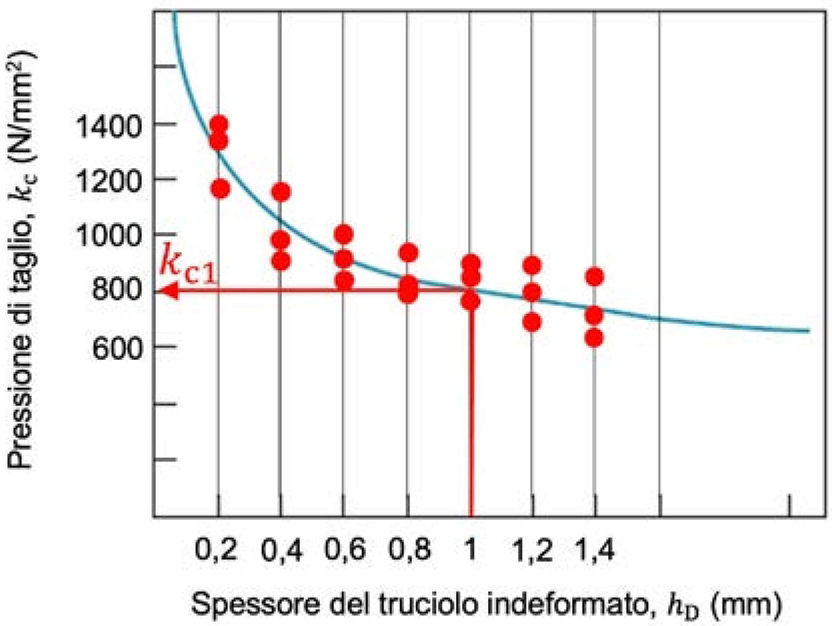


Figura 4: Grafico utile al produttore di utensili per ottenere il valore di kc1

teriale (tipicamente espresso in mm3/min) e A_D è l'area della sezione del truciolo indeformato. k_c dice quindi quanta energia serve per rimuovere un dato volume di materiale dal pezzo. Per esempio, conoscendo il k_c, possiamo moltiplicarlo per la differenza di volume tra pezzo grezzo e pezzo finito per avere immediatamente l'energia richiesta per l'operazione. k_c è un parametro estremamente rilevante per le valutazioni di sostenibilità energetica di una lavorazione. Il suo valore è confermato dal fatto che anche altri processi di lavorazione possono contare su grandezze fisiche dal significato analogo, come il lavoro di deformazione per la deformazione plastica. Grazie a tali grandezze si possono confrontare i processi mediante la quantità di energia richiesta per la lavorazione. Ovviamente non vanno dimenticati altri motivi per eseguire un processo, come la possibilità di ottenere la qualità richiesta, cosa che rende l'asportazione di truciolo pressoché insostituibile

per finire il pezzo.
Il k_c della formula però non è il valore tabulato nei cataloghi dei produttori di utensili (Figura 1). Manca ancora un passaggio per potersi riferire a tali cataloghi.

Definizione della pressione di taglio e legame con i cataloghi degli utensili

La norma UNI ISO 3002/4 definisce la pressione di taglio in questo modo:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D}$$

La pressione di taglio è definita come il rapporto tra la forza di taglio e l'area della sezione del truciolo indeformato. E' interessante notare come questa formula possa essere usata in due modi diversi a seconda che ad usarla sia un utilizzatore del processo o un produttore di utensili. Un utilizzatore del processo userà la formula per calcolare la forza di taglio nel modo seguente:

$$F_c = k_c \cdot A_D$$

Lo scopo dell'utilizzatore è stimare la forza per calcolare la deflessione di un utensile oppure la deflessione di una parete sottile oppure ancora per capire se l'attrezzatura di bloccaggio del pezzo resisterà alla lavorazione. Per questo calcolo, l'utilizzatore dispone dello spessore del truciolo indeformato h_D, ottenibile dalla formula seguente, considerando anche la Figura 3:

$$h_D = f_n sen(\kappa_{re})$$

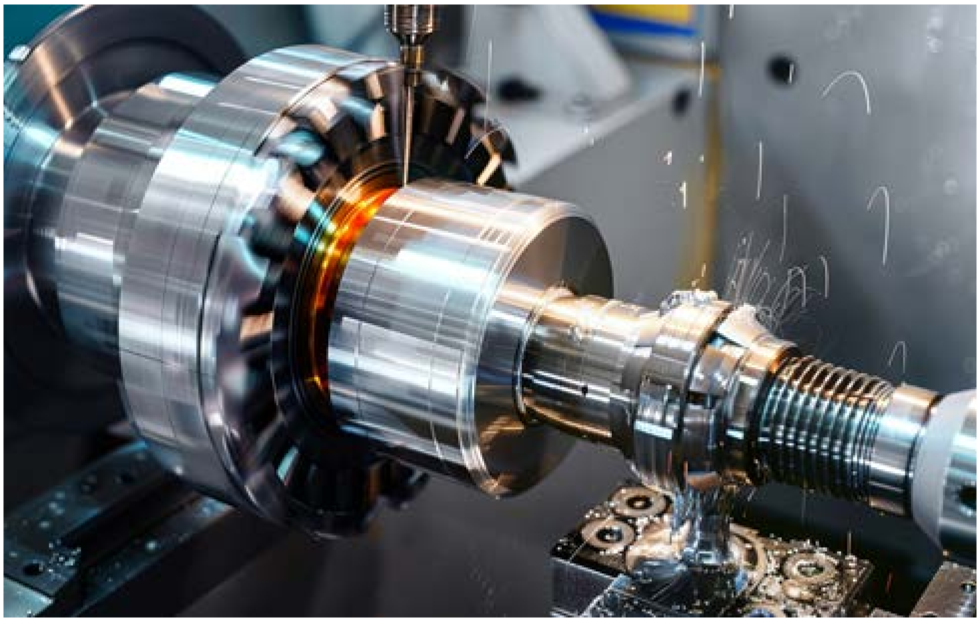
L'avanzamento al giro f_n e l'angolo di direzione del tagliente principale k_{re} sono noti all'utilizzatore, che ha scelto la forma dell'inserto e che dispone dell'avanzamento consigliato dal catalogo dell'utensiliere.
Nel caso Figura 3a, lo spessore del truciolo è pari all'avanzamento al giro.
La larghezza del truciolo b si ottiene dalla formula (Figura 3):

$$b = \frac{a_p}{sen(\kappa_{re})}$$

A_D può essere allora ricavato come segue:

$$A_D = h_D \cdot b = f_n sen(\kappa_{re}) \frac{a_p}{sen(\kappa_{re})} = f_n \cdot a_p$$

In sostanza A_D può essere calcolato sia come prodotto tra spessore del truciolo e larghezza del truciolo sia come prodotto tra avanzamento al giro e profondità di passata. Questo secondo modo di calcolare A_D è molto più famigliare per l'utilizzatore, che conosce entrambi i parametri di taglio f_n e a_p.
A questo punto, per ottenere F_c, serve solo il valore di k_c.
Qui entra in gioco il produttore degli utensili, che userà esattamente la definizione del k_c proveniente dalla norma per ottenerne il valore mediante un'adeguata sperimentazione in cui, a



fronte di un valore fissato e posto in macchina per f_n e a_p, viene misurata la forza F_c e poi calcolata la k_c. Prima di tutto però è bene sottolineare che il k_c non è un valore costante, ma dipende da vari fattori:

- Spessore di truciolo indeformato, h_D
- Area della sezione del truciolo indeformato, A_D
- Proprietà meccaniche del materiale in lavorazione (carico di rottura, durezza, struttura cristallina) quindi dallo stato di fornitura dello stesso (v. trattamenti termici)
- Materiale dell'utensile e geometria del tagliente (in particolare dall'angolo di spoglia frontale γ_0)
- Velocità di taglio v_c
- Condizioni di lubrificazione della zona di taglio

Per questi motivi, i valori di k_c ottenuti attraverso misure della F_c sono validi solo per le condizioni adottate nella sperimentazione.
Ci viene però in aiuto la formulazione del k_c sviluppata da Kronenberg nel secolo scorso:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^x}$$

Kronenberg provò che la pressione di taglio non dipende genericamente da A_D, ma soltanto dallo spessore di truciolo indeformato h_D. E' possibile quindi giungere a una formula per il k_c che contenga h_D e che abbia soltanto due parametri da ottenere mediante una regressione effettuata su dati sperimentali: x, fattore che dipende dal materiale dell'utensile, e k_{c1}, chiamato pressione specifica di taglio in quanto è un valore particolare della pressione di taglio ottenuto per un'area A_D pari a 1 mm^2. k_{c1} dipende principalmente dal materiale da lavorare quindi può essere tabulato in funzione soltanto del materiale stesso (o della sua composizione chimica) e del parametro che più influisce sulla forza di taglio, la sua durezza (Figura 1).
Affinché quanto detto sia valido e ripetibile, si devono mantenere costanti alcuni fattori nella sperimentazione, in quanto altrimenti giocherebbero un ruolo sul valore di k_c, in particolare il k_{re}, mantenuto pari a 90° nella sperimentazione, il Yo dell'utensile, mantenuto pari a +6°, la velocità di taglio v_c (che però ha un effetto poco rilevante sul k_c) e le condizioni di lubrificazione.
I parametri costanti della sperimentazione possono essere ottenuti chiedendo al produttore degli utensili, che dovrebbe anche fornire indicazioni su come ottenere il valore di k_{c1} quando le condizioni di lavorazione si discostano da quelle in cui il valore tabulato è stato ottenuto.
In ogni caso, il valore di k_{c1} è sufficientemente robusto, tanto che il metodo della pressione di taglio per calcolare la forza è il più diffuso industrialmente.

Il produttore di utensili che debba eseguire una sperimentazione per determinare il valore di k_{c1} per un dato materiale può organizzare un esperimento di taglio ortogonale in tornitura (o un esperimento simile), lavorando un tubo con spessore di parete 1 mm, o anche più grande, e usando un utensile che assolva ai vincoli della sperimentazione esposti sopra.
Se lo spessore di parete del tubo fosse pari a 1 mm e k_{re} = 90° come richiesto, avremmo che $b=a_p=1$ mm e $h_D = f_n$. a_p viene mantenuto costante in quanto non ha un effetto sul k_c. Il tornio su cui eseguire l'esperimento deve essere strumentato con cella di carico in modo da acquisire F_c.
A questo punto l'esperimento potrebbe prevedere 3 repliche per ognuno dei valori di h_D mostrati nel grafico d'esempio di Figura 4 (da 0,2 mm a 1,4 mm con passo 0,2 mm). I punti rossi nel grafico di Figura 4 rappresentano, per ogni ripetizione, il risultato del calcolo $k_c = F_c/A_D$. Anche se ben ripetibile, l'esperimento produrrà una certa variabilità.
Viene effettuata una regressione per ottenere la curva rappresentata in figura, che approssima bene i dati, e i suoi coefficienti k_{c1} e x.
L'andamento del k_c in funzione dello spessore di truciolo è ben descritto da una funzione esponenziale negativa, che rappresenta il fenomeno fisico secondo cui il materiale in lavorazione richiede un carico maggiore per essere asportato quando lo spessore di truciolo si riduce.
Questo concetto è alla base del risparmio energetico che si può ottenere aumentando lo spessore del truciolo.
E' bene notare che non solo gli utensilieri usano questo approccio per determinare k_{c1} e x, ma anche le aziende che lavorino materiali avanzati su cui non c'è ancora documentazione potrebbero organizzare esprimenti simili per la loro caratterizzazione.
Tornando al caso dell'utilizzatore, che ci interessa maggiormente, la prima cosa da fare è calcolare la pressione di taglio corrispondente all'avanzamento al giro richiesto per la lavorazione. Il valore di k_{c1} e il parametro x si deducono dal catalogo dell'utensiliere (Figura 1):

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^x} = \frac{k_{c1}}{f_n^x (sen^x \kappa_{re})} = \frac{k_{c1}}{f_n^x}\left(\frac{1}{sen\kappa_{re}}\right)^x$$

Dopodiché si può calcolare il valore della forza di taglio:

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot f_n \cdot a_p$$
$$= k_{c1} \cdot f_n^{1-x} \cdot a_p \left(\frac{1}{sen\kappa_{re}}\right)^x$$

E' anche immediato calcolare la potenza richiesta per la lavorazione:

$$P_c = F_c \cdot v_c = k_c \cdot Q$$

A questo punto, conoscendo la velocità di avanzamento v_f e la lunghezza del pezzo da tornire L, si può calcolare il tempo necessario per la lavorazione $t = L/v_f$. Moltiplicando P_c per t, si ha l'energia richiesta. Per quanto abbiamo detto, si può anche ottenere l' energia moltiplicando k_c per il volume di materiale da rimuovere.

Tornitura

$$P_c = \frac{k_c \cdot \underbrace{f \cdot a_p \cdot v_c}_{Q}}{\eta \cdot 60} [W]$$

Fresatura (h_m)

$$P_c = \frac{k_{c,m} \cdot \underbrace{v_f \cdot a_p \cdot a_e}_{Q}}{60 \cdot 1000 \cdot \eta} [W]$$

Figura 5: Analogia tornitura-fresatura per il calcolo della potenza di taglio (f = fn in tornitura; η = rendimento meccanico della macchina)

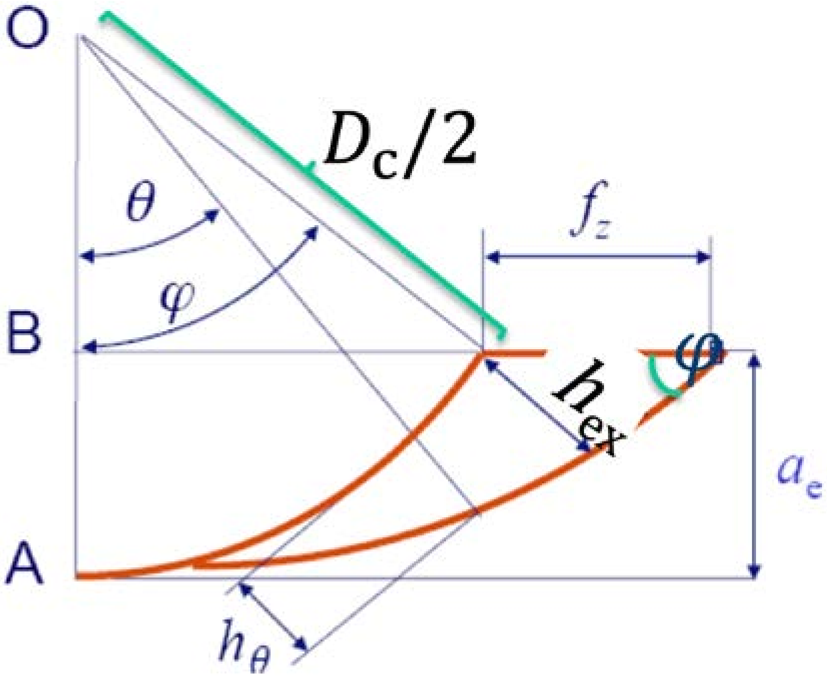


Figura 6: Arco in presa in un'operazione di fresatura

Uso sella pressione di taglio per calcolare l'energia in fresatura

Grazie a quanto ottenuto precedentemente, sappiamo che anche in fresatura si può calcolare la potenza grazie alla pressione di taglio (Figura 5).
Ci sono però alcuni accorgimenti per usare la formula per la fresatura.
In essa compare il $k_{c,m}$, che è la pressione di taglio relativa allo spessore medio di truciolo h_m.
Considerando l'arco in presa φ raffigurato nella Figura 6, si può notare in rosso l'andamento dello spessore di truciolo istantaneo h_θ che, in un'operazione di fresatura concorde, passa dal suo valore massimo h_{ex} a un valore nullo. Per stimare la potenza, usiamo il valore medio h_m, che dà luogo al valore di $k_{c,m}$ secondo la formula di Figura 5 (destra).
Dalle formule della fresatura si ha:

$$h_{\mathrm{m}} = \frac{2 f_z a_e}{\varphi D_c}$$

Nella formula compare il diametro della fresa D_c, l'avanzamento al dente f_z e la profondità di passata radiale a_e, tutti parametri noti all'utilizzatore. L'arco in presa non è noto a priori, ma è calcolabile con la formula seguente:

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

La formula per il calcolo di kc è sempre la stessa, ma ora la usiamo fornendo in input il valore dello spessore medio di truciolo:

$$k_{\mathrm{c,m}} = k_{c1} h_{\mathrm{m}}^{-x}$$

Un fatto molto rilevante è che il k_{c1} mantiene lo stesso valore sia in tornitura sia in fresatura, essendo un dato caratteristico del materiale. Questo rende generale l'approccio basato sulla pressione di taglio.

Ora si può calcolare il valore della potenza in fresatura secondo la Figura 5.

Anche in questo caso, è possibile ottenere l'energia moltiplicando la potenza per il tempo di lavorazione oppure moltiplicando il $k_{c,m}$ per il volume di materiale rimosso.

Come abbiamo visto in questo articolo, la stima dell'energia richiesta per una lavorazione può essere ottenuta semplicemente moltiplicando il valore del volume di materiale da rimuovere per la pressione di taglio k_c, opportunamente calcolata considerando lo spessore di truciolo medio per la fresatura o lo spessore di truciolo indeformato per la tornitura.

Ovviamente il valore di energia ottenuto è una stima e, soprattutto per le operazioni di fresatura, dove lo spessore di truciolo medio continua a cambiare a causa delle traiettorie utensile, potrebbe portare a errori.

Inoltre si deve considerare che alle volte il contributo del processo all'energia richiesta per una lavorazione è poco rilevante rispetto al consumo prodotto dagli organi ausiliari della macchina come il chiller.

Riferimenti bibliografici

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

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