



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale/magistrale **Ingegneria per la sostenibilità industriale**

**Ottimizzazione del taglio di profili metallici tramite controllo adattivo della
velocità di avanzamento**

Optimization of metal profile cutting through adaptive feed rate control

Relatore: Chiar.mo
Prof. Ing. **Loris Penserini**, PhD

Tesi di Laurea di:
Andrea Daloia

A.A. 2025/2026

Indice generale

Introduzione alle macchine utensili.....	3
Definizione macchina utensile.....	3
Tipologie di macchine utensili per il taglio del metallo: la sega a nastro.....	4
Consumo energetico di una macchina utensile.....	5
Principi sul taglio dei metalli.....	6
L'utensile: proprietà e design.....	6
Meccanica del taglio e formazione del truciolo.....	9
Principali velocità nell'asportazione del truciolo.....	11
Usura dell'utensile e generazione di calore.....	13
Ottimizzazione sui profili di taglio.....	15
Approccio attuale alle geometrie di taglio.....	15
Variabili che influenzano la velocità.....	16
Introduzione di una velocità di taglio variabile.....	17
Risultati e conclusioni.....	19
Elenco dei parametri usati.....	19
Descrizione dell'approccio geometrico adottato.....	20
Risultati ottenuti e confronto con lo standard di riferimento.....	21
Caso A: cilindro pieno.....	22
Caso B: cilindro cavo.....	23
Conclusione generale.....	24
Conclusioni generali.....	24
Sviluppi Futuri.....	25
Natura teorica dei risultati.....	25
Future ottimizzazioni su altre geometrie.....	26
Applicazioni nell'industria 5.0 e nell'automazione.....	27
Appendice.....	29
Bibliografia.....	48

Introduzione alle macchine utensili

Definizione macchina utensile

Il termine macchina utensile designa una categoria di macchine operatrici destinate alla lavorazione di materiali, quali metalli, ma anche legno, materie plastiche e compositi, mediante l'asportazione controllata di materiale o la sua deformazione permanente. A differenza degli utensili manuali, nelle quali il moto viene impresso direttamente dall'operatore, la macchina utensile è una macchina dotata di azionamento proprio, generalmente elettrico, che vincola cinematicamente il moto relativo tra pezzo e utensile garantendo precisioni geometriche e ripetibilità dei risultati non conseguibili per via manuale.

Possiamo identificare, quindi, la macchina utensile come una macchina non portatile, azionata meccanicamente, nella quale la traiettoria dell'utensile rispetto al pezzo è determinata dalla struttura stessa della macchina e non dal solo intervento dell'operatore. Tale definizione esclude pertanto gli utensili motorizzati portatili, quali ad esempio trapani o smerigliatrici angolari, che pure impiegano un motore e un utensile, ma nei quali il controllo del moto rimane affidato alla mano dell'operatore.

Nel corso del Novecento, e con accelerazione crescente a partire dagli anni Settanta, l'introduzione del controllo numerico computerizzato ha profondamente modificato la natura stessa della macchina utensile: da sistema meccanico governato dall'abilità dell'operatore, essa si è trasformata in un sistema mecatronico integrato, nel quale la componente software riveste un ruolo centrale tanto quanto quella meccanica. Questa evoluzione ha reso possibile lavorazioni di complessità geometrica elevata, riducendo al contempo i tempi di ciclo e la dipendenza dalla manualità specializzata, con ricadute significative sull'intera organizzazione della produzione industriale.

Va sottolineato che la macchina utensile non costituisce un sistema isolato, bensì il nodo di un processo produttivo più ampio: la sua efficienza dipende dalla qualità dei materiali impiegati, dalla corretta scelta dei parametri di taglio e dalla gestione delle condizioni di lubrificazione e raffreddamento.

Tipologie di macchine utensili per il taglio del metallo: la sega a nastro

Tra le macchine utensili destinate al taglio dei metalli, è possibile distinguere diverse famiglie in base al principio operativo adottato: le seghe circolari, che impiegano un disco dentato in rotazione continua, e le seghe a nastro, nelle quali l'elemento di taglio è un nastro flessibile chiuso ad anello che scorre in modo continuo lungo un percorso guidato. Ciascuna di queste tipologie presenta vantaggi specifici in funzione del materiale da lavorare, delle dimensioni del pezzo e dei requisiti di produttività.



Sega a nastro

Figura 1: Sega a disco

Nello specifico, la sega a nastro per metalli è una macchina caratterizzata da una struttura portante robusta, generalmente in ghisa o acciaio saldato, sulla quale sono montate due ruote, attorno alle quali scorre il nastro da taglio. Il pezzo da tagliare è bloccato da una morsa integrata nel piano di lavoro della macchina, la cui funzione è quella di mantenere il materiale fermo e correttamente posizionato rispetto alla linea di taglio, evitando vibrazioni che potrebbero comprometterne la qualità.

Dal punto di vista della configurazione, le seghe a nastro per metalli si suddividono principalmente in due categorie: le macchine verticali, nelle quali il nastro scorre in piano verticale e il pezzo viene avanzato manualmente o automaticamente verso l'utensile, e le macchine orizzontali, nelle quali è la lama a scendere progressivamente sul pezzo mantenuto fisso dalla morsa. Quest'ultima configurazione è la più diffusa in ambito industriale per il taglio di profilati e barre, in quanto consente di automatizzare facilmente l'avanzamento e di gestire pezzi di lunghezza considerevole con un ingombro complessivo contenuto.

Sul piano del grado di automazione, infine, si distinguono macchine manuali, nelle quali l'operatore governa direttamente le fasi di lavoro, macchine semiautomatiche, che eseguono

il ciclo di taglio ma richiedono il caricamento manuale del pezzo, e macchine completamente automatiche, dotate di sistemi di avanzamento e alimentazione che consentono di operare in modo continuativo con un intervento umano minimo.

Consumo energetico di una macchina utensile

Il fabbisogno energetico di una macchina utensile non si esaurisce nella sola potenza richiesta dall'azione di taglio, ma comprende una quota significativa di consumi legati a funzioni ausiliarie e di supporto che restano attive indipendentemente dall'esecuzione della lavorazione. Si possono dividere le attività della macchina in due categorie: produttive, direttamente connesse al processo di asportazione o improduttive, necessarie a supporto delle prime ma non legate all'effettivo taglio del materiale. Da un punto di vista energetico, questa distinzione è di importanza centrale, perché le attività improduttive che includono per esempio il pompaggio del lubro-refrigerante e il funzionamento dei gruppi idraulici e secondari, costituiscono una parte importante del consumo totale, spesso denominata carico base.

Nelle macchine utensili a controllo numerico il carico base rimane pressoché costante a prescindere dall'intensità della lavorazione in corso. Nel contesto di una sega a nastro il motore che aziona il nastro e il meccanismo di avanzamento della lama assorbono potenza in funzione diretta delle condizioni di taglio, mentre il sistema di lubrificazione, e gli organi di controllo operano in modo sostanzialmente continuo per tutta la durata del ciclo, incluse le fasi in cui la lama non è in contatto con il materiale. Ne discende che il consumo energetico complessivo di un ciclo di taglio dipende non solo dalla potenza istantanea di asportazione, ma anche dalla durata totale del ciclo, poiché ogni secondo di lavorazione porta con sé un contributo fisso del carico base indipendente dall'avanzamento effettivo.

Principi sul taglio dei metalli

L'utensile: proprietà e design

Nella sega a nastro il vero protagonista del processo è la lama, un nastro continuo chiuso ad anello che scorre su due o più volani motorizzati e attraversa il materiale da sezionare con un moto unidirezionale e ininterrotto. A differenza di quanto avviene in altre macchine utensili, dove l'utensile è un corpo rigido di dimensioni contenute, la lama di una sega a nastro è un elemento flessibile, sottoposto ciclicamente a flessione ogni volta che si avvolge attorno ai volani, e soggetto contemporaneamente alle sollecitazioni meccaniche generate dal contatto con il pezzo. Questa duplice natura, flessibilità strutturale da un lato, durezza e tenacità del tagliente dall'altro, è il problema centrale che la progettazione della lama deve risolvere, e le soluzioni adottate nel corso dei decenni hanno dato origine a tre famiglie costruttive distinte, ciascuna con caratteristiche, campi d'impiego e limiti propri.

La forma più semplice e storicamente più antica di lama per sega a nastro è quella ricavata da un unico nastro di acciaio. In questa soluzione il materiale è omogeneo lungo tutta la sezione trasversale, ma la distribuzione della durezza può variare a seconda del trattamento termico applicato, dando luogo a due varianti costruttive ben distinte.

Nella lama a dorso temprato l'intero nastro subisce un trattamento di tempra che indurisce sia il bordo dentato che il dorso. L'elevata durezza diffusa conferisce alla lama una maggiore rigidità e la capacità di sopportare pressioni di avanzamento più elevate, a vantaggio della velocità di taglio. Tuttavia, un dorso eccessivamente indurito è anche più fragile e meno capace di assorbire le deformazioni cicliche imposte dai volani.

La variante a dorso flessibile, risolve in parte questo problema adottando una tempra selettiva che indurisce esclusivamente il bordo dentato, lasciando il dorso in condizioni di relativa morbidezza. Il dorso non temprato assorbe più facilmente le sollecitazioni a flessione, aumentando la vita a fatica della lama, a discapito però di una minore rigidità complessiva e di una minore capacità di sostenere pressioni di avanzamento elevate. Entrambe le varianti in acciaio al carbonio trovano impiego prevalentemente in applicazioni di uso generale e su materiali a bassa e media durezza e solitamente hanno un costo contenuto.

L'esigenza di coniugare in una stessa lama la tenacità necessaria a sopravvivere alle flessioni cicliche con la durezza richiesta per tagliare materiali più resistenti ha portato alla costruzione di lame dette lame bimetalliche. In questa soluzione costruttiva la lama è composta da due materiali distinti, ciascuno ottimizzato per la funzione che deve svolgere: un nastro di supporto in acciaio ad alta resistenza a fatica, sul quale viene saldata, mediante processo a fascio di elettroni, una fascia di acciaio rapido ad alto tenore di tungsteno che

forma la parte dentata della lama. La saldatura a fascio di elettroni garantisce un giunto con elevata resistenza meccanica.

Il risultato è una lama in cui il dorso conserva la flessibilità e la resistenza alla fatica, mentre i denti, presentano una durezza superficiale nettamente superiore a quella ottenibile con un trattamento dell'intera sezione. Questa combinazione consente velocità di taglio più elevate, una maggiore durata del tagliente e la possibilità di lavorare materiali che consumerebbero rapidamente una lama monolitica. Per queste ragioni la lama bimetallica è oggi la scelta prevalente nelle applicazioni di produzione su materiali di medio-alta resistenza e ha un costo superiore a quelle costituite da un solo metallo.

Per applicazioni particolarmente gravose lama bimetallica non offre prestazioni sufficienti, e si ricorre alla lama con inserti in metallo duro, generalmente al carburo di tungsteno. In questa soluzione gli inserti in carburo vengono applicati sui denti già formati nel nastro portante in acciaio, quindi, vengono rettificati con precisione per definire la geometria finale del tagliente.

La durezza elevatissima del carburo di tungsteno consente di mantenere un filo tagliente efficace anche a temperature di esercizio elevate e su materiali che produrrebbero un'usura rapida in qualsiasi altra soluzione. Ovviamente il costo di questa tipologia di lama è il più elevato ma ha anche le migliori performance possibili rispetto alle altre.

Indipendentemente dalla tecnologia costruttiva adottata, la geometria di una lama per sega a nastro è descritta da un insieme di parametri che ne caratterizzano le prestazioni e ne condizionano la scelta in funzione del materiale e della sezione da tagliare.

Il dorso è la porzione di nastro priva di denti, compresa tra la base delle gole e il bordo posteriore della lama.

La larghezza della lama è la distanza misurata dalla punta del dente al bordo del dorso e costituisce uno dei parametri dimensionali della macchina: a lame più larghe corrisponde generalmente una maggiore rigidità e la capacità di tagliare sezioni più grandi. La spessore è invece la dimensione dello spessore del nastro, misurata perpendicolarmente al piano della lama.

Il passo dente, è la distanza tra le punte di due denti consecutivi. Strettamente correlato al passo è il parametro TPI, acronimo di Teeth Per Inch, che esprime il numero di denti per pollice lineare misurato da gola a gola: un valore elevato di TPI corrisponde a denti fitti e a un passo ridotto, mentre un valore basso indica una dentatura più rarefatta. La scelta del passo è determinata principalmente dalla dimensione della sezione da tagliare: sezioni piccole richiedono dentature fitte per mantenere sempre più denti contemporaneamente in presa, mentre sezioni grandi impongono passi più grossolani per consentire l'espulsione dei trucioli senza intasare le gole.

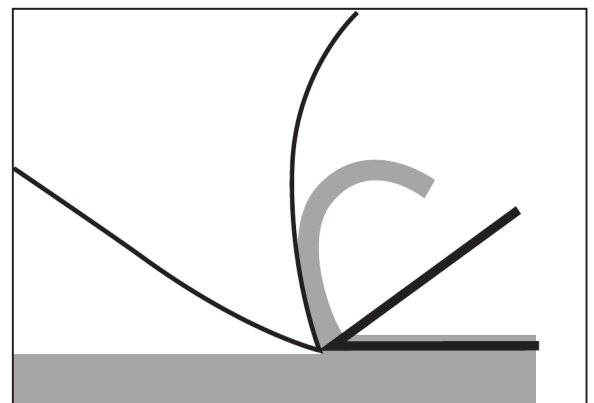
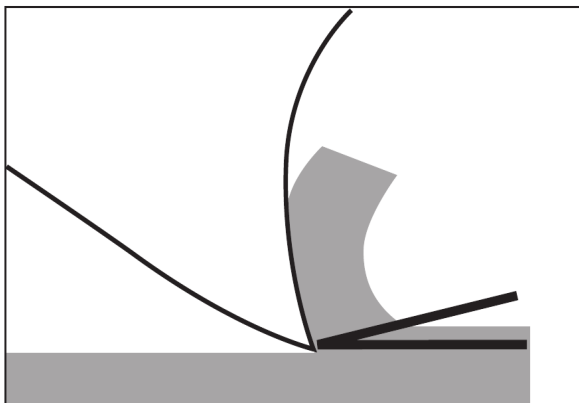
La gola è la cavità curvilinea ricavata tra un dente e il successivo. Oltre a separare fisicamente i denti adiacenti, la gola svolge la funzione di raccogliere e contenere il materiale asportato durante il taglio, fino al momento in cui questo viene espulso fuori dalla zona di lavoro.

La calettatura consiste nella piegatura alternata dei denti verso destra e verso sinistra rispetto al piano della lama. Questa deviazione intenzionale del profilo dentato ha lo scopo di produrre un intaglio di larghezza superiore allo spessore del nastro, creando così il gioco laterale necessario affinché il dorso della lama scorra liberamente all'interno del taglio senza attrito.

Meccanica del taglio e formazione del truciolo

Il processo di taglio in una sega a nastro è riconducibile, nella sua essenza, a un fenomeno di deformazione plastica localizzata: il dente della lama penetra nel materiale e ne provoca la separazione lungo una superficie definita come zona di taglio primaria. In questa zona il materiale viene sottoposto a sforzi di taglio che superano il limite di snervamento del metallo, innescando una deformazione plastica intensa e altamente localizzata. Il piano ideale lungo il quale avviene questa deformazione è convenzionalmente denominato piano di scorrimento, e l'angolo che esso forma con la direzione di avanzamento della lama, il cosiddetto angolo di piano di scorrimento, è un parametro di importanza centrale per la comprensione dell'efficienza del processo.

L'angolo di piano di scorrimento governa direttamente la geometria e lo spessore del truciolo prodotto. Quando questo angolo è elevato, il piano di separazione è più inclinato rispetto alla direzione di moto, e il materiale si distacca formando trucioli sottili e ben arricciati, con un dispendio energetico relativamente contenuto. Al contrario, quando l'angolo di piano di scorrimento è ridotto, il materiale deve essere deformato su una distanza maggiore prima di separarsi, producendo trucioli spessi, compatti e difficili da evacuare, con un conseguente aumento delle forze di taglio e della temperatura sviluppata nell'interfaccia dente-materiale.

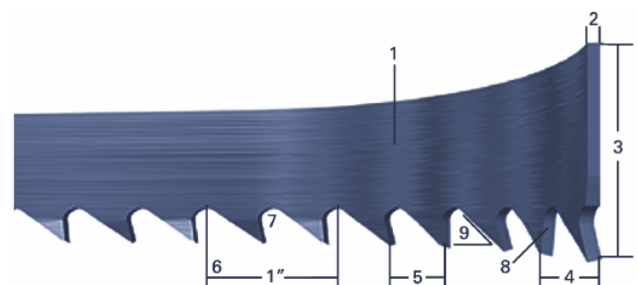


La morfologia del truciolo prodotto varia in funzione del materiale lavorato e delle condizioni operative. I metalli duttili, quali gli acciai a basso tenore di carbonio, tendono a produrre un truciolo continuo, generato da una deformazione plastica progressiva e uniforme lungo il piano di scorrimento. In presenza di velocità di taglio moderate e di lubrificazione adeguata, il truciolo continuo si avvolge su sé stesso in modo regolare, facilita l'evacuazione e costituisce l'indicatore di un processo in condizioni ottimali. Nei materiali fragili, quali la ghisa, il meccanismo è invece completamente diverso: la deformazione plastica è minima e il materiale si frammenta bruscamente in corrispondenza del dente, producendo trucioli discontinui e polverulenti.

La gola svolge un ruolo fondamentale nella formazione del truciolo, infatti essa costituisce la camera di raccolta transitoria del truciolo nel tempo che intercorre tra l'asportazione del materiale e l'espulsione dalla zona di taglio. La capacità della gola, determinata dalla sua profondità, dal suo raggio di curvatura e dal passo dente, deve essere commisurata alla quantità di materiale rimossa per dente a ogni passata, parametro che cresce proporzionalmente all'avanzamento e alla larghezza di taglio. Quando la velocità di avanzamento è eccessiva rispetto alla capacità della gola, il truciolo non riesce ad arricciolarsi regolarmente nello spazio disponibile, si comprime, si intasa e genera una resistenza crescente sul dente, con effetti immediati sul consumo energetico e sulla vita della lama. In questa condizione si ha il superamento del limite fisico della gola, oltre il quale il truciolo perde la sua forma a spirale regolare, si distorce e rischia di bloccare la lama nella sede di taglio. La scelta del passo dente, e quindi della gola associata, è perciò un compromesso progettuale che tiene insieme la natura del materiale, la dimensione della sezione da tagliare e la velocità di avanzamento e di taglio da mantenere.

- 1. Blade Back:** The body of the blade not including tooth portion.
- 2. Thickness:** The dimension from side to side on the blade.
- 3. Width:** The nominal dimension of a saw blade as measured from the tip of the tooth to the back of the band.
- 4. Set:** The bending of teeth to right or left to allow clearance of the back of the blade through the cut.
- Kerf:** Amount of material removed by the cut of the blade.
- 5. Tooth Pitch:** The distance from the tip of one tooth to the tip of the next tooth.
- 6. TPI:** The number of teeth per inch as measured from gullet to gullet.

- 7. Gullet:** The curved area at the base of the tooth. The tooth tip to the bottom of the gullet is the gullet depth.
- 8. Tooth Face:** The surface of the tooth on which the chip is formed.
- 9. Tooth Rake Angle:** The angle of the tooth face measured with respect to a line perpendicular to the cutting direction of the saw.

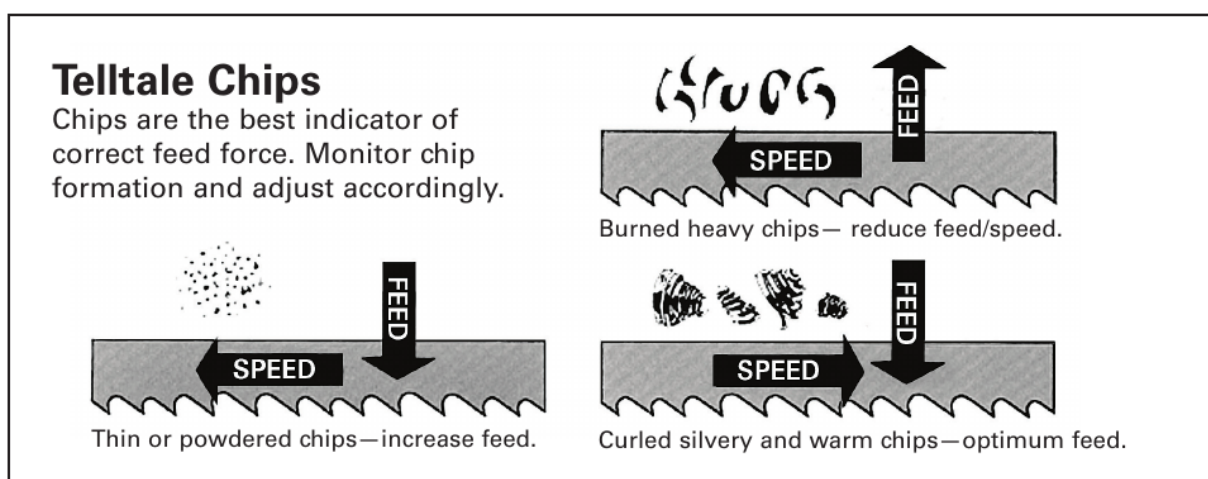


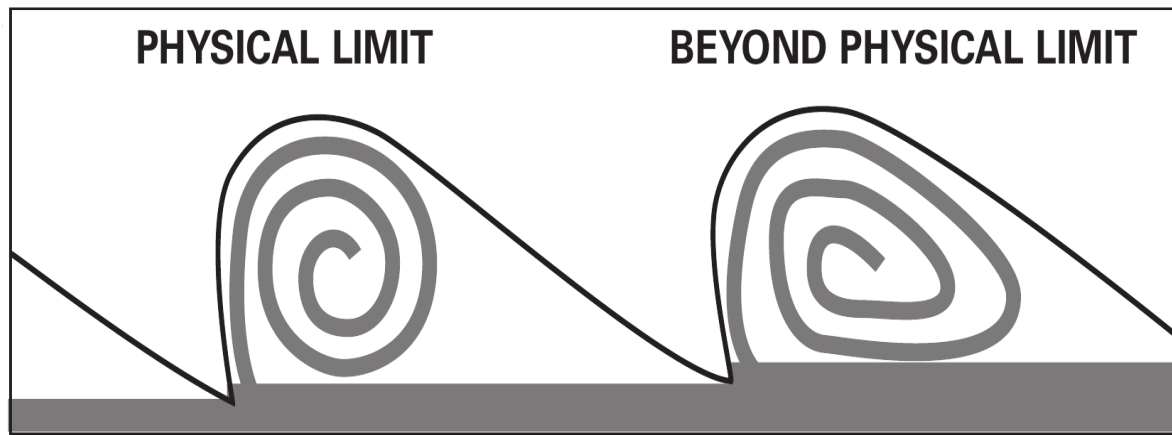
Principali velocità nell'asportazione del truciolo

Nell'ambito del taglio con sega a nastro, le grandezze cinematiche che governano il processo si riducono essenzialmente a due parametri fondamentali: la velocità di taglio e la velocità di avanzamento. Queste due variabili agiscono in modo coordinato e la loro corretta combinazione determina in larga misura la qualità del taglio, la vita della lama e il consumo energetico della macchina.

La velocità di taglio, espressa convenzionalmente in metri al minuto o in piedi al minuto, indica la velocità con cui il nastro si muove attraverso il materiale ed è direttamente proporzionale alla frequenza con cui ciascun dente entra in contatto con il pezzo. Velocità di taglio elevate aumentano la produttività ma introducono un maggiore sviluppo di calore nell'interfaccia tra il dente e il materiale: superata una soglia dipendente dalla natura del materiale lavorato e dalla tipologia della lama, l'incremento termico accelera l'usura del tagliente in misura tale da annullare il vantaggio in termini di tempo ciclo. Il colore e la morfologia del truciolo prodotto costituiscono, in pratica, il principale indicatore dello stato termico del processo: trucioli argentei e leggermente caldi segnalano condizioni ottimali, mentre trucioli bruniti o azzurrati indicano temperature eccessive e la necessità di ridurre la velocità di taglio.

La velocità di avanzamento, espressa solitamente in millimetri al minuto, indica invece la rapidità con cui la lama discende sul materiale, ovvero la quantità di materiale rimosso per unità di tempo. Essa determina direttamente la profondità di penetrazione di ciascun dente e, di conseguenza, lo spessore del truciolo generato. Un avanzamento insufficiente produce trucioli sottili, indice di una condizione in cui i denti strisciano sul materiale senza penetrarlo efficacemente, innescando un'usura abrasiva accelerata per attrito. Un avanzamento eccessivo genera invece trucioli troppo voluminosi rispetto alla capacità della gola, con i rischi di intasamento già discussi nel capitolo precedente. La velocità di avanzamento ottimale è quindi quella che consente una penetrazione sufficiente a formare un truciolo ben conformato, massimizzando la quantità di materiale asportato per ciclo nel rispetto dei limiti imposti dalla geometria della lama e dalle caratteristiche del materiale.





Usura dell'utensile e generazione di calore

Il processo di taglio è intrinsecamente un processo di conversione energetica: quasi tutta l'energia meccanica assorbita nella formazione del truciolo si trasforma in calore, generato in un volume estremamente ridotto attorno alla zona di contatto tra il dente e il materiale. A questa sorgente primaria si sommano gli effetti termici prodotti dall'attrito all'interfaccia tra il truciolo e la faccia anteriore del dente, determinando un aumento di temperatura localizzato che incide direttamente sulla resistenza meccanica dell'utensile, sulla sua resistenza all'usura e, in misura minore, sull'accuratezza dimensionale della lavorazione per effetto delle deformazioni termiche indotte sul pezzo.

Il calore generato non si distribuisce in modo uniforme tra i tre corpi coinvolti nel processo, cioè l'utensile, il pezzo e il truciolo, ma si ripartisce secondo proporzioni che dipendono fortemente dalla velocità di taglio. A velocità contenute, una frazione significativa del calore si disperde verso il pezzo e verso l'utensile; all'aumentare della velocità di taglio, il tempo di contatto tra il materiale e il dente si riduce progressivamente, e la maggior parte del calore rimane confinata nel truciolo, che viene espulso dalla zona di lavoro trasportando con sé l'energia termica accumulata.

I meccanismi attraverso cui il calore e le sollecitazioni meccaniche degradano progressivamente il materiale del tagliente sono molteplici e agiscono spesso in modo simultaneo. L'usura per abrasione è causata dallo scorrimento sulla superficie del dente di particelle dure presenti nel materiale in lavorazione che asportano materiale dell'utensile per azione meccanica diretta; essa si manifesta principalmente sul fianco del dente e sul tagliente, ed è tanto più intensa quanto maggiore è la durezza relativa delle particelle abrasive rispetto al materiale dell'utensile. L'usura per adesione origina invece dalle elevate pressioni di contatto e temperature all'interfaccia truciolo-faccia anteriore del dente, che favoriscono la formazione di microsaldature localizzate tra i due materiali; quando il truciolo scorre sulla superficie del dente, questi microgiunti vengono strappati, asportando frammenti del materiale del tagliente che vengono trascinati via con il truciolo e contribuiscono, a loro volta, ad accelerare l'usura abrasiva.

L'usura per diffusione è di natura chimica e dipende essenzialmente dalla temperatura: ad elevate temperature, alcuni componenti del materiale dell'utensile migrano attraverso l'interfaccia di contatto verso il truciolo, mentre elementi del materiale lavorato si spostano in direzione opposta, alterando la composizione superficiale del tagliente. L'usura per ossidazione si sovrappone ai meccanismi precedenti nelle zone periferiche della zona di contatto.

Accanto ai meccanismi di usura progressiva, nei processi caratterizzati da variazioni cicliche delle sollecitazioni meccaniche e termiche si manifesta l'usura per fatica termo-meccanica: le alternanze di riscaldamento e raffreddamento, o le variazioni di forza di taglio

associate ai cicli di lavoro, inducono sollecitazioni cicliche che portano alla propagazione di cricche.

Ottimizzazione sui profili di taglio

Approccio attuale alle geometrie di taglio

Nel processo di taglio con sega a nastro, la sezione di materiale che la lama incontra nel proprio percorso non è sempre costante nel tempo, ma può variare in modo continuo dall'istante in cui il dente entra nel materiale fino a quando ne fuoriesce. Questa variazione dipende interamente dalla geometria del profilo da tagliare e costituisce uno degli aspetti più rilevanti da considerare nella definizione dei parametri operativi. L'approccio attualmente adottato nella pratica industriale, affronta questa complessità geometrica attraverso la determinazione di un valore costante di lunghezza di taglio effettiva, calcolato a partire dalle dimensioni del profilo, sulla cui base vengono poi derivati velocità di taglio e velocità di avanzamento mantenute fisse per l'intera durata del ciclo.

Il procedimento prevede, a partire dalla geometria del pezzo e dal suo materiale, il calcolo di una grandezza denominata lunghezza di taglio effettiva, L_c , che rappresenta sinteticamente l'estensione del contatto tra la lama e il materiale in una condizione geometrica di riferimento. Nel caso di un cubo, questa lunghezza coincide semplicemente con il lato del pezzo, mentre nel caso di un cilindro pieno si usa $2/3$ del suo diametro. Nel caso del cilindro si tratta tuttavia di una semplificazione significativa, poiché in realtà la corda di materiale attraversata dalla lama non è mai costante durante il taglio. All'ingresso, il dente incontra una sezione ridottissima; man mano che l'arco scende, la corda aumenta progressivamente fino a raggiungere il suo valore massimo in corrispondenza del diametro, per poi ridursi nuovamente nella fase finale del taglio. L'utilizzo di una frazione del diametro come corda equivale dunque ad assumere come riferimento una media ignorando le fasi di ingresso e uscita in cui la sezione reale è sensibilmente inferiore.

Nel caso di un cilindro cavo, la geometria introduce una discontinuità ulteriore: la lama attraversa dapprima la parete superiore del tubo, poi percorre una cavità interna, e infine attraversa la parete inferiore. La lunghezza di taglio viene in questo caso approssimata alla sola porzione di materiale solido attraversata dalla lama nella sezione più larga del tubo prima di arrivare alla cavità, ovvero nel punto di massimo impegno. Analogamente al caso del cilindro pieno, la variazione continua della corda effettiva durante l'effettivo percorso della lama viene ignorata, e i parametri operativi vengono determinati su base costante a partire dal massimo valore della sezione.

L'utilizzo della massima sezione come quella di riferimento garantisce che le condizioni operative non superino mai i limiti imposti dalla geometria più sfavorevole del ciclo, ma implica al contempo che nelle fasi in cui la sezione effettiva è inferiore a quella di riferimento, come le fasi di ingresso e di uscita per il cilindro pieno, e le zone di transizione parete-cavità per il tubo, la macchina operi con parametri più conservativi del necessario, con conseguenze sulla durata del ciclo e sul consumo energetico complessivo.

Variabili che influenzano la velocità

La determinazione della velocità di taglio è il risultato di insieme di parametri legati al materiale da lavorare e alla configurazione della macchina. Tra questi, il primo è sicuramente la lavorabilità del materiale, espressa attraverso il coefficiente di lavorabilità MR (Machinability Rating). I valori di MR variano significativamente tra le diverse famiglie di materiali, per esempio l'alluminio presenta un coefficiente pari a 1,12, mentre gli acciai per utensili a lavorazione a freddo 0,16.

Poiché i valori di MR sono tabulati in riferimento a materiale non temprato, è necessario introdurre una correzione quando il materiale da lavorare presenta una durezza differente. A questo scopo viene applicato il fattore di correzione per la durezza H_f , anch'esso definito in funzione della durezza Brinell del materiale. Per materiali teneri, con durezza compresa tra 80 e 225 Bhn, il fattore vale 1,0 e non altera il calcolo; per materiali di durezza media, tra 226 e 275 Bhn, il fattore scende a 0,75, riducendo proporzionalmente la velocità di taglio calcolata; per materiali duri, con durezza tra 276 e 330 Bhn, il fattore si abbassa ulteriormente a 0,60. L'effetto pratico di questa correzione è che a parità di materiale, la presenza di un trattamento termico di indurimento impone una riduzione della velocità di taglio.

Alla velocità minima di taglio calcolata a partire da MR e H_f si applicano poi due ulteriori fattori correttivi che tengono conto della configurazione specifica della macchina. Il primo è il fattore di correzione per il tipo di lama B_t : il calcolo base è riferito a una lama bimetallica, per la quale $B_t = 1,0$. Le lame rivestite, grazie alla maggiore resistenza termica del rivestimento, consentono velocità di taglio superiori e si associano a $B_t = 1,15$; le lame con inserti in carburo, che tollerano temperature di esercizio ancora più elevate, portano il fattore a $B_t = 1,20$. Questo fattore moltiplicativo riflette direttamente la gerarchia tra le tecnologie costruttive discussa nel capitolo dedicato ai differenti design della lama.

Il secondo fattore correttivo riguarda il fluido da taglio adottato, ed è indicato con C_f . La lubrificazione svolge un ruolo centrale nel contenimento della temperatura all'interfaccia dente-materiale e nell'evacuazione del truciolo; la sua assenza o riduzione si traduce inevitabilmente in una limitazione della velocità ammissibile. Il taglio con lubro-refrigerante a piena portata costituisce la condizione di riferimento, con $C_f = 1,0$. Il ricorso alla lubrificazione "a nebbia", cioè attraverso una miscela aria-olio nebulizzata ed erogata direttamente sulla zona di taglio, sempre più diffuso per ragioni di sostenibilità ambientale e riduzione dei costi, comporta una riduzione del fattore a 0,78, imponendo una corrispondente diminuzione della velocità di taglio. Il taglio a secco, privo di qualsiasi forma di lubrificazione, richiede infine il fattore più penalizzante, $C_f = 0,50$.

Introduzione di una velocità di taglio variabile

L'approccio descritto nel capitolo precedente, si traduce in numerosi problemi che si possono presentare legati a un velocità eccessivamente alta o bassa, che nel primo caso porta all'aumento della velocità con cui l'utensile si usura, mentre nel secondo non si sfrutta a pieno la lama e si impiega più tempo per il taglio, aumentando così il dispendio energetico del macchinario.

L'introduzione di una velocità di avanzamento variabile, modulata in funzione della sezione reale incontrata dalla lama istante per istante, permette di sfruttare appieno le fasi in cui pezzo oppone una resistenza ridotta, incrementando la velocità di avanzamento dove la corda è contenuta, e riducendola nelle zone in cui la sezione di taglio aumenta. Una logica di controllo adattivo, quindi, consente di percorrere il profilo alla massima velocità compatibile con la geometria effettiva in ciascun istante, ottenendo una riduzione del tempo di taglio senza imporre alla lama sollecitazioni superiori a quelle massime.

Ovviamente questo approccio richiede che il macchinario sia dotato di tutta la strumentazione a bordo per misurare i parametri necessari e che il controllo elettronico degli organi che si occupano sia del movimento di avanzamento che della rotazione della lama siano predisposti a cambiare la loro velocità istante per istante.

Per tradurre in pratica la logica di controllo adattivo descritta, ho sviluppato un software in C++ con interfaccia grafica basata sul framework Qt. La struttura del codice è organizzata attorno a una gerarchia di classi che rispecchia direttamente la distinzione concettuale tra l'approccio standard a parametri costanti e quello adattivo a parametri variabili.

Al vertice della gerarchia è definita una classe astratta, denominata Cutting, che raccoglie tutte le proprietà comuni alle due strategie di taglio, i parametri del materiale, le caratteristiche della lama, i fattori di correzione, e dichiara come metodi virtuali puri le funzioni di calcolo della velocità di avanzamento per le due geometrie considerate. La classe astratta non implementa alcuna logica di calcolo propria, essa definisce esclusivamente le funzioni che le classi derivate sono tenute a implementare, garantendo che entrambe espongano la medesima interfaccia verso il livello superiore dell'applicazione.

Da questa classe padre derivano due implementazioni concrete, OldCutting e NewCutting, ciascuna delle quali fornisce la propria versione dei metodi di calcolo. La prima implementa l'approccio convenzionale, in cui la lunghezza di taglio effettiva viene calcolata una sola volta a partire dalla geometria nominale del pezzo e i parametri operativi rimangono costanti per l'intera durata del ciclo. La seconda implementa l'approccio adattivo: i metodi ricevono come argomento la posizione istantanea della lama lungo l'asse di discesa e calcolano in tempo reale la corda di materiale effettivamente impegnata dalla lama in quell'istante, aggiornando di conseguenza la velocità di avanzamento. La posizione della lama costituisce quindi la variabile di ingresso del controllo, e l'intera logica adattiva risiede nel modo in cui

ciascuna implementazione la utilizza per una specifica geometria per determinare la corretta velocità da utilizzare.

Questa architettura consente di confrontare le due strategie in modo diretto e coerente, poiché entrambe operano sugli stessi parametri di base e differiscono esclusivamente nel criterio con cui la lunghezza di taglio effettiva viene determinata ad ogni istante del ciclo.

Risultati e conclusioni

Elenco dei parametri usati

Per questa simulazione sono stati utilizzati i parametri relativi specificatamente all'acciaio a medio tenore di carbonio. Con W si intenderà il diametro del pezzo mentre con f la quantità di materiale asportata da ciascun dente ad ogni passata.

- $MR = 0.60$
- $Hf = 1.0$
- $Bt = 1.0$
- $Cf = 0.78$
- $W = 50\text{mm}$
- 0.00762 mm

Questi parametri sono comuni nelle due geometrie affrontate in questa tesi: un pezzo cilindrico pieno e uno cavo. Nel secondo caso t sta ad indicare lo spessore delle pareti del tubo. I parametri specifici per le due geometrie sono i seguenti.

Caso A – Cilindro pieno:

- $TPIa = 3.5$
- $Bsc = 1.05$

Caso B – Cilindro cavo:

- $t = 10\text{ mm}$
- $TPIa = 6.4$
- $Bsc = 1.25$

Descrizione dell'approccio geometrico adottato

Il parametro geometrico centrale attorno al quale ruota l'intera logica adattiva è la lunghezza di taglio effettiva L_c , calcolata in funzione della posizione istantanea Y della lama lungo l'asse di discesa. Y varia con continuità da 0, istante in cui il dente tocca per la prima volta la sommità del pezzo, fino a W , valore corrispondente alla completa attraversata del profilo. In ciascun istante intermedio, L_c rappresenta la lunghezza della corda che la lama incontra alla quota Y , ovvero la quantità di materiale che i denti devono effettivamente attraversare in quella posizione.

Nel caso del cilindro pieno il profilo circolare ha centro a quota $W/2$ rispetto all'ingresso della lama e raggio $R=W/2$. In una generica posizione Y , la distanza tra la quota corrente e il centro del cerchio vale $|Y-W/2|$. Per il teorema di Pitagora, la lunghezza della corda alla quota Y è la radice quadrata della differenza tra il quadrato del raggio e il quadrato di tale distanza. La lunghezza di taglio effettiva è quindi la corda completa:

$$L_c = 2 * \sqrt{((W/2)^2 - (Y - W/2)^2)}$$

Quando Y coincide con il centro del cerchio il valore sotto radice si massimizza e L_c raggiunge il diametro W ; all'ingresso e all'uscita del profilo, dove $Y=0$ e $Y=W$, la corda tenderebbe a zero e il calcolo viene gestito come caso limite separato nel codice.

Nel caso del cilindro cavo la geometria introduce una discontinuità che richiede la distinzione di due zone operative distinte. Il tubo è definito dal diametro esterno W e dallo spessore di parete t , da cui si ricava il raggio interno $r = W/2 - t$. Nella fase iniziale del taglio, quando la lama attraversa la parete superiore del tubo, la quota corrente è ancora sufficientemente lontana dal centro da non intercettare la cavità interna. In questo caso $|Y - W/2| > r$ perciò la corda di materiale incontrata dalla lama coincide con la sola corda del cerchio esterno, e la formula è identica a quella del cilindro pieno. Quando invece la posizione Y entra nella fascia centrale in cui la lama intercetta contemporaneamente entrambe le pareti del tubo, cioè quando $|Y - W/2| \leq r$, la corda di materiale effettivo è esterno e la corda del cerchio interno alla medesima quota:

$$L_c = 2 * (\sqrt{((W/2)^2 - (Y - W/2)^2)} - \sqrt{(r^2 - (Y - W/2)^2)})$$

Risultati ottenuti e confronto con lo standard di riferimento

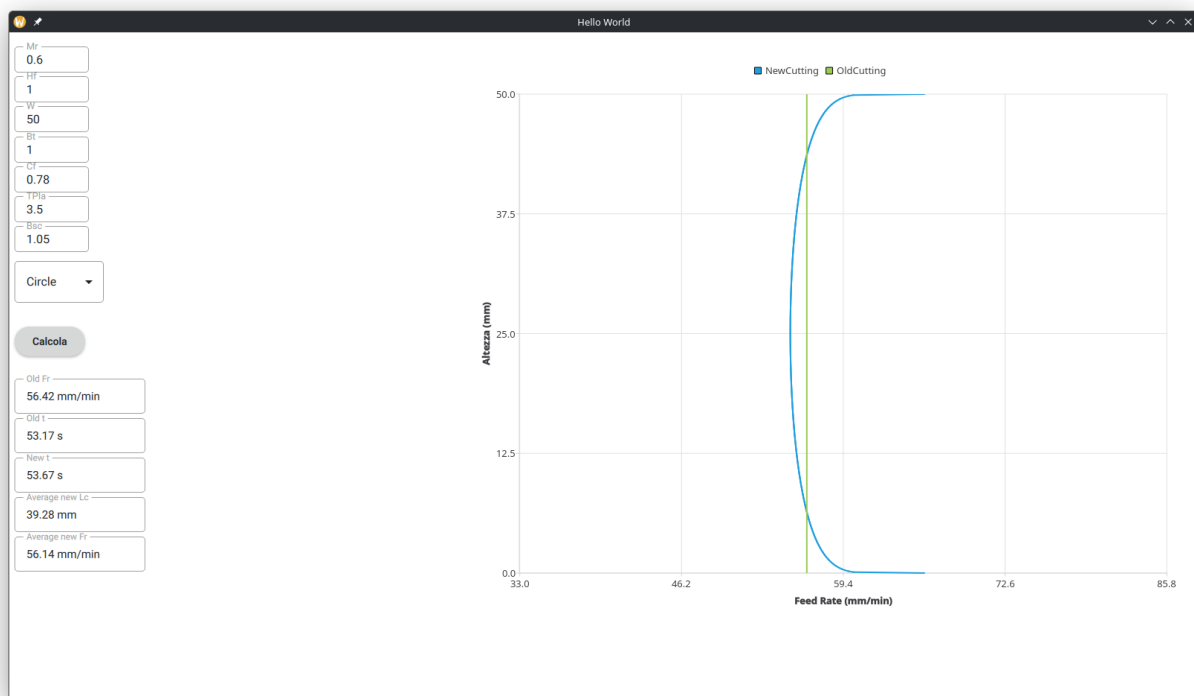
I risultati ottenuti dall'applicazione dell'approccio adattivo nei due casi geometrici considerati presentano caratteristiche molto diverse tra loro, in ragione della differente natura dei profili di sezione che li contraddistinguono. Nel cilindro pieno la variazione della corda è continua e progressiva, mentre nel cilindro cavo la presenza della cavità interna introduce una discontinuità marcata nello spessore del taglio che si riflette in modo altrettanto netto sull'andamento della velocità di avanzamento calcolata. Nonostante queste differenze, i benefici introdotti dal controllo adattivo rispetto all'approccio a parametri costanti risultano significativi in entrambi i casi, seppure per ragioni molto distinte.

Caso A: cilindro pieno

Nel caso del cilindro pieno, l'andamento della velocità di avanzamento calcolata dall'approccio adattivo in funzione della posizione Y segue un profilo a parabola: la velocità è massima nelle fasi di ingresso e di uscita dal profilo, dove la corda di materiale è ridotta, e raggiunge il suo valore minimo in corrispondenza del diametro, dove la sezione di taglio è massima.

Il confronto con l'approccio standard rivela un andamento articolato. Nelle fasi iniziale e finale del taglio, dove la sezione reale è inferiore a quella di riferimento adottata dal metodo convenzionale, la velocità di avanzamento adattiva supera quella fissa dello standard, infatti la lama viene fatta avanzare più rapidamente di quanto il metodo a parametri costanti consentirebbe, sfruttando il minore impegno geometrico effettivo. Nella zona centrale, in prossimità del diametro massimo, la situazione si inverte e la velocità adattiva risulta leggermente inferiore a quella convenzionale, poiché la sezione reale supera il valore di riferimento $2/3 \cdot W$ adottato dal metodo standard.

Il risultato complessivo in termini di tempo ciclo non presenta un vantaggio significativo rispetto all'approccio convenzionale, poiché i guadagni nelle fasi periferiche e le perdite nella fase centrale tendono a compensarsi. Il beneficio principale atteso dall'approccio adattivo è invece di natura diversa: operando in ogni istante alla velocità corretta per la sezione reale incontrata, la lama non viene mai sovraccaricata nella fase centrale né sottoutilizzata nelle fasi periferiche, condizioni entrambe dannose per la vita dell'utensile per ragioni opposte. Ci si attende pertanto un miglioramento della durata della lama rispetto all'approccio convenzionale, pur in assenza di un guadagno diretto sui tempi di produzione.

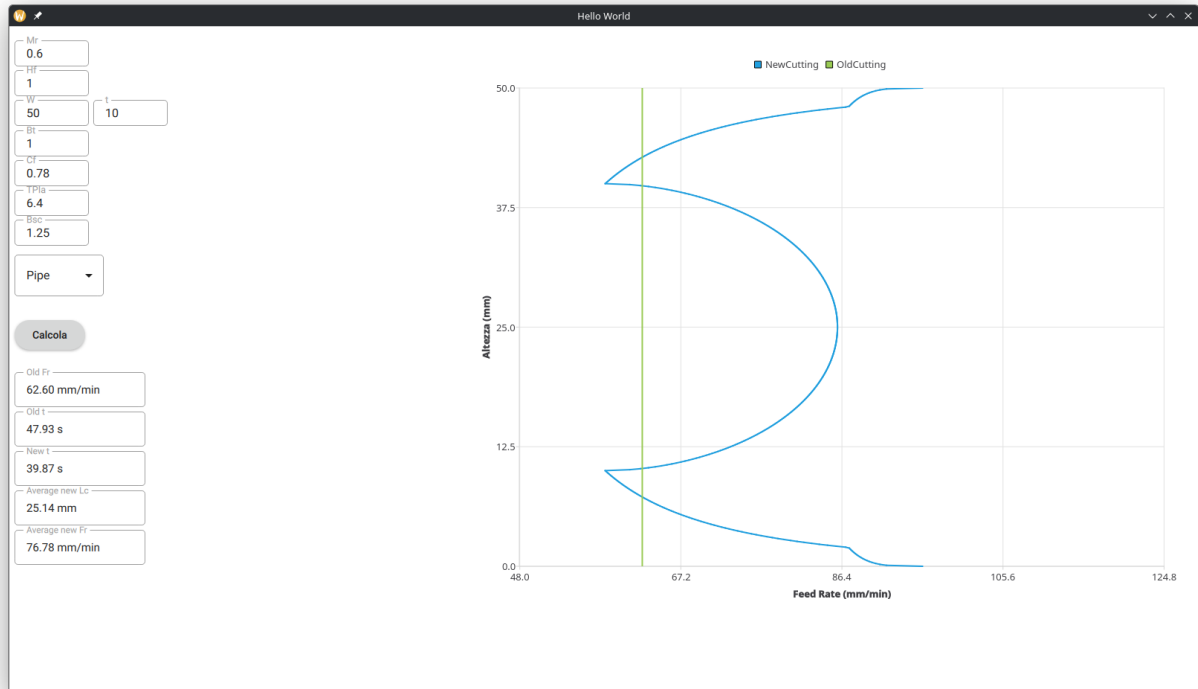


Caso B: cilindro cavo

Nel caso del cilindro cavo, l'andamento della velocità di avanzamento calcolata dall'approccio adattivo riflette la discontinuità geometrica propria del profilo tubolare. Nelle fasi in cui la lama attraversa esclusivamente la parete piena del tubo, la velocità segue un andamento analogo a quello di un profilo circolare; tuttavia, non appena la posizione Y entra nella fascia in cui la corda di materiale è ridotta dalla presenza della cavità interna, la velocità di avanzamento aumenta sensibilmente, poiché la sezione reale da attraversare si riduce drasticamente rispetto a quanto previsto dal metodo tradizionale.

Questo effetto si traduce in una riduzione significativa del tempo complessivo di taglio. Per una porzione consistente della distanza percorsa dall'arco, la lama si trova infatti a lavorare nel vuoto della cavità interna o in prossimità di essa, condizione in cui l'approccio adattivo consente di sfruttare avanzamenti molto più elevati rispetto a quelli imposti da un parametro fisso calcolato sulla sola sezione massima del tubo.

La riduzione del tempo ciclo ha una ricaduta diretta sul piano energetico. Infatti una quota rilevante dell'assorbimento complessivo è costituita dal carico base, indipendente dall'intensità della lavorazione ma proporzionale alla durata del ciclo. Accorciando il tempo necessario a completare il taglio, l'approccio adattivo applicato al cilindro cavo consente quindi di auspicare una riduzione apprezzabile del consumo energetico complessivo associato a questa tipologia di profilo.



Conclusione generale

Conclusioni generali

L'analisi condotta sui due casi geometrici mostra come l'introduzione di un controllo adattivo della velocità di avanzamento produca benefici di natura diversa a seconda della geometria considerata. Nel cilindro pieno il vantaggio non si manifesta in una riduzione del tempo di taglio, sostanzialmente invariato rispetto all'approccio convenzionale, bensì nella possibilità di operare alla velocità corretta per la sezione reale incontrata, con una conseguente attesa di prolungamento della vita della lama. Nel cilindro cavo, al contrario, è proprio la riduzione del tempo ciclo a costituire il beneficio principale, grazie alla presenza della cavità interna che consente avanzamenti significativamente più elevati per una porzione consistente del taglio, con una ricaduta diretta sul consumo energetico complessivo.

Questo confronto evidenzia un aspetto centrale dell'ottimizzazione di un processo di taglio cioè che non può essere ricondotta a un unico indicatore di prestazione. Se nel caso del tubo il beneficio più evidente è quantificabile in termini di tempo e di energia, nel caso del cilindro pieno il vantaggio risiede in una dimensione meno immediata da misurare ma altrettanto rilevante dal punto di vista industriale, ovvero la durata dell'utensile e, di conseguenza, la frequenza delle sostituzioni, i costi di manutenzione e la continuità della produzione. Un approccio realmente efficace alla velocità di taglio deve quindi tenere conto simultaneamente di più obiettivi, spesso in tensione tra loro, e la geometria del pezzo si conferma come la variabile che, più di ogni altra, determina quale di questi obiettivi possa essere effettivamente perseguito in un determinato processo di lavorazione.

Sviluppi Futuri

Natura teorica dei risultati

I risultati presentati nei capitoli precedenti derivano interamente da simulazioni numeriche basate sul modello geometrico e sulle equazioni di calcolo implementate nel software sviluppato, e non da prove sperimentali condotte su una sega a nastro reale. Le velocità di taglio e di avanzamento calcolate, così come le proiezioni relative alla riduzione del tempo ciclo e ai benefici attesi sulla vita della lama, rappresentano dunque previsioni teoriche fondate sui parametri tabulati dalle fonti tecniche di riferimento, e non misurazioni dirette ottenute sul campo.

Questa distinzione non è di poco conto. Il modello sviluppato assume condizioni operative idealizzate che potrebbero discostarsi dalla realtà.

L'assenza di un riscontro sperimentale comporta che i miglioramenti stimati in termini di tempo di taglio, consumo energetico e durata della lama debbano essere interpretati come indicazioni di tendenza piuttosto che come valori garantiti. Solo l'implementazione del controllo adattivo su una macchina reale, con la possibilità di confrontare direttamente le prestazioni effettive con quelle previste dal modello, potrà confermare la validità quantitativa delle proiezioni qui presentate e individuare eventuali correzioni necessarie al modello stesso.

Future ottimizzazioni su altre geometrie

Il presente lavoro si è concentrato esclusivamente su due geometrie di sezione, il cilindro pieno e il cilindro cavo, scelte per la loro diffusione nelle applicazioni industriali. Esistono tuttavia numerose altre geometrie di profilo sottoposte a taglio con sega a nastro che non sono state oggetto della presente trattazione, ma che si prestano altrettanto bene, a un'estensione dell'approccio adattivo qui sviluppato.

Tra queste rientrano il tubo a sezione rettangolare cavo, la cui geometria introduce una discontinuità analoga a quella del cilindro cavo, e la trave a doppia T, il cui profilo alterna tratti a sezione costante a un tratto centrale di spessore ridotto, con variazioni della corda molto più brusche rispetto a quelle osservate nei casi qui trattati.

Ciascuna di queste geometrie presenta una propria funzione di corda effettiva, la cui formulazione analitica dovrebbe essere sviluppata seguendo lo stesso impianto metodologico adottato in questo lavoro. La trattazione dovrebbe svilupparsi con la determinazione della relazione tra la posizione dell'arco e la sezione di materiale effettivamente incontrata dalla lama in quell'istante, da cui derivare la velocità di avanzamento ottimale punto per punto. L'estensione del software sviluppato a queste geometrie aggiuntive, attraverso l'implementazione di nuovi metodi per le nuove figure, costituisce una naturale prosecuzione del presente lavoro e permetterebbe di valutare se i benefici osservati nei due casi qui trattati, si riproducano, si amplifichino o assumano caratteristiche diverse in presenza di geometrie a discontinuità più marcata.

Applicazioni nell'industria 5.0 e nell'automazione

L'adozione di un sistema di controllo adattivo della velocità di avanzamento si inserisce coerentemente nel paradigma dell'Industria 5.0. Uno degli effetti più immediati dell'introduzione di una velocità variabile calcolata automaticamente dal sistema è la riduzione dell'influenza dell'errore umano nella configurazione dei parametri di taglio. Nell'approccio convenzionale, la scelta della velocità di avanzamento e di taglio è affidata all'esperienza dell'operatore, che seleziona i parametri sulla base di tabelle di riferimento e di valutazioni sullo stato della lama e sulle caratteristiche del materiale. Questa dipendenza dalla competenza individuale introduce una variabilità intrinseca nel processo, che si può tradurre in cicli non ottimali e in una qualità del taglio che può variare al variare del livello di esperienza del personale addetto.

Un sistema adattivo che calcola e imposta autonomamente i parametri operativi in funzione della geometria del profilo e delle proprietà del materiale elimina questa fonte di variabilità, rendendo il processo riproducibile e indipendente dalla soggettività dell'operatore. La conoscenza tecnica necessaria a ottimizzare il taglio viene codificata nel sistema di controllo una volta sola e applicata sistematicamente ad ogni ciclo, con una coerenza che la supervisione manuale non può garantire a lungo termine.

Questo presupposto apre la strada a scenari di automazione più spinti. Un sistema di sega a nastro equipaggiato con un controllo adattivo della velocità può essere integrato in una linea di produzione automatizzata, nella quale il riconoscimento del profilo da tagliare, ottenibile attraverso per esempio sistemi di visione artificiale, avvia automaticamente il calcolo dei parametri e l'esecuzione del ciclo senza alcun intervento umano. In tale configurazione, la macchina non richiede più un operatore dedicato alla sua supervisione continua, ma può essere monitorata a distanza nell'ambito di un sistema di controllo centralizzato, in linea con i principi di interconnessione propri dell'Industria 5.0.

Uno degli sviluppi più interessanti che questo approccio rende possibile riguarda l'estensione del controllo adattivo a geometrie non standard o non note a priori. Nelle implementazioni descritte nei capitoli precedenti, il profilo di L_c in funzione di Y viene calcolato analiticamente sulla base di una geometria nota e regolare. Tuttavia, nella pratica industriale è possibile dover sezionare profili irregolari, materiali con cavità distribuite in modo non uniforme o pezzi recuperati da lavorazioni precedenti la cui geometria reale si discosta da quella nominale. In questi casi, l'integrazione di un sistema di visione artificiale basato su telecamere e modelli di ml di calcolo della profondità o con sensori di profondità, consentirebbe di ricostruire il profilo reale della sezione da tagliare prima che la lama entri in contatto con il materiale. A partire da questa ricostruzione, il sistema potrebbe derivare numericamente la sezione effettiva punto per punto, calcolando in tempo reale la velocità di avanzamento ottimale per ciascuna posizione della lama esattamente come avviene nei casi geometrici trattati, ma senza la necessità che il profilo sia descrivibile

da una formula analitica chiusa. Questo approccio trasferirebbe il controllo adattivo dall'ambito delle geometrie predefinite a quello della lavorazione completamente adattiva, rendendo il sistema applicabile a qualsiasi profilo e aprendo la strada a un livello di flessibilità produttiva mai visti fin'ora.

Appendice

```
1 #include <QApplication>
2 #include <QQmlApplicationEngine>
3 #include <QObject>
4 #include <cmath>
5 #include <iostream>
6
7 using namespace std;
8
10
11 class Cutting: public QObject {
12     Q_OBJECT
13
14     Q_PROPERTY(double Fr MEMBER Fr NOTIFY speedChanged FINAL)
15     Q_PROPERTY(double Vf MEMBER Vf NOTIFY speedChanged FINAL)
16     Q_PROPERTY(double W MEMBER W NOTIFY wChanged FINAL)
17     Q_PROPERTY(double t MEMBER t NOTIFY wChanged FINAL)
18     Q_PROPERTY(double Lc MEMBER Lc NOTIFY lcChanged FINAL)
19     Q_PROPERTY(double Mr MEMBER Mr NOTIFY mrChanged FINAL)
20     Q_PROPERTY(double Hf MEMBER Hf NOTIFY hfChanged FINAL)
21     Q_PROPERTY(double Bt MEMBER Bt NOTIFY btChanged FINAL)
22     Q_PROPERTY(double Cf MEMBER Cf NOTIFY cfChanged FINAL)
23     Q_PROPERTY(double Bsc MEMBER Bsc NOTIFY bscChanged FINAL)
24     Q_PROPERTY(double TPIa MEMBER TPIa NOTIFY tpiaChanged FINAL)
25
26 protected:
27     double Mr = 0.6;
28     double Hf = 1;
29     double Vi = 0;
30     double Vs = 0;
```

```

31  double Vf = 0;
32  double Cs = 0;
33  double W = 50;
34  double t = 10;
35  double Lc = 0;
36  double Vm = 0;
37  double Bt = 1;
38  double Cf = 0.78;
39  double TPIo = 0;
40  double TPIa = 6.4;
41  double Bsc = 1.25;
42  double f = 0.00762;
43  double Fr = 0;
44
45 public:
46  explicit Cutting(QObject *parent = nullptr) : QObject(parent) {
47  }
48
49  Q_INVOKABLE virtual void speed(double Y) = 0;
50  Q_INVOKABLE virtual void pipeSpeed(double Y) = 0;
51
52 signals:
53  void speedChanged();
54  void wChanged();
55  void mrChanged();
56  void hfChanged();
57  void btChanged();
58  void cfChanged();
59  void bscChanged();
60  void tpiaChanged();

```

```

61 void lcChanged();
62 };
63
64 class OldCutting : public Cutting {
65
66 public:
67 explicit OldCutting(QObject *parent = nullptr) : Cutting(parent) {}
68
69 void speed(double Y) override {
70     Vi = (1778 * Mr + 203.2) * Hf;
71     Vs = (481.076 * Mr + 229.616) * Hf;
72     Cs = 35.63167776 / (1 - (Vs / Vi));
73     Lc = W * 2 / 3;
74     Vm = Vi * (1 - sqrt(Lc) / Cs);
75     Vf = Vm * Bt * Cf;
76     double TPIa_mm = TPIa / 25.4;
77     TPIo = 1.388932633 / sqrt(Lc);
78     double Cp = TPIo / (TPIa_mm * Bsc);
79     if (Cp > 1.0) {
80         Cp = 1.0;
81     }
82     Fr = Vf * TPIa_mm * f * Cp;
83     emit speedChanged();
84     return;
85 }
86
87 void pipeSpeed(double Y) override {
88     Vi = (1818 * Mr) * Hf;
89     Vs = (957.061 * Mr) * Hf;
90     Cs = 35.63167776 / (1 - (Vs / Vi));

```

```

91     Lc = 2 * sqrt(pow((W / 2), 2) - pow((W / 2 - t), 2));
92     Vm = Vi * (1 - sqrt(Lc) / Cs);
93     Vf = Vm * Bt * Cf;
94     double TPIa_mm = TPIa / 25.4;
95     TPIo = 1.388932633 / sqrt(Lc);
96     double Cp = TPIo / (TPIa_mm * Bsc);
97     if (Cp > 1.0) {
98         Cp = 1.0;
99     }
100     Fr = Vf * TPIa_mm * f * Cp;
101     emit speedChanged();
102     return;
103 }
104 };
105
106 class NewCutting : public Cutting {
107
108 public:
109     explicit NewCutting(QObject *parent = nullptr) : Cutting(parent) {}
110
111     void speed(double Y) override {
112         if (Y == 0 || Y == W) {
113             Fr = 1.1;
114             emit speedChanged();
115             return;
116         }
117         Vi = (1778 * Mr + 203.2) * Hf;
118         Vs = (481.076 * Mr + 229.616) * Hf;
119         Cs = 35.63167776 / (1 - (Vs / Vi));
120         Lc = 2 * sqrt(pow(W / 2, 2) - pow(Y - W / 2, 2));

```

```

121     Vm = Vi * (1 - sqrt(Lc) / Cs);
122     Vf = Vm * Bt * Cf;
123     double TPIa_mm = TPIa / 25.4;
124     TPIo = 1.388932633 / sqrt(Lc);
125     double Cp = TPIo / (TPIa_mm * Bsc);
126     if (Cp > 1.0) {
127         Cp = 1.0;
128     }
129     Fr = Vf * TPIa_mm * f * Cp;
130     emit speedChanged();
131     return;
132 };
133
134 void pipeSpeed(double Y) override {
135     if (Y == 0 || Y == W) {
136         Fr = 1.6;
137         emit speedChanged();
138         return;
139     }
140     Vi = (1778 * Mr) * Hf;
141     Vs = (481.076 * Mr) * Hf;
142     Cs = 35.63167776 / (1 - (Vs / Vi));
143     double r = W / 2 - t;
144     if (abs(Y - W / 2) > r) {
145         Lc = 2 * sqrt(pow(W / 2, 2) - pow(Y - W / 2, 2));
146     }
147     else {
148         Lc = 2 * (sqrt(pow(W / 2, 2) - pow(Y - W / 2, 2)) - sqrt(pow(r, 2) - pow(Y - W / 2, 2)));
149     }
150     Vm = Vi * (1 - sqrt(Lc) / Cs);

```

```

151     Vf = Vm * Bt * Cf;
152     double TPIa_mm = TPIa / 25.4;
153     TPIo = 1.388932633 / sqrt(Lc);
154     double Cp = TPIo / (TPIa_mm * Bsc);
155     if (Cp > 1.0) {
156         Cp = 1.0;
157     }
158     Fr = Vf * TPIa_mm * f * Cp;
159     emit speedChanged();
160     return;
161 }
162 };
163
164 int main(int argc, char *argv[])
165 {
166     QApplication app(argc, argv);
167
168     qmlRegisterType<OldCutting>("com.company.cutting", 1, 0, "OldCutting");
169     qmlRegisterType<NewCutting>("com.company.cutting", 1, 0, "NewCutting");
170
171     QQmlApplicationEngine engine;
172     QObject::connect(
173         &engine,
174         &QQmlApplicationEngine::objectCreationFailed,
175         &app,
176         []() { QCoreApplication::exit(-1); },
177         Qt::QueuedConnection);
178     engine.loadFromModule("Taglio", "Main");
179
180     return QCoreApplication::exec();

```

```
181 }
```

```
182
```

```
183 #include "main.moc"
```

```
1 import QtQuick
2 import QtCharts
3 import QtQuick.Controls.Material
4 import com.company.cutting 1.0
5 import QtQuick.Controls 2.15
6 import QtQuick.Layouts 2.15
7
8 Window {
9     width: 1600
10    height: 900
11    visible: true
12    title: qsTr("Hello World")
13
14    OldCutting {
15        id: oldCutting
16    }
17
18    NewCutting {
19        id: newCutting
20    }
21
22    TextField {
23        id: textField
24        x: 7
25        y: 19
26        width: 100
27        height: 35
28        text: oldCutting.Mr
29        placeholderText: qsTr("Mr")
30        validator: DoubleValidator {
```

```

31     locale: "en_US"
32     notation: DoubleValidator.StandardNotation
33 }
34 onTextEdited: {
35     oldCutting.Mr = text
36     newCutting.Mr = text
37 }
38 }
39
40 TextField {
41     id: textField1
42     x: 7
43     y: 59
44     width: 100
45     height: 35
46     text: oldCutting.Hf
47     placeholderText: qsTr("Hf")
48     validator: DoubleValidator {
49         locale: "en_US"
50         notation: DoubleValidator.StandardNotation
51     }
52     onTextEdited: {
53         oldCutting.Hf = text
54         newCutting.Hf = text
55     }
56 }
57
58 TextField {
59     id: w
60     x: 7

```

```

61     y: 99
62     width: 100
63     height: 35
64     text: oldCutting.W
65     placeholderText: qsTr("W")
66     validator: DoubleValidator {
67         locale: "en_US"
68         notation: DoubleValidator.StandardNotation
69     }
70     onTextEdited: {
71         oldCutting.W = text
72         newCutting.W = text
73     }
74 }
75
76 TextField {
77     id: t
78     x: 113
79     y: 99
80     width: 100
81     height: 35
82     text: oldCutting.t
83     placeholderText: qsTr("t")
84     validator: DoubleValidator {
85         locale: "en_US"
86         notation: DoubleValidator.StandardNotation
87     }
88     onTextEdited: {
89         oldCutting.t = text
90         newCutting.t = text

```

```

91     }
92     visible: shapeSelection.currentText === "Pipe"
93 }
94
95 TextField {
96     id: textField3
97     x: 7
98     y: 140
99     width: 100
100    height: 35
101    text: oldCutting.Bt
102    placeholderText: qsTr("Bt")
103    validator: DoubleValidator {
104        locale: "en_US"
105        notation: DoubleValidator.StandardNotation
106    }
107    onTextEdited: {
108        oldCutting.Bt = text
109        newCutting.Bt = text
110    }
111 }
112
113 TextField {
114     id: textField4
115     x: 7
116     y: 180
117     width: 100
118     height: 35
119     text: oldCutting.Cf
120     placeholderText: qsTr("Cf")

```

```

121     validator: DoubleValidator {
122         locale: "en_US"
123         notation: DoubleValidator.StandardNotation
124     }
125     onTextEdited: {
126         oldCutting.Cf = text
127         newCutting.Cf = text
128     }
129 }
130
131 TextField {
132     id: textField5
133     x: 7
134     y: 220
135     width: 100
136     height: 35
137     text: oldCutting.TPIa
138     placeholderText: qsTr("TPIa")
139     validator: DoubleValidator {
140         locale: "en_US"
141         notation: DoubleValidator.StandardNotation
142     }
143     onTextEdited: {
144         oldCutting.TPIa = text
145         newCutting.TPIa = text
146     }
147 }
148
149 TextField {
150     id: textField6

```

```

151     x: 7
152     y: 260
153     width: 100
154     height: 35
155     text: oldCutting.Bsc
156     placeholderText: qsTr("Bsc")
157     validator: DoubleValidator {
158         locale: "en_US"
159         notation: DoubleValidator.StandardNotation
160     }
161     onTextEdited: {
162         oldCutting.Bsc = text
163         newCutting.Bsc = text
164     }
165 }
166
167 ComboBox {
168     id: shapeSelection
169     x: 7
170     y: 301
171     textRole: "shape"
172     valueRole: "id"
173     model:[
174         { id: 0, shape: "Circle" },
175         { id: 1, shape: "Pipe" }
176     ]
177 }
178
179 Button {
180     id: button

```

```

181     x: 7
182     y: 389
183     text: "Calcola"
184     onClicked: {
185         var maxFr = 0
186         var newTime = 0
187         var oldTime = 0
188         var i = 0
189         var aveLc = 0
190         var aveFr = 0
191         var oldFeedRate = 0
192         oldSplineSeries.clear()
193         newSplineSeries.clear()
194         switch (shapeSelection.currentText) {
195             case "Circle":
196                 oldCutting.speed(i)
197                 while (i <= w.text * 10) {
198                     newCutting.speed(i / 10);
199                     if (newCutting.Fr * 60 > maxFr) {
200                         maxFr = newCutting.Fr * 60
201                     }
202                     newTime = newTime + 0.1 / newCutting.Fr
203                     newSplineSeries.append(newCutting.Fr * 60, i / 10)
204                     aveLc = aveLc + newCutting.Lc
205                     aveFr = aveFr + newCutting.Fr
206                     i++
207                 }
208                 break
209             case "Pipe":
210                 oldCutting.pipeSpeed(w.text)

```

```

211     while (i <= w.text * 10) {
212         newCutting.pipeSpeed(i / 10);
213         if (newCutting.Fr * 60 > maxFr) {
214             maxFr = newCutting.Fr * 60
215         }
216         newTime = newTime + 0.1 / newCutting.Fr
217         newSplineSeries.append(newCutting.Fr * 60, i / 10)
218         aveLc = aveLc + newCutting.Lc
219         aveFr = aveFr + newCutting.Fr
220         console.log("Y:" + i / 10 + " Lc:" + newCutting.Lc + " Fr:" + newCutting.Fr)
221         i++
222     }
223     break
224     default:
225         break
226 }
227 oldFeedRate = oldCutting.Fr * 60
228 oldFeedRate = oldFeedRate.toFixed(2)
229 oldFr.text = oldFeedRate + " mm/min"
230 oldSplineSeries.append(oldCutting.Fr * 60, 0)
231 oldSplineSeries.append(oldCutting.Fr * 60, w.text)
232 oldTime = w.text / oldCutting.Fr
233 oldT.text = oldTime.toFixed(2) + " s"
234 newT.text = newTime.toFixed(2) + " s"
235 aveLc = aveLc / (w.text * 10)
236 aveLc = aveLc.toFixed(2)
237 averageLc.text = aveLc + " mm"
238 aveFr = aveFr * 60 / (w.text * 10)
239 aveFr = aveFr.toFixed(2)
240 averageFr.text = aveFr + " mm/min"

```

```

241     chartView.axisX(newSplineSeries).min = maxFr * 0.5
242     chartView.axisX(newSplineSeries).max = maxFr * 1.3
243     chartView.axisY(newSplineSeries).min = 0
244     chartView.axisY(newSplineSeries).max = w.text
245 }
246 }
247
248 TextField {
249     id: oldFr
250     x: 7
251     y: 465
252     width: 176
253     height: 47
254     placeholderText: qsTr("Old Fr")
255     font.pixelSize: 15
256     readOnly: true
257     validator: DoubleValidator {
258         locale: "en_US"
259         notation: DoubleValidator.StandardNotation
260     }
261 }
262
263 TextField {
264     id: oldT
265     x: 7
266     y: 518
267     width: 176
268     height: 47
269     placeholderText: qsTr("Old t")
270     font.pixelSize: 15

```

```

271     readOnly: true
272     validator: DoubleValidator {
273         locale: "en_US"
274         notation: DoubleValidator.StandardNotation
275     }
276 }
277
278 TextField {
279     id: newT
280     x: 7
281     y: 571
282     width: 176
283     height: 47
284     placeholderText: qsTr("New t")
285     font.pixelSize: 15
286     readOnly: true
287     validator: DoubleValidator {
288         locale: "en_US"
289         notation: DoubleValidator.StandardNotation
290     }
291 }
292
293 TextField {
294     id: averageLc
295     x: 7
296     y: 624
297     width: 176
298     height: 47
299     placeholderText: qsTr("Average new Lc")
300     font.pixelSize: 15

```

```
301     readOnly: true
302     validator: DoubleValidator {
303         locale: "en_US"
304         notation: DoubleValidator.StandardNotation
305     }
306 }
307
308 TextField {
309     id: averageFr
310     x: 7
311     y: 677
312     width: 176
313     height: 47
314     placeholderText: qsTr("Average new Fr")
315     font.pixelSize: 15
316     readOnly: true
317     validator: DoubleValidator {
318         locale: "en_US"
319         notation: DoubleValidator.StandardNotation
320     }
321 }
322
323 ChartView {
324     id: chartView
325     x: 600
326     y: 0
327     width: 1000
328     height: 804
329     antialiasing: true
330
```

```

331     ValuesAxis {
332         id: xAxis
333         min: 0
334         max: 100
335         titleText: "Feed Rate (mm/min)"
336     }
337
338     ValuesAxis {
339         id: yAxis
340         min: 0
341         max: 100
342         titleText: "Altezza (mm)"
343     }
344
345     LineSeries {
346         id: newSplineSeries
347         name: "NewCutting"
348         axisX: xAxis
349         axisY: yAxis
350     }
351
352     SplineSeries {
353         id: oldSplineSeries
354         name: "OldCutting"
355         useOpenGL: true
356         axisX: xAxis
357         axisY: yAxis
358     }
359 }
360 }

```

Bibliografia

Winston A. Knight (Author)_ Geoffrey Boothroyd (Author) - Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools (2019, CRC Press)

Dispense dei corsi universitari

[Guida di Lenox sulle lame](#)